Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE
DE L'INDUSTRIE ET DU NUMÉRIQUE

TECHNOLOGIES CLÉS

Préparer l'industrie du futur

2020

DGE
DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES

SOMMAIRE

PRÉFACE DU MINISTRE 5

AVANT-PROPOS 7

PROPOS INTRODUCTIFS 9

MÉTHODOLOGIE 17

DOMAINES D'APPLICATION **23**

- ALIMENTATION 25
- SANTÉ ET BIEN-ÊTRE 41
- SÉCURITÉ 73
- ENVIRONNEMENT 91
- HABITAT 109
- ÉNERGIE 125
- MOBILITÉ 143
- NUMÉRIQUE 161
- LOISIRS ET CULTURE 189

ANNUAIRE **617**

MEMBRES DU COMITÉ STRATÉGIQUE **641**

MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE **641**

TECHNOLOGIES CLÉS

1 Matériaux avancés et actifs 219

2 Capteurs 229

3 Valorisation et intelligence des données massives 237

4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique 249

5 Internet des objets 259

6 Infrastructures de 5ème génération 269

7 Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs 277

8 Procédés relatifs à la chimie verte 285

9 Fabrication additive 293

10 Cobotique et humain augmenté 301

11 Intelligence artificielle 309

12 Robotique autonome 321

13 Communications sécurisées 331

14 Technologies immersives 337

15 Procédés relatifs à la chimie du pétrole 349

16 Recyclage des métaux critiques et terres rares 357

17 Microfluidique 365

18 Métaomique 371

19 Analyse comportementale 379

20 Nouvelles intégrations matériel-logiciel 387

21 Supercalculateurs 393

22 Réseaux électriques intelligents 401

TECHNOLOGIES CLÉS

23 Batteries électrochimiques de nouvelle génération 409

24 Carburants de synthèse 419

25 Technologies de l'hydrogène 427

26 Ingénierie génomique 435

27 Solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux 443

28 Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition 451

29 Ingénierie tissulaire et cellulaire 459

30 Nouvelles modalités d'immunothérapie ... 467

31 Dispositifs bio-embarqués 475

32 Technologies d'imagerie pour la santé 483

33 Exploitation numérique des données de santé 491

34 Authentification forte 499

35 Gestion intelligente de l'eau 507

36 Technologies de diagnostic rapide (eau, air, sol) 515

37 Traitement des sols pollués 523

38 Systèmes de rénovation du bâti existant .. 531

39 Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf 539

40 Systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment 547

41 Technologies de récupération de chaleur à basse température 555

42 Solaire photovoltaïque 561

43 Énergies éoliennes 569

44 Technologies pour l'énergie nucléaire 577

45 Technologies pour la propulsion 585

46 Nanoélectronique 595

47 Technologies de conception de contenus et d'expériences 605

TECHNOLOGIES CLÉS 2020

Un guide opérationnel pour l'Industrie du futur

L'innovation, par définition, est imprévisible.

Il y a dix ans, qui imaginait que le numérique entrerait à ce point dans nos usines ? Qui pensait que le secteur de l'hôtellerie serait bouleversé par des plateformes internet, alors qu'il n'y a rien de plus physique et de moins virtuel qu'une chambre ? Qui se doutait qu'en un rien de temps, autant de petites startups deviendraient des entreprises mondiales ?

Personne. Et aujourd'hui, personne non plus ne peut prévoir avec certitude le monde tel qu'il sera au cours de la prochaine décennie.

Toutefois, l'enjeu n'est pas de prévoir. C'est de permettre. Permettre à l'innovation d'éclore, de rencontrer un marché, de se diffuser, d'accroître notre productivité, d'améliorer nos modes de vie. Pour ce faire, le rôle de la puissance publique est multiple.

Il faut d'abord inciter les acteurs économiques à innover. C'est le sens de la stabilisation du crédit d'impôt recherche (CIR), ce dispositif fiscal que l'Europe entière nous envie, de tous les dispositifs de transfert de technologie et des pôles de compétitivité.

Il faut ensuite fixer le bon cadre. Je pense notamment au cadre de financement. Dans une économie de rattrapage, le financement se fait par l'endettement. Dans une économie d'innovation, le financement doit se faire par fonds propres car les investissements sont très importants, avec une forte composante technologique et immatérielle, et plus risqués. C'est cela que nous devons permettre !

Il faut investir. Investir dans la recherche, dans la modernisation de l'appareil productif. Investir dans la formation et le capital humain, car les technologies clés 2020, ce seront de nouveaux gestes, de nouvelles compétences, de nouveaux métiers. Il faut les préparer.

Dans le même temps, il faut permettre à tous, et notamment aux acteurs existants, de se saisir de l'innovation. C'est l'un des objectifs de la FrenchTech, qui organise et encourage le rapprochement entre les grandes entreprises et les startups, et de la Nouvelle France Industrielle qui crée les conditions d'une renaissance industrielle. C'est l'objet, aussi, de *Technologies clés 2020*. Ce bel ouvrage identifie les opportunités

et les acteurs clés de nos écosystèmes d'innovation et formule des recommandations pour favoriser le déploiement de ces technologies, tout particulièrement au sein des PME. Il constitue un guide opérationnel et interactif pour les entreprises, les ingénieurs, les étudiants, pour toutes celles et ceux qui veulent faire autrement. Il ouvre les portes de l'Industrie du Futur.

Merci à Philippe VARIN et Claudie HAIGNERE, ainsi qu'aux équipes qui ont travaillé avec eux, d'avoir accepté de mener ces travaux.

Donner aux acteurs les moyens d'oser et de prendre des risques : voilà comment nous industrialiserons l'innovation, comment nous tirerons notre économie tout entière vers la frontière technologique. C'est l'enjeu crucial des prochaines années.

Emmanuel MACRON

Ministre de l'économie, de l'industrie et du numérique

AVANT-PROPOS

Pascal FAURE, Directeur général des entreprises, m'a proposé de prendre la présidence du Comité stratégique de l'étude Technologies Clés 2020, en me chargeant de la bonne conduite de l'étude aux plans scientifique, technologique et industriel, et en me demandant particulièrement de veiller à ce que l'ouvrage guide de manière opérationnelle dans leurs choix stratégiques les acteurs de l'innovation technologiques, au premier plan desquels on trouve les chefs d'entreprises, les chercheurs académiques et les décideurs publics. Pour accomplir cette mission, je me suis entouré de personnalités représentant à la fois des entreprises de toutes tailles, des organismes de recherche publics et des centres de compétences favorisant la fertilisation croisée menant au transfert de connaissance.

Cette cinquième édition des Technologies Clés revêt une ambition encore plus forte que les précédentes dans la mesure où elle doit servir de guide à l'orientation des stratégies de R&D de nos entreprises, en premier lieu les PME, pour encourager et favoriser l'émergence d'innovations en France.

Notre démarche nous a conduit dans un premier temps à identifier et à comprendre les besoins des nouveaux usages et les nouveaux marchés pour, dans un deuxième temps, sélectionner les technologies nécessaires à leur comblement.

À l'instar de la théorie de Maslow, les domaines applicatifs ont été recensés à partir des besoins primaires pour l'homme et la société que sont l'alimentation, l'habitat, la sécurité, la santé et le bien-être, puis des besoins secondaires que sont l'énergie, la mobilité et l'environnement et enfin avec un besoin de nos sociétés évoluées au travers du domaine de la culture et des loisirs. Un dernier domaine applicatif a été retenu, le numérique, correspondant moins à un besoin qu'à un moyen pour catalyser les autres.

Les technologies analysées proviennent d'une part des feuilles de routes stratégiques des pôles de compétitivité, des propositions émanant des services techniques de l'État ainsi que des études menées en France comme à l'international.

Nous avons réuni plus de 200 experts académiques et industriels pour nous permettre de caractériser et sélectionner les technologies cohérentes avec notre horizon 2020 pour lesquelles la France possède des atouts crédibles face à la concurrence mondiale.

C'est ainsi que nous avons mis en avant 47 technologies clés répondant à 9 domaines applicatifs. Afin d'avoir une caution supplémentaire dans la validité de nos choix, nous avons fait appel à l'Académie des Technologies lors de nos travaux d'analyses et de sélection.

Dans la continuité de l'édition précédente, cette étude confirme le rôle prédominant du numérique dans tous les secteurs de marché puisqu'en effet, les technologies qui en sont issues sont totalement transverses à tous les domaines applicatifs.

L'ensemble des fiches relatives aux technologies clés mettent en avant les principaux acteurs français et comportent également un volet synthétisant les forces, faiblesses, opportunités et menaces en regard de la concurrence internationale. Elles se concluent par un jeu de recommandations opérationnelles à l'attention des entreprises en premier lieu mais également des décideurs publics et du monde académique.

Ces recommandations, si elles sont suivies, devraient permettre aux entreprises françaises de gagner en compétitivité et donc de conquérir plus de parts de marché.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, à quelque niveau que ce soit, à la réalisation de cette étude et forme le vœu qu'elle soit utilisée le plus largement possible au sein de nos PME, ETI et grands groupes pour que ses résultats soient source de progrès humain et de développement économique pour la France.

Philippe VARIN

Président du Comité stratégique

PROPOS INTRODUCTIFS

L'étude prospective sur les technologies clés est devenue au fil des éditions un document de référence pour l'ensemble des parties prenantes. Elle s'adresse autant aux entreprises quelle que soit leur taille qu'aux responsables académiques, économiques ou politiques. Elle complète les divers exercices stratégiques menés ces dernières années tant au niveau national qu'européen ; cette étude arrive à point nommé dans le contexte des décisions à venir dans le cadre du PIA (Programme d'Investissements d'Avenir), des plans industriels et de la Stratégie Nationale de la Recherche, de H2020 et du Fonds Européen d'Investissements.

Basée sur une méthodologie robuste et sur une concertation large, ce rapport présente une analyse approfondie des défis auxquels nous sommes confrontés et des opportunités qu'il faut saisir. Elle fournit une liste de technologies dont la maîtrise permettra de disposer d'avantages compétitifs dans une concurrence mondiale de plus en plus forte.

L'Académie des technologies a eu l'honneur de contribuer à ce projet. Les académiciens ont participé à la sélection des technologies clés et à leur évaluation. Au-delà, nous souhaitons présenter ici nos réflexions sur les défis technologiques de notre pays afin d'éclairer les débats futurs auxquels ce rapport donnera lieu.

DONNER DU TEMPS À LA MATURATION DES TECHNOLOGIES

L'étude se fixe de façon pragmatique un horizon 2020. Les auteurs, à raison, ont choisi un juste milieu entre des technologies matures qui sont en cours de déploiement et des technologies futuristes au déploiement plus aléatoire. Il convient en effet de se méfier de « l'air du temps ». Le temps du milieu politico-médiatique dans lequel nous baignons est l'immédiateté. Celui de la technologie est un temps long. Il se passe le plus souvent des années entre des premiers résultats positifs au niveau du laboratoire et le déploiement d'une technologie. L'existence de 9 niveaux de TRL (Technology Readiness Level ou niveau de maturité de la technologie) est là pour nous rappeler que l'innovation est un processus long. En outre, de nombreux secteurs d'activité présentent une grande inertie : par exemple le rythme de renouvellement du parc immobilier résidentiel et tertiaire est de l'ordre de 100 ans. Enfin le déploiement d'une technologie innovante se heurte au poids des investissements réalisés dans le secteur. Il est clair que les stratégies de déploiement des technologies doivent intégrer ces différents aspects.

INTÉGRER PLEINEMENT LA TRANSFORMATION DE LA SOCIÉTÉ PAR LE NUMÉRIQUE

Au-delà des progrès qu'on a pu constater par exemple dans le domaine des matériaux ou de l'énergie, cette cinquième édition est marquée bien entendu par la transformation de la société par le numérique, qui s'est fortement amplifiée ces dernières années. Le numérique a à l'évidence un impact fort sur les technologies dans tous les domaines. Ainsi de nombreuses technologies transversales retenues dans ce rapport sont liées d'une façon ou d'une autre au numérique ; c'est par exemple le cas des technologies des capteurs, de la cobotique, des objets connectés ou du traitement des données.

Le numérique amène aussi à s'interroger sur l'impact qu'il peut avoir sur le business model de tous les secteurs. Le cas d'Uber est symbolique de cette révolution : cette start-up américaine, fondée en 2009, menace après 6 années d'existence le secteur traditionnel des taxis dans de nombreux pays. L'approche des nouveaux acteurs consiste à mettre en relation des fournisseurs dispersés et des clients via des plateformes informatiques de services et produits accessibles en ligne ou grâce à des applications pour smartphone. Ainsi les particuliers ont la possibilité de partager leur véhicule pour du co-voiturage (Blablacar), de louer leur logement (Airbnb) ; ils deviennent de fait les partenaires de ces nouveaux entrants, bousculant les modèles économiques classiques.

Cette « désintermédiation » (suppression des intermédiaires traditionnels) provoquée par le numérique impacte aussi la plupart des secteurs industriels traditionnels. C'est le cas par exemple du secteur automobile. Il est significatif que deux champions du numérique aient lancé leur *concept car* ; la Google Car et plus récemment l'Apple Car. Ainsi en réponse à ces initiatives, la stratégie des constructeurs automobiles vise maintenant le développement du véhicule autonome et du véhicule interconnecté à côté du véhicule économe. Hier conçue autour d'un moteur, demain la voiture sera conçue autour d'un système d'exploitation. Apple et Google sont bien entendu déjà sur les rangs. Tous les secteurs d'activité sont potentiellement impactés par le numérique, tant pour la production de biens que de services. Il convient de revisiter les business model dans ce contexte et d'analyser en quoi les technologies clés présentées dans ce rapport peuvent offrir des opportunités de développement. Non seulement le numérique transforme des métiers, mais il peut aussi contribuer à créer de véritables monopoles mondiaux en permettant dans des secteurs traditionnels, l'arrivée de nouveaux entrants (Google dans le domaine de la publicité, Apple dans le secteur des smartphones). C'est le concept de GAFA (Google/Amazon/Facebook/Apple).

VISER UN BUSINESS MODEL À L'INTERNATIONAL

Les auteurs du rapport insistent à juste raison dans leur analyse sur une vision internationale. En effet les technologies n'ont pas de frontière et nos entreprises doivent intégrer cette dimension mondiale des marchés. Le succès d'une innovation réside dans une combinaison d'approches *Technology push* et *Market driven*. Trop souvent nos entreprises se focalisent sur la seule approche scientifique et technologique et passent à côté de marchés porteurs pour avoir considéré tardivement les enjeux de marché. Il faut se rappeler qu'une innovation est une invention qui rencontre son marché. La technologie doit attirer des investisseurs pour la mettre en œuvre et des clients pour l'utiliser. Dans ce contexte, il est indispensable

de considérer dès les premières phases du développement la chaîne de valeur et d'élaborer un business model.

Cette vision internationale du déploiement des technologies conduit à accorder une priorité à celles dans lesquelles nos entreprises disposent d'avantages compétitifs tant au niveau technologique que commercial. La qualité de la recherche réalisée en France et l'implantation mondiale de certains de nos champions industriels sont des atouts à valoriser.

PRENDRE EN COMPTE LA CONTRIBUTION DE LA TECHNOLOGIE À LA CRÉATION DE VALEUR

Ce rapport devrait contribuer à réconcilier nos concitoyens avec la technologie. En effet, les liens entre technologies, innovation, croissance et emploi sont complexes. Certains de nos concitoyens perçoivent l'introduction de nouvelles technologies dans l'ensemble des fonctions de l'entreprise comme destructrice d'un grand nombre de postes de travail. Les nombreuses tâches exécutées par des robots sur les lignes de production ou par des logiciels illustrent cette perception alors même qu'elles peuvent réduire la pénibilité ou la répétitivité de certaines tâches, améliorant ainsi la valeur ajoutée du poste de travail. D'autres pensent que les effets de l'innovation sont très différents selon la période considérée : on ne peut mesurer les effets positifs sur l'emploi global d'une technologie disruptive que de nombreuses années après. Au niveau micro-économique, les nouvelles technologies peuvent créer des entreprises ou des activités. C'est le cas par exemple des technologies de l'information et de la communication qui créent des emplois dans les services.

FAVORISER L'APPROPRIATION DES TECHNOLOGIES PAR LA SOCIÉTÉ

Afin que les innovations technologiques proposées sur le marché créent des emplois en France, liés aux usages, elles doivent cependant être adoptées par les citoyens. Leur appropriation par la société est donc un enjeu majeur pour leur diffusion à grande échelle et la création de nouveaux marchés.

Cette appropriation est favorisée par un certain nombre de facteurs. Outre les exigences de fonctionnalité auxquelles doivent répondre les nouveaux objets techniques (commodité, efficacité, fiabilité…), d'autres dimensions interviennent. Les objets techniques doivent pouvoir être modifiés pour les détourner de l'usage envisagé initialement et en créer de nouveaux. Leur design, dont la reconnaissance est inégale selon les secteurs, conditionne la première impression visuelle, tactile, auditive que l'on peut en avoir, ce qui va permettre de préjuger de leur caractère convivial. La dimension socio-culturelle intervient aussi. Il y a d'une part le sentiment de proximité culturelle avec ceux qui ont élaboré les objets. Il y a d'autre part l'usage plus symbolique qu'utilitaire d'objets dont la fonctionnalité est pourtant identique à celle d'objets semblables mais moins onéreux (notion de luxe), ou encore le rapport entre le prix des objets et l'utilité qu'on leur prête. Enfin, les conditions dans lesquelles ils ont été élaborés, par quelles entreprises et dans quels pays comptent.

Par ailleurs, le passage rendu possible par les technologies de l'information et de la communication, d'une société structurée par des rapports verticaux de pouvoir (à l'école, au travail…), à une société où les rapports horizontaux entre « égaux », prennent une importance économique, sociale et politique croissante.

Dans ces conditions, les objets ne devraient plus être pensés dans une logique verticale (consommateur vs producteur) car les usages qui en sont faits (ou attendus) cherchent au contraire à les insérer dans des logiques horizontales de réseaux interactifs. L'expérience utilisateur, « user's exp » joue en ce sens un rôle croissant.

La capacité des innovateurs à nous changer en profondeur, aussi bien dans notre perception de l'environnement, de nous-même que de nos semblables est considérable. Les innovateurs doivent intégrer les conséquences sociales potentielles induites par leurs innovations technologiques, qui peuvent être perçues comme des risques par la société, et être à son écoute. Reconnaître le potentiel de changement dont les technologies sont porteuses est une étape fondatrice pour pouvoir ensuite débattre avec toutes les parties prenantes des aspects perçus comme étant positifs ou négatifs de ces changements.

S'APPUYER SUR LES ÉCOSYSTÈMES D'INNOVATION

Les entreprises innovantes doivent s'appuyer sur la force des écosystèmes d'innovation pour franchir les différentes étapes de leur parcours d'innovation et de croissance, quels que soient leur taille et leur secteur. Ces écosystèmes se construisent autour des pôles de compétitivité qui fêtent leurs 10 ans d'existence. Ces structures permettent en effet la montée en puissance de nouveaux champions industriels. Les PME membres des pôles nouent beaucoup plus de partenariats à l'étranger sur un projet innovant que les autres PME (20 % contre 2 %). Par ailleurs, la participation aux projets collaboratifs du Fonds Unique Interministériel, programme destiné à soutenir la recherche appliquée, se traduirait en moyenne par un supplément de croissance de 2 % par an entre 2005 et 2012 pour les entreprises présentes dans les pôles, comparée à celles restées en dehors des pôles.

Les pôles ont d'autres intérêts. Ils ont cette capacité à assumer à la fois une vocation internationale et un ancrage local. La valeur créée par l'innovation (chiffre d'affaires, emplois, savoir-faire) est ainsi ancrée dans les territoires. Ils s'adaptent aussi bien aux industries traditionnelles que high tech, aux milieux académiques, aux TPE, aux PME qu'aux ETI et grands groupes, ainsi qu'aux différents besoins qu'ils rencontrent sur leur parcours de croissance. Ce sont des lieux privilégiés pour développer l'interdisciplinarité, la fertilisation croisée et l'open innovation.

Ils sont enfin des lieux d'apprentissage de la solidarité industrielle entre donneurs d'ordre et sous-traitants, fournisseurs et grands clients : de plus en plus d'initiatives leur apprennent à travailler ensemble. Les PME qui y adhèrent apprennent à développer une stratégie de réseau.

À l'évidence, les pôles de compétitivité auront un rôle important dans la valorisation de ce rapport.

RENFORCER LE CAPITAL FRANÇAIS ACTUEL DE SOFT POWER

Le soft power se définit traditionnellement comme la « capacité de séduire ou de persuader les autres États sans faire usage de la force ou de la menace ». Il se différencie de l'influence, en ce que l'influence peut s'exercer par la force. Il s'agit ici de créer le désir et de changer l'intérêt de l'autre.

La culture est l'un des piliers du soft power, et une distinction est généralement faite entre la « culture héritée » (patrimoine historique architectural, artistique, littéraire…) et la « culture vivante » (manifestation de la créativité contemporaine dans

tous les domaines comprenant une dimension artistique et esthétique). La France bénéficie d'un capital exceptionnel en matière de « culture héritée », ce qui fait notamment de ce pays la première destination touristique du monde. La « culture héritée » constitue la meilleure et la plus stable des références, fait autorité, communique des valeurs sous-jacentes et impressionne d'autant plus que le patrimoine est ancien et visible. La « culture vivante » est un enjeu de plus en plus important. Il n'est pas neutre à cet égard que le terme d'industrie créative est désormais davantage utilisé que celui d'industrie culturelle.

C'est donc en vitalisant sa « culture héritée » par sa « culture vivante » qu'un pays peut aujourd'hui offrir l'image d'un « pays de culture » et bénéficier du soft power qui en résulte. Trois activités sont directement concernées par le soft power. La culture bien sûr, la mode et le tourisme. Pour se développer, ces activités ont besoin de s'appuyer sur des technologies spécifiques et originales leur permettant d'être plus efficientes (artisanat d'art pour la mode, systèmes de réservation pour le tourisme) et plus attractives. Renforcer, mettre en valeur, moderniser le capital français actuel de soft power est un défi d'autant plus pertinent que les industries créatives développent des technologies et des procédés partagés davantage qu'autrefois avec d'autres secteurs économiques. Une aptitude à développer des produits créatifs est donc interprétée comme une aptitude générale à créer et apparaît ainsi comme un signal fort pour les investisseurs et les talents.

INTÉGRER LES FREINS AU DÉPLOIEMENT DES TECHNOLOGIES

Il ne faut pas sous-estimer les freins au déploiement des technologies, en particulier les réglementations. Dans le domaine pharmaceutique par exemple, on voit se développer des dogmes méthodologiques déconnectés de la nature des médicaments, du contexte de leur utilisation, de leur utilité, de la fréquence de la maladie cible, des besoins non satisfaits des patients et du contexte économique. Cette complication méthodologique et le coût associé freinent l'innovation, en particulier pour le développement de médicaments peu coûteux. La simplification des réglementations doit être poursuivie. On doit cependant noter que les réglementations peuvent aussi être déclencheuses d'innovations.

L'axe de développement que constitue celui des éco-quartiers qui seront une composante de la ville de demain nécessite aussi de revoir de nombreux aspects réglementaires tels que celui de rendre possible la mutualisation et l'échange, localement, de l'énergie produite par des bâtiments de nouvelle génération (à énergie positive, autonome, basse consommation). Ces aspects réglementaires sont aussi un frein pour les nouveaux opérateurs de la ville. Les villes, qui deviennent numériques, voient leurs services urbains de l'eau, de l'énergie, de la communication, de la santé, de la scolarisation, du commerce, ... faire de plus en plus appel à des systèmes d'information intelligents avec des capteurs intelligents à leurs extrémités. Pour les parties prenantes concernées, plusieurs transformations sont à anticiper : les collectivités locales en organisant une certaine mutualisation des bases de données relatives à leurs administrés, les gestionnaires de réseau physique en se diversifiant de plus en plus vers des services, des prestataires externes en proposant des offres de services intégrés distribués à partir de plateformes numériques, et les administrés en arbitrant entre l'intégrité de leurs données individuelles et l'attractivité des nouveaux services.

Le déploiement des technologies implique également des innovations non techniques. La domomédecine par exemple s'appuie sur l'utilisation de multiples technologies disponibles (technologies de l'information et de la communication, capteurs, actionneurs, interface de communication avec le patient……). Le déploiement de ce nouveau système de soins à domicile pour les personnes atteintes de multi-pathologies implique notamment des innovations tant organisationnelles que juridiques. Il est nécessaire de décloisonner les pratiques et les structures existantes impliquées dans la médecine ambulatoire. Ceci permettrait de maîtriser un fonctionnement complexe, en réseau, avec de multiples intervenants à différents niveaux dans la prise en charge du patient. Il est aussi indispensable de préciser les fonctions et la responsabilité de tous les intervenants du personnel médical y compris les non médecins, de sécuriser les données du DMP (Dossier Médical Personnel) ou encore de codifier les actes et de définir leur rémunération.

Le déploiement des technologies mobilise aussi des financements importants. Les besoins de financement croissent rapidement dès lors que l'on progresse dans l'échelle des TRL. Les modalités de financement évoluent également à mesure du rapprochement de l'application marché. La phase de démonstration représente une étape clé difficile à financer car les investissements sont élevés et les risques restent importants. L'effort engagé ces dernières années en faveur des opérations de démonstration reste insuffisant et doit impérativement être poursuivi, par exemple dans le PIA 3. Des financements innovants doivent être mis en place pour traverser la « vallée de la mort ».

Enfin, une interprétation mal comprise par la société du principe de précaution constitue un frein indéniable au déploiement des technologies car l'inaction a un coût. Il est en effet très souvent invoqué en dehors de son champ légal d'application (santé et environnement). De plus, il existe de nombreuses confusions, en particulier entre la notion de risque et de menace. Principe devant conduire à des analyses rationnelles des menaces, il est également trop invoqué pour mettre sur le même plan les expertises scientifiques et les opinions, aussi respectables que soient ces dernières.

FORMER À TOUS LES NIVEAUX ET TOUT AU LONG DE LA VIE

Le déploiement des technologies, la création et le développement des start-up, l'amélioration de la compétitivité, ont besoin de s'appuyer sur un vivier de compétences à tous les niveaux, mais nous pensons, plus particulièrement dans la tranche de bac -3 à bac +3. Les industriels se heurtent cependant au manque de compétences disponibles sur le marché du travail. 33 % des industriels interrogés en 2013 étaient confrontés à cette situation. C'est le cas par exemple de l'industrie française du luxe. Le recrutement de spécialistes (orfèvrerie, polissage du bois…) est difficile car la formation en artisanat d'art et dans le domaine de la mode est très fragmentée. Cette situation est étonnante pour un pays comme la France dont le patrimoine, les industries du luxe en position dominante et les savoir-faire sont pourtant reconnus mondialement. Il est primordial que ces industries, à l'avenir, s'appuient toujours sur des savoir-faire français, d'autant plus que l'engouement pour les marques de luxe est croissant notamment dans les pays émergents qui devraient constituer encore un relais de croissance important pour le secteur.

Par ailleurs, les industriels doivent aussi prendre conscience des nouvelles compétences techniques et culturelles à acquérir pour pouvoir se saisir des nombreuses

opportunités décryptées dans cette étude. La transformation de la société par le numérique l'y incite d'ailleurs. Le Big Data par exemple est une véritable opportunité de croissance et de création de valeur, pour l'économie numérique en général et pour la France en particulier. Il permet notamment aux entreprises une nouvelle proximité dans la relation avec leurs clients. L'enjeu pour les entreprises sera alors de pouvoir exploiter de grandes masses de données non structurées (images, textes, audio, clickstreams…) en temps réel, afin de mieux connaître les intentions de leurs clients ou celles d'autres entreprises (B2B2C) pour leur proposer de nouveaux services et produits dont ils ont envie, au bon moment. Ceci implique de nouvelles compétences techniques (hardware, logicielle Open source…) car la façon de faire de l'informatique est nouvelle, massivement parallèle et centrée sur les données. Un changement de culture de travail, agile et collaborative, est également nécessaire pour favoriser la démarche expérimentale qui caractérise le Big Data, car la programmation des systèmes est différente, en boucle fermée et de façon adaptative, en incluant ses clients ou utilisateurs dans cette boucle. Ainsi, au sein des entreprises, des efforts considérables doivent être faits pour offrir aux employés des opportunités de formation continue leur permettant de s'adapter aux mutations technologiques et d'étendre leur champ de compétence. Une gestion des ressources humaines proactive peut alors leur proposer des évolutions de carrière. Une organisation de la formation tout au long de la vie au sein des entreprises et des bassins d'emploi permettrait d'aider les écosystèmes à s'adapter aux mutations technologiques et à l'évolution des qualifications nécessaires »

La sélection des technologies clés présentée ici est un point de départ. Nous formons le vœu que cette étude soit largement diffusée parmi l'ensemble des parties prenantes et qu'elle donnera lieu à des échanges nourris à tous les niveaux : cela permettra de faire émerger un consensus sur un ensemble d'actions stratégiques à engager de façon concertée par tous. Ainsi la maîtrise des technologies clés permettra à nos entreprises de relever les défis d'une concurrence internationale accrue.

Alain BUGAT

Président de l'Académie des technologies

MÉTHODOLOGIE

LA GOUVERNANCE

Cette étude, pilotée par la DGE (Direction générale des entreprises) a été menée par Erdyn (mandataire du groupement) et Alcimed. L'expertise technique sur la réalisation des cartographies et de la représentation systémique a été apportée par l'Atelier Iceberg (sous-traitant).

Le Comité de pilotage : instance de suivi de l'avancement de l'étude, il s'est réuni au moins une fois par mois tout au long de la mission. Présidé par la DGE, il réunissait également Bpifrance, le ministère en charge de la recherche, celui en charge de l'écologie, la DGA (Direction générale de l'armement) et l'ANR (Agence nationale de la recherche).

Le Comité stratégique : présidé par M. Varin (Président d'Areva), il s'est réuni quatre fois au cours de l'étude. C'est l'instance souveraine dans la sélection des technologies clés retenues et le garant de la méthodologie suivie tout comme de la qualité des résultats.

LES GRANDS PRINCIPES

Technologies Clés 2020 a fait l'objet d'un cahier des charges en évolution par rapport aux exercices précédents. Pour tenir compte de ces changements, les principes suivants ont été mis en œuvre :

Principes	Conséquences méthodologiques
Avoir une approche « market pull » plutôt que « technology push »	Structurer la méthodologie et les livrables autour des besoins (dans une acception inspirée des travaux de Maslow[1]) et non plus de familles technologiques.
Inscrire les Technologies Clés 2020 dans les scenarii européens et mondiaux pour favoriser le développement à l'international des entreprises françaises	Mobiliser au début de l'étude les nombreux exercices de prospective de niveau international existants : FAO, OCDE, OMS, JRC, Forum International des Transports, AIE … en plus des travaux français (études PIPAME, feuilles de route de l'ADEME …)
Tenir compte des stratégies d'innovation récemment rédigées par les acteurs territoriaux	Mobiliser les feuilles de route stratégiques des pôles de compétitivité, les S3 (smart specialisation strategy) des Régions et les acteurs ayant piloté l'élaboration de ces documents pour renforcer la cohérence entre les politiques nationales et territorialisées
Avoir une vision systémique des technologies clés pour renforcer leur intégration dans les politiques industrielles	Qualifier et quantifier les relations entre technologies clés et élaborer des représentations graphiques permettant de comprendre les conséquences de l'abandon d'une technologie clé sur les autres pour renforcer la cohérence de déclinaisons sectorielles et territoriales

En accord avec le premier principe énoncé dans le tableau ci-dessus, nous avons donc organisé la réalisation des travaux et la restitution des résultats sur la base d'une pyramide des besoins définissant neuf domaines :

1. La pyramide des besoins schématise une théorie élaborée à partir des observations réalisées dans les années 1940 par le psychologue Abraham Maslow sur la motivation. L'article où Maslow expose sa théorie de la motivation, *A Theory of Human Motivation*, est paru en 1943. Il ne représente pas cette hiérarchie sous la forme d'une pyramide, mais cette représentation s'est imposée. Maslow parle, quant à lui, de hiérarchie, et il en a une vision dynamique. La pyramide est constituée de cinq niveaux principaux : Survie ; Sécurité ; Appartenance ; Reconnaissance/Estime ; Réalisation de soi. Nous recherchons d'abord, selon Maslow, à satisfaire chaque besoin d'un niveau donné avant de penser aux besoins situés au niveau immédiatement supérieur de la pyramide. Ces travaux ont été utilement, de notre point de vue, complétés par ceux de McClelland, psychologue qui a étudié dans les années 60 le lien entre le développement économique d'un pays et sa culture entrepreneuriale (développement de projets dans un objectif de création d'entreprise). McClelland catégorise les besoins davantage en lien avec le milieu professionnel que le modèle de Maslow.

Loisirs & culture
ÉNERGIE, Mobilité, Numérique
Environnement, **HABITAT**, Santé et bien être, Sécurité
Alimentation

Le domaine « Numérique » couvre un ensemble de besoins qui peuvent être liés aux besoins de communications à distance, aux réseaux sociaux, à la numérisation des contenus… Si à l'origine les technologies du numérique pouvaient plutôt apparaître comme étant des solutions à certains besoins, elles sont aujourd'hui, dans nombre de sociétés développées, perçues comme étant des besoins en tant que tels, consubstantiels de la société digitale.

MISE EN ŒUVRE

Le processus de sélection des technologies clés

N.B. : si la logique globale de chaque étape est d'arriver à un nombre plus restreint de technologies retenues, il a pu être introduit à différents moments de nouvelles suggestions par les personnes consultées (Académie des technologies, Comité stratégique et groupes d'experts).

L'enquête en ligne initiale : en complément de la liste des 439 technologies issues du recueil fait par la DGE à travers les feuilles de route stratégiques des pôles de compétitivité et la mobilisation de ses experts, Erdyn et Alcimed ont déployé une enquête en ligne auprès des acteurs des écosystèmes d'innovation. 454 personnes ont ainsi été sollicitées :

Enquête écosystèmes d'innovation : 454 personnes sollicitées

Les pôles de compétitivité se sont tout particulièrement mobilisés puisque 45,7 % des réponses émanaient d'eux. On trouve ensuite les Instituts Carnot (10,7 % des réponses) et les CSF (Comités stratégiques de filière ; 7,9 % des réponses).

L'Académie des technologies : représentée au Comité stratégique, elle a joué un rôle important dans le processus de sélection des technologies clés. Son implication a été actée lors du premier Comité stratégique. Les délibérations ont été menées en commission sur la base de l'expertise des membres.

Les groupes d'experts : nous avons organisé un groupe pour chacun des neuf domaines. 256 personnes ont été sollicitées, 131 ont répondu à l'enquête en ligne qui a permis de préparer les ateliers et 103 ont pu venir à ces ateliers. Nous avons tenu à assurer une diversité de participants : organismes de recherche, pôles de compétitivité, IRT, ITE, et bien évidemment des entreprises de toutes tailles. Pour chacun des neuf domaines, une réunion a été

organisée. Les participants ont été invités à définir les technologies clés à retenir sur la base des critères suivants :

- L'adéquation par rapport à l'horizon temporel de l'étude,
- Les perspectives de marché au niveau mondial (taille et / ou taux de croissance),
- Les atouts des acteurs français (notamment les entreprises).

Les travaux avaient été préparés par une enquête en ligne permettant de recueillir les avis au regard de ces critères et, si besoin, de réfléchir aux manques dans les listes proposées. Cette enquête a également été le moyen de recueillir l'opinion des personnes ne pouvant être présentes lors des réunions.

Enfin, une comparaison avec d'autres exercices de prospective et avec la NFI (Nouvelle France Industrielle) a été faite :

Auteur	Titre
Commission Européenne	Key Enabling Technologies (KET)
Ericsson	Les 10 tendances technologiques qui vont exploser en 2015
Industries et Technologies	15 leviers d'innovation pour 2015
MIT	10 breakthrough technologies 2015
Parlement Européen	Ten technologies which could change our lives
Thomson Reuters	The World in 2025 10 predictions of innovation
World Economic Forum	Top 10 emerging technologies of 2015

Ces éléments ont été utilisés à la fin du processus de sélection.

La construction des fiches et des monographies

Ces documents ont été construits sur la base :

- De recherches bibliographiques menées au niveau français et international,
- Des informations recueillies tout au long du processus de construction de la liste des technologies clés 2020 (enquêtes en ligne et groupes de travail),
- De l'expertise sectorielle des consultants d'Erdyn et Alcimed,
- Des avis et conseils formulés par les membres du Comité de pilotage et les experts sectoriels de la DGE et autres agences et administrations représentées au Comité de pilotage.

Les entreprises recensées au niveau des fiches l'ont été sur la base de leur rôle dans la chaîne de valeur (forte influence) ou d'expertises spécifiques développées et en phase avec les perspectives tracées dans ce rapport. La reconnaissance de leur niveau d'expertise à travers d'autres études ou des distinctions particulières (Concours mondial d'innovation …) a

également été un facteur d'identification et de sélection. Ce travail a été mené au cours du second trimestre 2015 grâce à l'expertise des consultants impliqués dans cette mission, de recherches documentaires complémentaires, et des suggestions apportées par les membres du Comité de pilotage Technologies Clés 2020.

Le développement d'une analyse systémique

À la différence des précédentes éditions, une technologie clé 2020 peut être rattachée à plusieurs domaines (on parle alors de technologie transversale, comme par exemple l'intelligence artificielle ou les capteurs). Par ailleurs, par rapport à l'exercice précédent, la prise en compte des liens entre technologies clés a été affinée en indiquant le sens de la relation et son intensité.

Les liens entre les technologies clés ont été caractérisés lors des différentes enquêtes et validés par les consultants d'Erdyn et Alcimed. Ces données ont permis de construire un plan d'influence / dépendance inspiré des travaux de Michel Godet. Sur la base de ce document de travail, Atelier Iceberg a mis en œuvre son expertise dans la mise en forme des données de ce type.

Ces représentations ont pu être utilisées lors des processus de sélection afin d'éclairer les choix sur les conséquences de l'élimination d'une technologie clé sur le système dans son ensemble ou par rapport à l'un des neuf domaines en particulier. Ce mode de représentation est aussi utilisé pour représenter et mettre à disposition les résultats de l'étude Technologies Clés 2020. Afin d'adapter au mieux le format de restitution des résultats, un groupe de travail a été organisé avec des PME utilisatrices avérées ou potentielles de Technologies Clés pour bénéficier de leurs retours d'expériences sur la précédente édition et de leur avis sur différentes propositions pour le présent exercice.

La construction d'un annuaire

Chaque fiche technologie clé recense des acteurs clés appartenant à différentes catégories (entreprises, acteurs académiques, IRT, ITE, IHU, pôles de compétitivité, Instituts Carnot …) qui, bien que ne constituant pas une liste exhaustive, sont représentatifs de la position de la France. Tous ces acteurs sont repris dans un annuaire. Celui-ci intègre également d'autres acteurs utiles au développement des technologies clés (par exemple, tous les pôles de compétitivité et SATT sont présents dans l'annuaire) et venant compléter ceux cités dans les fiches.

DOMAINES D'APPLICATION

© Xavier RemonginMin.agri.fr

ALIMENTATION

Définition

Le secteur de l'alimentation est un secteur d'activité correspondant à l'ensemble des entreprises des secteurs primaires et secondaires qui participent à la production de produits alimentaires finis. Il regroupe deux ensembles :

- L'agriculture (comprenant élevage et cultures), qui fournit les intrants à l'industrie agroalimentaire ;
- L'industrie agroalimentaire, qui transforme des produits animaux et végétaux en denrées alimentaires.

Le secteur agroalimentaire regroupe les activités de conception, de production et de commercialisation de produits alimentaires issus de l'agriculture ou du secteur alimentaire lui-même (produits alimentaires intermédiaires). Les cultures d'agro-ressources à des fins non alimentaires (pharmaceutiques, chimiques, textiles, énergétiques) bien que liées à des filières agro-industrielles spécifiques, sont comprises dans le champ de cette étude.

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / transversale
1	Matériaux avancés et actifs	Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données massives	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie génomique	Transversale
5	Internet des objets	Transversale
6	Infrastructures de 5ème génération	Transversale
8	Procédés relatifs à la chimie verte	Transversale
9	Fabrication additive	Transversale
17	Microfluidique	Transversale
18	Métaomique	Transversale
26	Ingénierie génomique	Transversale
27	Solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux	Spécifique
28	Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition	Spécifique

Les grands enjeux et les stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

Le secteur de l'alimentation fait face à de nombreux évolutions et défis impactant à la fois l'amont de la chaîne au niveau de l'agriculture, et l'aval au niveau des acteurs agroalimentaires, tels que :

- L'augmentation de la population mondiale ;
- L'exploitation de ressources finies et une hiérarchie des usages associée ;
- Le développement durable et la réduction du gaspillage alimentaire ;
- La volatilité du cours des matières premières agricoles ;
- Le changement des habitudes alimentaires ;
- La sécurité alimentaire ;
- L'hyper-segmentation des marchés cibles par opposition aux marchés de masse.

La population mondiale actuelle de 7,2 milliards devrait augmenter de près d'un milliard de personnes au cours des 10 prochaines années, pour atteindre 8,1 milliards en 2025 et 9,6 milliards en 2050[1]. Cette évolution, récurrente depuis le début du 20e siècle, crée une forte demande pour les produits agricoles et alimentaires. Combinée à une sous-alimentation chronique dans certaines régions du globe, la production de ressources locales dans des régions aux climats difficiles (sécheresse, périodes de mousson) par des populations largement sous-équipées constitue un véritable défi pour le secteur de l'alimentation dans son ensemble. D'autre part, une concurrence pour les ressources agricoles s'installe entre les produits alimentaires, l'industrie, l'habitat, et finalement les produits avec des applications à plus forte valeur ajoutée, tels que les biocarburants. Même si la législation européenne affiche une volonté de promouvoir en priorité la valorisation des coproduits des cultures

1 – « Perspectives de la population mondiale : révision de 2012 », Nations-Unis, 2012

ou de ressources n'entrant pas en concurrence avec les ressources alimentaires, cette tendance renforce les questions sur la disponibilité des ressources agricoles.

Concernant le second point, les besoins liés à l'augmentation démographique se conjuguent avec une évolution importante des comportements alimentaires, aussi bien dans les pays développés que dans les pays émergents. En effet, les populations des BRICS tendent à adopter un comportement alimentaire de plus en plus proche de celui des Européens ou Américains et donc à augmenter la consommation de viandes et de céréales. Cela pèse fortement sur la demande pour plusieurs ressources agricoles, l'élevage bovin étant fortement consommateur de céréales et d'eau.

Comme dans une majorité de pays, le marché de l'alimentaire français est en mutation permanente. Il suit les grands mouvements de société : l'urbanisation, les mutations de populations (métissage, vieillissement…), le développement durable, les nouvelles attentes des consommateurs (praticité, bénéfices santé…). Les entreprises françaises sont le plus possible à l'écoute des tendances de consommation, pour une plus grande satisfaction de leurs clients. En effet, la consommation évolue avec des demandes pour une nutrition plus équilibrée et des produits respectueux de l'environnement, comme l'atteste la forte croissance des produits issus de l'agriculture biologique, le développement des produits de santé et les initiatives publiques dans le domaine. A cet égard, le Programme National Nutrition Santé 2011-2015 vise 4 objectifs : réduire l'obésité et le surpoids dans la population, augmenter l'activité physique et diminuer la sédentarité à tous les âges, améliorer les pratiques alimentaires et les apports nutritionnels, notamment chez les populations à risque, ainsi que réduire la prévalence des pathologies nutritionnelles.

Enfin, le cours des matières premières agricoles est un facteur important à considérer pour la compréhension du marché de la nutrition. En effet, sur les 8 dernières années, le prix du blé a évolué à une moyenne de 200€ la tonne avec une variation entre 100€ début 2010 et près de 300€ la tonne en 2007 et 2012. Le prix des oléagineux, autres produits majeurs des marchés agricoles, a également fait l'objet de fortes variations sur des périodes très courtes. Ainsi, le cours était d'environ 400€ la tonne en avril 2014 contre 600€ début 2008 et 200€ en 2009. Quant au prix du sucre, il a évolué entre 200 et 600€ la tonne entre 2007 et 2014 et devient plus sensible aux aléas du marché en raison de la sortie des quotas européens en 2017.

Figure 1 : Évolution du cours du blé (A), des graines oléagineuses (B) et du sucre (C) entre 2006 et 2014[2]

2 – Agreste Conjoncture, Octobre 2014

La volatilité du prix de ces matières premières est liée à un ensemble de facteurs non maîtrisables tels que des aléas climatiques ou le contexte géopolitique. De plus, lors de la flambée du prix de certaines matières premières, certains gouvernements sont susceptibles de prendre des mesures unilatérales pour approvisionner leurs marchés intérieurs. Ces pratiques accentuent la volatilité des prix sur les marchés internationaux et la faible visibilité pour les utilisateurs, comme fin 2011 lorsque la Russie, l'un des principaux producteur mondial de blé, a suspendu ses exportations en raison de la sécheresse et de températures élevées dans le pays.

Afin de répondre à ces défis et évolutions, la stratégie française définie par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt[3] repose sur un renouveau du modèle agricole français, replaçant l'agronomie au cœur du système afin de mieux prendre en compte les territoires, les ressources et les écosystèmes naturels, et passant par un appel à la responsabilité individuelle des acteurs privés. Au sein de chaque filière agricole, une meilleure gouvernance et une coopération renforcée entre les acteurs économiques doivent être mis en place pour soutenir les objectifs stratégiques de la France[4]. Le Programme National Nutrition Santé[5] et le Programme National pour l'Alimentation[6] engagent également les acteurs de l'agroalimentaire à mieux répondre aux enjeux nutritionnels et de sécurité alimentaire actuels.

RÉGLEMENTATION

Le secteur de l'alimentation par rapport aux autres secteurs industriels est régi par une importante réglementation : textes législatifs, normes et labels. Ceux-ci font désormais partie intégrante des échanges tout au long de la chaîne d'approvisionnement des produits agricoles transformés, sans se limiter aux produits bruts. Les enjeux de sécurité alimentaire, d'échanges commerciaux, de gestion des prix et de préservation des ressources y sont particulièrement clés. L'ensemble de ces textes vise à la fois à rassurer le consommateur en améliorant la transparence de l'information au long de la chaîne alimentaire et à tendre vers une meilleure qualité des produits.

Le cadre législatif et réglementaire ne cesse de s'adapter à l'évolution des technologies et des connaissances scientifiques sur les risques alimentaires et, de façon directe, aux demandes émanant des consommateurs. Au niveau européen, la Politique Agricole Commune (PAC) a notamment intégré des objectifs de sécurité sanitaire afin de répondre à ces enjeux, et sa dernière réforme en 2013 vise à renforcer les objectifs de sécurité et à assurer une production alimentaire viable tout en préservant les ressources naturelles et les territoires.

Les réglementations se sont peu à peu multipliées et étendues à des domaines plus divers du fait de la complexité grandissante des activités en jeu. Parallèlement, dans beaucoup de pays développés, des changements structurels et institutionnels se font jour dans l'agroalimentaire, tandis que certaines tendances de la demande des consommateurs renforcent le rôle des normes et labels dans la chaîne alimentaire. Par exemple, la question des Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) a récemment fait l'objet d'une proposition de réforme à la Commission Européenne, assouplissant les conditions d'autorisation d'importation de produits OGM sur le territoire européen, mais permettant à chaque État membre d'en refuser l'importation sur son territoire, en cas de « motifs légitimes ». Les débats autour de cette réforme mettent en relief les enjeux cruciaux de sécurité alimentaire et d'approvisionnement en produits agricoles sur le territoire des États membres, la France

3 – Rapport « Objectif Terres 2020 », Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2009

4 – Stratégies de filières, « Pour une agriculture compétitive au services des hommes, » Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la Forêt, France Agrimer, 2014

5 – Programme Nationale Nutrition Santé 2011-2015

6 – Programme national pour l'alimentation (PNA) : http://alimentation.gouv.fr/pna

adoptant par exemple une position conservatrice vis-à-vis de l'importation d'OGM sur son territoire.

Les filières d'approvisionnement transcendent de plus en plus les frontières nationales, notamment grâce à de nouveaux produits transformés et à un cadre d'action plus favorable aux échanges internationaux. Des normes minimales de qualité protègent les consommateurs, mais elles empêchent souvent les acteurs de la distribution, de la restauration et de la transformation, dans le système alimentaire actuel, de différencier qualitativement leurs produits pour préserver ou augmenter leurs parts de marché alors qu'ils doivent soutenir la concurrence sur les marchés nationaux et régionaux. Des labels ou des normes nationales ou européennes sont donc apparues pour combler ces lacunes et mettre en avant certains produits à l'image des AOC, AOP, IGP et produits Label Rouge.

Dans certains domaines, telles que celui des produits « santé », l'Europe a récemment légiféré afin de fournir un cadre harmonisé aux industriels et une meilleure grille de lecture aux consommateurs. Le règlement n°1924/2006, encadrant les allégations santé, a donc créé 3 catégories différentes d'allégations santé régies par un article spécifique. L'article 13.1, relatif aux allégations fonctionnelles génériques, encadre l'ensemble des allégations d'ordre général, déjà prouvées scientifiquement et qui peuvent être utilisées par l'ensemble des acteurs du secteur. L'article 13.5 permet la création de nouvelles allégations fonctionnelles par un industriel sur la base d'un dossier scientifique solide. Les allégations autorisées sous cet article sont protégées par l'EFSA d'un point de vue de la propriété intellectuelle et confèrent une exclusivité au demandeur. Enfin, les allégations relatives à la réduction d'un risque de maladie et au développement infantile (article 14) se rapprochent des produits pharmaceutiques car elles doivent prouver sans ambiguïté une action sur une maladie, en prévention ou en curatif. L'obtention d'une allégation sous l'article 14 confère également une exclusivité et une protection de la propriété intellectuelle pour le demandeur.

MARCHÉ ET PRODUCTION

Agriculture

La production agricole européenne a atteint 410 Mds€ en 2013 dont 68 % sur 6 pays. La France est le leader européen avec une production annuelle de 75 Mds€, devant l'Allemagne (53 Mds€) et l'Italie (50 Mds€).

Figure 2 : Répartition de la production agricole européenne en 2013 (en milliards d'euros)[7]

En termes de commerce international mondial, l'Union Européenne est le premier exportateur de produits agricoles avec une valeur de 120 Mds€ en 2013, suivie des États-Unis (115 Mds€) et du Brésil (65Mds€)[8].

La production nationale est principalement liée à la production végétale (52 % soit 42 Mds€), suivie par la production animale (35 % soit 26,5 Mds€). Le reste de la production agricole française est liée aux services et aux subventions aux produits. Parmi les productions végétales, la France se distingue par la force de son activité céréalière et sa production vinicole. Au niveau de la production animale, le lait, les bovins et la production avicole sont les principales ressources françaises.

7 – Agreste - Eurostat

8 – Commission Européenne, 2014 : *Agricultural Trade in 2013 : EU gains in commodity exports*

Figure 3 : Répartition de la production végétale et animale française en 2013, par typologie[9]

Au niveau européen, la France est particulièrement bien positionnée dans l'élevage bovin, le pays disposant du premier cheptel avec 9,1 millions de têtes loin devant l'Allemagne et le Royaume-Uni. Concernant les autres animaux d'élevage, la France se positionne au troisième rang européen pour les porcs et les caprins, et au cinquième rang pour les ovins.

Figure 4 : Taille des principaux cheptels européens, par pays[10]

Au niveau céréalier, le pays est également le leader sur les 3 principales céréales cultivées en Europe que sont le blé, le maïs et l'orge avec respectivement 27 %, 23 % et 17 % de la production européenne. Contrairement à la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Pologne, la Roumanie, l'Italie ou l'Espagne sont quant à elles plus spécialisées sur une ou deux typologies de productions céréalières.

9 – Agreste - Eurostat

10 – Agreste, mémo 2014 - Eurostat

Figure 5 : Répartition de la production des trois principales céréales cultivées en Europe, par pays[11]

Les oléagineux, dont la France est le premier producteur européen avec 7, 181 Mt, sont principalement dédiés au marché français ; environ ¼ de la production est exportée vers l'Allemagne, la Belgique et l'Espagne. La production est majoritairement destinée à la transformation, et les principaux secteurs utilisateurs sont l'huilerie, les biocarburants, l'alimentation animale, et l'oléochimie[12].

Agroalimentaire

L'ensemble des marchés français de l'alimentaire (entreprises de l'industrie, d'artisanat commercial et du commerce de gros agroalimentaires) représente un chiffre d'affaires de 349 Mds€ en 2013, soit 16 % du marché européen. La France se situe en seconde position au niveau européen derrière l'Allemagne (371 Mds€ soit 17 % du marché) et devant l'Italie (250 Mds€ soit 11 %)[13].

Figure 6 : Marché européen de l'alimentaire, par pays

11 – Agreste, mémo 2014 - Eurostat

12 – Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la Forêt, France Agrimer, 2014

13 – Agreste, mémo 2014 - Eurostat

En 2013, l'industrie agroalimentaire française, qui a réalisé un chiffre d'affaires de 160,5 Mds€, transformait 70 % de la production agricole française[14]. Malgré la crise de 2008 qui a pesé sur la consommation des ménages, l'agroalimentaire est en croissance continue voyant son chiffre d'affaires passer de 138 Mds€ en 2004 à 157 Mds€ en 2011 puis 160,5 Mds€ en 2013. Cette croissance du marché est notamment liée au développement de nombreuses niches alimentaires destinées à des populations particulières. Parmi elles, les produits sans gluten, le halal, les produits biologiques ou encore les aliments « santé » représentent des tendances fortes. À titre d'exemple, les produits biologiques pèsent 4,1 Mds€ en France représentant 2 % du marché français en 2013, contre 1 % en 2006.

Leader mondial des exportations de produits agroalimentaires jusqu'en 2007, la France est maintenant le 5e exportateur mondial derrière les États-Unis, les Pays-Bas, l'Allemagne et le Brésil[15]. Ainsi, 27 % du chiffre d'affaires français du secteur est réalisé à l'export, ce qui a généré un excédent commercial de 8,5 Mds€, plaçant cette industrie en troisième position des contributeurs positifs à la balance commerciale française derrière l'aéronautique et la chimie. Cependant, la demande intérieure est peu dynamique en France comparée à d'autre pays, même si le budget alimentaire représente une part significative du budget des ménages avec 10 % contre 16 % pour le logement et 11 % pour les transports.

Ainsi, si la France compte sur d'importants atouts pour préserver sa position d'exportateur agricole et agroalimentaire, l'entrée en jeu possible de nouveaux pays émergents comme exportateurs mondiaux pourrait menacer le dynamisme du secteur de l'alimentation, le marché intérieur étant d'autre part peu porteur.

Les grandes tendances

Sur un marché très concurrentiel et en constant renouvellement, les acteurs de l'alimentation font preuve d'une forte capacité d'innovation, aussi bien sur le plan technologique et marketing, avec notamment l'essor des objets connectés dans tout le secteur, que d'usage.

TECHNOLOGIQUES

Numérique et objets connectés

Le marché de l'agriculture numérique pour les professionnels présente une croissance soutenue et des applications variées : gestion et optimisation de la production, minimisation des risques, optimisation de la gestion phytosanitaire des parcelles grâce aux drones, aux puces connectées, aux capteurs, etc. Parallèlement, le développement de l'offre d'objets connectés destinés aux consommateurs est une tendance importante. Cette offre permet de répondre à des enjeux clés pour les consommateurs : traçabilité des aliments, croisement entre nutrition et santé, gestion des stocks, etc., mais également de renouveler les usages : marketing géolocalisé, nouveaux modes de distribution, gestion de stocks, personnalisation des aliments… De grands acteurs internationaux comme McDonald's, Mondelēz, mais également en France Danone (avec la « Smart Drop » d'Evian), Auchan (avec une application permettant de créer une liste de courses collaborative et un parcours d'achat optimisé en magasin), SEB (avec par exemple le cuiseur connecté « Nutricook Connect ») ou Pernod Ricard (avec la « bibliothèque de spiritueux connectée »), se positionnent sur ce marché.

Produits « santé »

Nouvelles recettes

L'intérêt croissant des consommateurs pour la nutrition et le bien-être, et les avancées scientifiques et cliniques reliant la nutrition et la prévention des maladies, poussent les industriels à élaborer de nouveaux produits ou recettes à forte valeur ajoutée nutritionnelle, organoleptique et pour des populations cibles. Ainsi, la majorité des projets soutenus (34 %) par les pôles de compétitivité et BPI France dans le domaine agroalimentaire s'inscrivent dans l'un de ces trois segments de marché[16].

Alicaments

Certains projets vont au-delà d'une nouvelle proposition de produit et visent, soit à développer des ingrédients *via* de nouveaux procédés s'inscrivant dans le cadre réglementaire « *novel food* », soit à développer des aliments et ingrédients (produits alimentaires

14 – ANIA

15 – OMC, 2012 : *Statistiques du commerce international*

16 – Agriculture – Agroalimentaire, L'innovation dans les entreprises, BPI France/Pôle IAR

intermédiaires) fonctionnels, ou compléments alimentaires, pouvant justifier d'une allégation de santé grâce à la démonstration clinique des effets souhaités.

Le règlement n°1924/2006 encadrant les allégations santé limite fortement l'usage des allégations sur les différents produits alimentaires et offre au consommateur une garantie quant aux spécificités du produit concerné. Les allégations génériques telles que « la vitamine C contribue à réduire la fatigue », non exclusives et utilisables par tous les industriels, n'offrent pas de caractères différenciant et ne donnent pas lieu à des avancées technologiques. En revanche, les allégations spécifiques (article 13.5) et les allégations relatives à la réduction d'un risque de maladie et au développement infantile (article 14) offrent une possibilité de différenciation par l'innovation et la propriété intellectuelle. En effet, ces dernières doivent être nouvelles et scientifiquement démontrées. L'Agence Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA) a ainsi le pouvoir d'accorder une exclusivité aux industriels sur toute nouvelle allégation relevant de ces 2 articles, ce qui stimule l'innovation à la fois sur le développement de nouveaux ingrédients et de nouveaux produits finis.

Toutefois, fin 2014, seules 31 demandes ont été acceptées, soit un taux de réussite de 15 %. Cela démontre la difficulté à obtenir ces nouvelles allégations spécifiques et relatives à la réduction d'un risque de maladie et au développement infantile mais aussi l'intérêt qu'elles offrent en matière de sérieux, de qualité et de protection.

Figure 7 : État des demandes d'allégation spécifiques et relatives à la réduction d'un risque de maladie et au développement infantile entre 2008 et 2012, en Europe

L'ensemble des grands acteurs français de l'agro-industrie investissent ce marché depuis une trentaine d'années. Ainsi, dès 1987, Danone a lancé son premier produit avec Bio au Bifidus actif, suivi en 1994 par Actimel, produit majeur de sa gamme, et plus récemment Danacol. Sofiproteol, récemment rebaptisé Avril, a développé plusieurs gammes axées sur l'utilisation des omégas 3 et 6 dans les huiles de la marque Lesieur. Lactalis est également présent avec sa gamme BA.

OGM

Les organismes génétiquement modifiés visent à obtenir des plantes à meilleur rendement, plus résistantes aux conditions environnementales difficiles et/ou résistantes à des pathogènes/maladies.

En termes d'ingénierie génomique, la transgénèse reste la technologie la plus utilisée pour la production de plantes génétiquement modifiées. Toutefois, face aux barrières réglementaires rencontrées dans de nombreux pays européens, les industriels utilisent de nouvelles technologies qui permettent d'échapper à ces réglementations. Ainsi, la mutagénèse dirigée permet de modifier l'expression de gènes endogènes, par traitement chimique ou irradiation. L'usage de méganucléases se répand auprès des semenciers pour améliorer leurs produits. Cette technique en plein essor depuis quelques années fait l'objet d'études auprès de l'EFSA. Le caractère OGM ou non des plantes ainsi transformées n'a pour le moment toujours pas été arrêté par l'EFSA.

17 – EFSA – Analyse Alcimed

Nouveaux procédés

Optimisation des procédés de première transformation

La recherche de nouveaux actifs ou de la préservation de leur qualité se fait notamment *via* le développement de nouvelles technologies d'extraction et de purification faisant appel, par exemple, à la micro encapsulation ou à des procédés enzymatiques. La bioproduction constitue un enjeu clé pour les industries agroalimentaires, pour la production de nouveaux ingrédients, par exemple. Des solutions pour l'optimisation des procédés de 1ère transformation des produits agroalimentaires (technologies laitières et fromagères, technologies de fermentation et de salaison, nouvelles souches probiotiques, par exemple), technologies issues de biotechnologies, sont également attendues.

Procédés de production

L'optimisation des procédés de découpe est également un défi pour l'industrie alimentaire, ces étapes de production étant consommatrices de temps et d'énergie. Cela passe notamment par des outils de reconnaissance 3D pour les produits les plus complexes (découpe d'animaux par exemple). Enfin, l'amélioration des procédés de chauffage et de stérilisation est une piste actuelle pour réduire la consommation énergétique, améliorer l'efficacité des procédés et permettre la préservation de micro-organismes d'intérêt.

L'impression 3D est une technologie étudiée par de nombreux acteurs de l'agroalimentaire. Elle pourrait permettre d'améliorer l'efficacité des productions actuelles, permettre de fabriquer de nouveaux produits ou répondre à de nouvelles demandes telles que la fabrication à domicile.

Analyse microbiologique et traçabilité (hygiène et sécurité des aliments)

La connaissance et la maîtrise des écosystèmes microbiens représentent un enjeu important pour l'industrie agroalimentaire, d'une part pour l'amélioration de la qualité nutritionnelle des denrées (on connait ainsi peu ou pas l'action probiotique des aliments fonctionnels), d'autre part pour la sécurité sanitaire et le rallongement de la durée de vie de ces denrées.

Les crises sanitaires auxquelles les industriels ont dû faire face ces dernières années les obligent aujourd'hui à détecter au plus tôt les contaminants quels qu'ils soient. On assiste donc à un changement de fond dans le domaine du contrôle et de l'analyse alimentaire : le développement des techniques de mesure et de modélisation devront permettre la détection non ciblée mais exhaustive des composés alimentaires afin d'anticiper les risques. Ainsi, comme pour la santé humaine, le développement de la biologie moléculaire ainsi que le développement de nouvelles techniques de détection (spectrométrie de masse, métaomique, nouveaux capteurs spécifiques, microfluidique, etc.) seront clés pour répondre à ce défi sanitaire en nutrition. Enfin, les technologies augmentant la traçabilité, telles que les puces RFID, les emballages instrumentés par détection de traceurs, de microorganismes ou les intégrateurs temps/température, répondent également à un enjeu de réduction du gaspillage alimentaire, auquel les consommateurs sont de plus en plus sensibles.

Agriculture de précision

L'optimisation des cultures est un souci récurrent de l'industrie alimentaire et l'agriculture de précision une tendance forte. Il s'agit d'un principe de gestion des parcelles agricoles qui vise l'optimisation des rendements et des investissements, en cherchant à mieux tenir compte des variabilités des milieux et des conditions entre différentes parcelles ou à l'échelle intra-parcellaire. Ce type de culture requiert l'utilisation de nouvelles technologies, telles que l'imagerie satellitaire et l'informatique. Il s'appuie sur des moyens de localisation dans la parcelle comme le positionnement par satellite de type GPS ou l'utilisation de drones, qui permettent une plus grande efficacité dans les semis, le suivi des cultures et de la récolte. L'agriculture de précision permet également, grâce au suivi précis des cultures, de limiter le recours aux traitements phytosanitaires et d'optimiser l'irrigation. L'usage de biostimulants constitue enfin une tendance importante.

L'agriculture de précision et le développement de solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux trouvent leur prolongement dans différentes pratiques et technologies en émergence. Au Japon, Toshiba, Fujitsu et Panasonic ont lancé de véritables usines à légumes visant la production d'une variété de produits dans des locaux clos et sous conditions contrôlées. Pour décrire son usine, Toshiba emploie les termes suivants : « *éclairages fluorescents spéciaux optimisés pour la croissance des végétaux, un air conditionné qui maintient toujours la même*

température et un degré d'humidité constant, un dispositif de surveillance de l'état physique des plantes et des équipements de stérilisation pour l'emballage des produits »[18].

Au niveau individuel, le jardinage de précision est également une pratique émergente. Après de longues recherches scientifiques, Parrot, société française, a rendu l'horticulture de précision accessible au grand public avec Flower Power, un système d'arrosage contrôlé via une application mobile.

INDUSTRIELLES

Les acteurs traditionnels de l'alimentation sont de plus en plus largement concurrencés par les acteurs de la distribution qui commercialisent des produits sous leur propre nom en marque de distributeur (MDD)[19]. Initialement suiveurs, ces acteurs se démarquent aujourd'hui par leur capacité d'innovation, qui vient empiéter sur le territoire des acteurs traditionnels. En moyenne, une innovation sur cinq en Europe est une MDD. Les acteurs de la distribution développent de nouvelles gammes et de nouveaux produits en ciblant des segments de marchés particuliers (femmes, seniors, sportifs, etc.). Cependant, en France, une guerre des prix intensive et la concurrence de produits étrangers à bas prix tendent à menacer les parts de marchés des marques de distributeurs.

En parallèle, une modification des pratiques dans les exploitations agricoles s'est fait jour au cours des dernières années. Les exploitations agricoles fonctionnant sur un modèle intensif, reposant sur le recours aux intrants et l'innovation phytosanitaire, laissent place à la marge à des exploitations en agriculture biologique ou raisonnée, prenant mieux en compte les écosystèmes et les mécanismes naturels pour assurer leur productivité en préservant leur environnement.

D'USAGE

L'évolution de la société a entraîné de nombreuses modifications dans les comportements alimentaires et dans les attentes des consommateurs vis-à-vis des produits qu'ils achètent. Ainsi, trois principales tendances d'usage peuvent être citées :

- Le *snacking* et les repas en mobilité. Cette tendance modifie profondément le concept des repas et pousse les industriels à innover, notamment sur le format des produits (sachets individuels, produits prêts à consommer, etc.) ou le développement de produits spécifiques ;
- La demande de produits « sans » : sans gluten, sans OGM, sans lactose, sans huile de palme, sans sucre, etc., est en forte progression depuis plusieurs années. La croissance de ce segment est soutenue par l'élargissement d'un public au début restreint : par exemple, les produits « sans gluten », destinés originellement aux consommateurs souffrant d'intolérances, s'adressent désormais au grand public en devenant produits « bien-être ».
- Le développement durable, notamment dans les produits et emballages :
  - Production durable dans les exploitations agricoles
  - Produits biologiques : Cette tendance entraîne une hausse importante des parcelles cultivées, qui nécessite la mise en place de nouvelles conditions de culture et le développement de technologies permettant de respecter les critères des labels bio sans trop réduire les niveaux de productivité. Au niveau de l'industrie alimentaire, l'usage de ces produits est également en croissance ;
  - Emballages biodégradables, compostables ou recyclables pour répondre aux nouvelles attentes des consommateurs et limiter l'impact environnemental des produits.

La position de la France

INDUSTRIELLE

L'agriculture et l'industrie alimentaire sont un atout pour la France. Ces secteurs contribuent fortement à la santé de l'économie française via leur contribution positive au solde commercial et leur rôle dans le développement économique des territoires.

Les industries agro-alimentaires constituent une chaîne dite « *farm to fork* », allant de l'agriculture jusqu'à la distribution puis au consommateur, avec une réelle interdépendance entre chacun des maillons. Le secteur de la nutrition s'appuie sur de multiples filières (production, transformation, agroéquipement et

18 – http://www.youtube.com/watch?v=AoFZD-YUb38#t=25

19 – Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de vie, « Le développement des MDD et les stratégies des industriels de l'alimentaire », 2007

distribution) disposant d'un niveau de structuration, d'intrants (animal, végétal) et d'acteurs hétérogènes (agriculteurs, industriels transformateurs, coopératives, distributeurs, etc.). Ainsi, la diversité du secteur, qui participe à sa richesse, constitue également une difficulté pour obtenir une vision claire et partagée de l'ensemble des acteurs.

Nombre de filières sont très structurées autour d'un ou de quelques acteurs industriels très bien implantés à la fois au niveau local, national voire international. La filière française des oléagineux s'est ainsi structurée autour d'un acteur principal, le groupe industriel et financier Sofiproteol (Avril), qui valorise une grande partie de la production oléagineuse en France, aussi bien dans l'alimentaire que dans d'autres débouchés. La filière du sucre s'est clairement organisée autour d'organisations professionnelles telles que la Confédération Générale des Planteurs de Betterave et d'industriels sucriers (Tereos-Syral, Cristal Union, Saint-Louis ou Lesaffre) alors que 4 industriels (Roquette, Cargill, Tereos-Syral, Chamtor) structurent la filière amidonnière française. Dans le cas de la filière des agroéquipements, quoique majoritairement constituée de petites entreprises, le réseau de distributeurs renforce le lien entre constructeurs et utilisateurs, et le dynamisme du marché national soutenu par la diversité des cultures et des systèmes d'exploitation lui permet de maintenir un niveau de production haut, voire de l'augmenter et d'atteindre un chiffre d'affaires de 6 Mds € en 2013[20]. Quelques acteurs de taille importante, tels que Pellenc, Sulky Burel et Manitou restent présents sur le marché international. Ainsi, malgré le nombre important d'agriculteurs ou de sociétés impliquées dans ces filières, la structuration est suffisamment importante pour permettre une valorisation économique des ressources.

En revanche, d'autres filières disposent d'un niveau de structuration plus faible qui les expose à des difficultés d'ordre économique. Les industries de la charcuterie, des plats préparés ou de la découpe de viande sont encore principalement occupées par des PME. La faiblesse des investissements industriels sur certains segments de marchés et le lien distant entre les secteurs agricoles et agroalimentaires contribuent à réduire la force du tissu français. Le Comité Stratégique de Filière du secteur et des initiatives locales ont notamment pour objectif de renforcer ce lien entre acteurs et de participer à structurer les différentes filières. Ces démarches doivent également permettre aux acteurs du secteur agricole de négocier au mieux les nouveaux défis liés à la réforme de la Politique Agricole Commune (PAC) en 2013.

La même année, les 11 852 entreprises du secteur alimentaire ont réalisé un chiffre d'affaires de 160,5 Mds € et employaient 492 727 personnes réparties sur tout le territoire national[21]. Ces sociétés sont à plus de 98 % des PME/TPE. En 2010, au dernier recensement agricole, le secteur agricole représentait 500 000 exploitations et 966 000 emplois.

Au niveau mondial, les grands groupes français sont classés à partir du 13ème rang mais occupent les premières places dans plusieurs secteurs. Cinq groupes européens se classaient parmi les 15 premiers mondiaux du secteur de l'agroalimentaire et des boissons en 2012 : Nestlé S.A., AB-Inbev, Danone, Heineken et Lactalis. Les premiers groupes français dans ce classement mondial sont Danone (13e position) et Lactalis (15e), suivi par Pernod Ricard S.A en 43e position. Dans le classement européen, Danone est en 3e position, Lactalis en 5e, Pernod Ricard SA en 12e. Si l'on consolide l'ensemble des sociétés du groupe industriel et financier Sofiprotéol (Avril), celui-ci se situe à la 18e place.

Sur certains segments de marché, les entreprises françaises sont à la toute première place au niveau mondial. Ainsi, Danone et Lactalis sont les deux premières entreprises du marché des produits laitiers, Pernod Ricard SA est le 2e groupe pour les vins et spiritueux alors que Vivescia (avec Malteurop) et Soufflet sont les deux premiers producteurs de malt. Enfin, Bonduelle est au 1er rang mondial pour la transformation de légumes. Si les géants mondiaux sont présents sur notre territoire, les entreprises françaises s'implantent également à l'étranger pour se rapprocher des zones de consommation. Les dernières sources disponibles montrent que, par rapport aux autres secteurs industriels français, ce sont les industries alimentaires (hors boissons) qui réalisent le plus fort taux de chiffre d'affaires *via* des filiales implantées à l'étranger avec plus de 15 %, devant le secteur « cokéfaction et raffinage » et l'industrie automobile.

20 – Irstea, 2014 : Rapport de la mission agroéquipements : « Définir ensemble le futur du secteur des agroéquipements »

21 – ANIA

Figure 8 : Classement des groupes français en 2013 selon le chiffre d'affaires du secteur agroalimentaire et boissons

ACADÉMIQUE ET ÉCOSYSTÈME DE L'INNOVATION

La France dispose de nombreuses structures de recherche dédiées à l'innovation dans le domaine de l'alimentation. Ainsi, l'INRA, le CNRS, l'Ifremer, l'IRSTEA, le CIRAD, les Universités, les Écoles participent à la recherche dans ce domaine. Elles sont soutenues par 11 pôles de compétitivité (Aquimer, Céréales Vallée, Qualiméditerranée, Qualitropic, Terralia, Valorial, Végépolys, Vitagora, Agri Sud-Ouest Innovation, Nutrition Santé Longévité, Hippolia) couvrant l'ensemble des sujets (céréales, produits de la mer, qualité, semences, nutrition santé, etc.) ainsi que 4 Instituts Carnot (Qualiment, IRSTEA, IFREMER, ECSA). Quinze Instituts Techniques Agroalimentaires (ITAI) labellisés par le MAAF ont une mission de recherche technologique, d'appui technique, d'expertise, de formation et d'information au service des entreprises.

En plus de cet appui scientifique et technique, de nombreux outils financiers permettent d'accompagner les projets de R&D des entreprises mais aussi leurs projets d'investissement. La plupart sont financés par le Programme des Investissements d'Avenir.

Matrice AFOM

ATOUTS

Premier producteur agricole européen, avec un grand nombre de productions

Deuxième producteur agroalimentaire européen

Quelques entreprises de premier ordre dans le classement mondial des entreprises agroalimentaires (Danone, Lactalis, Pernod Ricard, Avril)

Dynamisme du secteur de l'agroéquipement, avec quelques acteurs d'envergure internationale

Forte contribution du secteur à la santé de l'économie française

Structuration de nombreuses filières constituant des chaînes « farm to fork »

4e exportateur mondial de produits agricoles et agroalimentaires

Renommée de nombreux produits gastronomiques à l'international

Capacité d'innovation des acteurs du secteur alimentation

FAIBLESSES

Secteur composé en majorité de PME et TPE

Faible niveau d'investissements industriels

Demande intérieure peu dynamique

Exposition de filières moins structurées à des difficultés économiques

OPPORTUNITÉS

Enjeux liés à l'augmentation démographique conjugués à l'évolution des comportements alimentaires

Mutations sociétales (urbanisation, vieillissement…) et nouvelles attentes des consommateurs (praticité, bénéfices santé, alimentation saine…)

Renforcement de l'export et de la production locale sur de nouvelles zones géographiques ou de nouvelles typologies de consommateurs

Innovations liées au développement des services

MENACES

Volatilité des matières premières et impact concurrentiel

Enjeux de réglementation et répercussions sur la concurrence internationale

Compétitivité accrue de pays avec une approche low-cost

SOURCES

http://www.fao.org/docrep/007/y4683f/y4683f06.htm

http://www.fao.org/docrep/004/y3557f/y3557f06.htm

http://www.oecd.org/fr/tad/echanges-agricoles/45013521.pdf

http://www.fao.org/docrep/w5800f/w5800f12.htm

http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/HS_26_6-8_cle836bd9.pdf

http://agriculture.gouv.fr/alim-agri-Chiffres-cles-2012

http://www.franceagrimer.fr/

http://www.iar-pole.com/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Synth %C3 %A8se-OSEO-Agroalimentaire-2011.pdf

http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/IAA-Panorama-2014-web_cle4c47a6-2.pdf

« Panorama des industries agroalimentaires, édition 2014 », MAAF, 2014

« Stratégies de filière, pour une agriculture compétitive au service des hommes », MAAF, France Agrimer, 2014

« Objectif Terres 2020, Pour un nouveau modèle agricole français », MAP, 2009

« Les innovations technologiques, leviers de réduction du gaspillage dans le secteur agroalimentaire : enjeux pour les consommateurs et pour les entreprises », PIPAME, 2014

« Les industries agro-alimentaires face à la volatilité du prix des matières premières : quelles perspectives à l'horizon 2020 ? », PIPAME, 2012

« Statistiques du commerce international », OMC, 2012

« Agricultural Trade in 2013 : EU gains in commodity exports », Commission Européenne, 2014

« Rapport de la mission agroéquipements : Définir ensemble le futur du secteur des agroéquipements », Irstea, 2014

GLOSSAIRE

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée

AOP : Appellation d'Origine Protégée

EFSA : Agence Européenne de Sécurité des Aliments

IAA : Industrie agroalimentaire

IGP : Indication géographique protégée

MDD : Marque de distributeur

© CNRS Photothèque - LAMOUREUX Richard

SANTÉ ET BIEN-ÊTRE

Définition

Dans le cadre de cette étude, le domaine de la santé et du bien-être regroupe plusieurs types d'industries :

Pour le domaine de la santé :

- Les industries du médicament ;
- Les industries du dispositif médical ;
- Les industries du dispositif médical de diagnostic *in vitro*.

Pour le domaine du bien-être, les industries impliquées sont celles de la cosmétique (hygiène, maquillage, soins dermatologiques et capillaires, parfums).

Les activités historiques de ces entreprises, visant à développer de nouvelles molécules pour le traitement de pathologies et/ou de nouveaux dispositifs médicaux pour maîtriser notamment le diagnostic, la prévention et le traitement de pathologies et/ou de nouvelles formulations afin de favoriser le bien-être, sont actuellement fortement impactées par de nouveaux usages, rendus notamment possibles par les technologies de e-santé ou de santé mobile.

De plus, ces industries font face à des défis importants, aussi bien au niveau sociétal que technologique ou économique, qui rendent les domaines de la santé et du bien-être particulièrement clés pour le développement industriel français.

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / Transversale
1	Matériaux avancés et actifs	Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données massives	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique	Transversale
5	Internet des objets	Transversale
6	Infrastructure de 5ème génération	Transversale
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs	Transversale
8	Procédés relatifs à la chimie verte	Spécifique
9	Fabrication additive	Transversale
10	Cobotique et humain augmenté	Transversale
11	Intelligence artificielle	Transversale
15	Procédés relatifs à la chimie du pétrole	Transversale
16	Recyclage des métaux critiques et terres rares	Transversale
17	Microfluidique	Transversale
18	Métaomique	Transversale
21	Supercalculateurs	Transversale
26	Ingénierie génomique	Transversale
29	Ingénierie cellulaire et tissulaire	Spécifique
30	Nouvelles modalités d'immunothérapie	Spécifique
31	Dispositifs bio-embarqués	Spécifique
32	Technologies d'imagerie pour la santé	Spécifique
33	Exploitation numérique des données de santé	Spécifique

Les grands enjeux et les stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

Avec l'allongement de la durée de vie et le développement des pays émergents, **la demande en matière de santé et de bien-être est amenée à progresser plus vite que la croissance mondiale** à l'horizon 2020, incitant la France à disposer d'un tissu compétitif dans ce domaine. La **santé est ainsi identifiée comme un secteur stratégique et moteur pour l'économie française dans l'avenir**, statut confirmé entre autres par le rapport Gallois[1] et le rapport Lauvergeon[2].

Les facteurs à l'origine de la forte croissance de la demande en matière de santé et de bien-être sont multiples. Il s'agit en premier lieu de l'évolution démographique mondiale et de son impact positif sur cette demande. En effet, **entre 2000 et 2050, la proportion de la population mondiale de plus de 60 ans devrait doubler**, passant d'environ 11 % à 22 %, soit plus de deux milliards de personnes de plus de 60 ans. La plupart des personnes âgées décèdent de maladies non transmissibles, souvent cumulées (cardiopathies, cancer, diabète, etc.). De plus, puisqu'elle s'accompagne d'un besoin de prise en charge au long court, l'évolution démographique crée des besoins importants en matière de santé, tels que **l'adaptation du système de soins et le développement de nouveaux moyens de diagnostic, de traitement ou d'accompagnement des patients[3].**

1 – Trois priorités techniques et industrielles sont présentées comme décisives dont «la santé et l'économie du vivant, qui ouvrent des espaces de plus en plus larges de recherche, d'innovation et de développement industriel où la France doit être présente »- Louis Gallois, *Pacte pour la compétitivité de l'industrie Française*, rapport au Premier ministre par, 5 novembre 2012.

2 – La médecine individualisée figure ainsi parmi les 7 ambitions défendues dans le rapport de la commission « Innovation 2030 » présidée par Anne Lauvergeon. *Rapport de la Commission Innovation 2030*, remis à l'Elysée le 11 octobre 2013.

3 – Communiqué de l'*OMS*.

En lien avec l'évolution démographique mondiale, les **maladies non-transmissibles, maladies chroniques en priorité, représentent un des enjeux majeurs de la santé publique de demain**. Les modifications des habitudes de vie (alimentation, sédentarité, etc.) et de l'environnement (expositions à certains polluants et toxines) dans les pays développés sont notamment un facteur de développement important pour des maladies chroniques comme les maladies cardio-vasculaires, le cancer, le diabète, les maladies respiratoires, etc., responsables de 63 % des décès dans le monde[4]. Alors que les maladies cardiovasculaires constituaient en 2012 la première cause de décès dans le monde avec près de 17,5 millions[5], les cancers étaient responsables de près de 8,2 millions de décès[6] et le diabète touchait en 2014 près de 9 % des adultes âgés de 18 ans et plus[7]. À l'horizon 2020, les maladies cardiovasculaires pourraient être responsables de près de 25 millions de morts dans le monde[8] et l'OMS estime que la fréquence mondiale des cancers pourrait augmenter de 50 % avec 15 millions de nouveaux cas par an. En 2030, le diabète sera la septième cause de décès, touchant à 80 % les pays à faible revenu. Face à l'inquiétant développement de ces pathologies, l'enjeu pour les politiques publiques de santé est triple : il s'agit non seulement de développer des moyens thérapeutiques pour mieux soigner ces maladies mais également d'accompagner la prise en charge des patients sur de longues durées et surtout d'accroître les efforts de prévention des maladies chroniques.

Par ailleurs, l'importance de la part des maladies infectieuses et parasitaires (pneumonie, diarrhée, malaria, rougeole, VIH/sida, etc.) parmi les causes de mortalité dans les pays en développement incite à ne pas les négliger[9]**.** Ainsi, **l'émergence ou la réémergence de plusieurs pathologies infectieuses au niveau mondial** (telles que la tuberculose, Ebola, la grippe aviaire, le chikungunya, etc.) et la possibilité que de nouvelles maladies émergent à l'horizon 2020 pousse les acteurs de la santé à intensifier leurs efforts de recherche pour lutter contre ces nouvelles épidémies.

À côté de ces besoins de masse se développe dans les pays industrialisés une attention particulière pour les **maladies orphelines** (ne bénéficiant pas encore de traitement efficace) et les **maladies rares** (maladies dont la prévalence est faible, inférieure à 1/2 000). Des moyens de dépistage et/ou de traitement sont développés afin d'identifier et de traiter au mieux ces cas. Ces pathologies, au nombre de 7 000, toucheraient 350 millions de personnes dans le monde[10] dont 27 à 36 millions en Europe[11] et près de 3 millions en France[12]. Elles constituent également une préoccupation de santé publique. De plus, elles bénéficient de procédures particulières de mise sur le marché et de protection de la propriété intellectuelle et représentent donc des indications de plus en plus attractives pour les industriels du secteur.

Ces nouveaux besoins s'inscrivent cependant dans un **contexte de rationalisation des dépenses publiques de santé en Europe et aux États-Unis** qui peut engendrer des limitations aux remboursements des médicaments, des dispositifs médicaux et des prestations. En France, le déficit de la Sécurité Sociale est estimé à plus de 14 milliards d'euros en 2014 dont environ 10 milliards d'euros pour la seule Assurance Maladie[13]. Dans ce contexte de maîtrise des dépenses de santé, une nouvelle Stratégie Nationale de Santé a été présentée en septembre 2013 par le gouvernement. Elle vise à réorganiser le système de santé autour du médecin généraliste et à faire une place plus importante à la médecine préventive. En outre, face notamment à la progression des maladies chroniques, les notions de parcours de soin et de vie sont amenées à être entièrement repensées pour viser une prise en charge plus complète des individus, une évolution des pratiques et une organisation plus efficiente du système de santé.

Afin de répondre au mieux à l'évolution de la demande et des besoins des populations, l'ensemble des acteurs français a lancé le 25 mars 2013, sous l'égide des

4 – Données OMS sur les maladies chroniques, 2014 (évolutions enregistrées entre 2000 et 2012)

5 – Données OMS sur les principales causes de mortalité dans le monde, 2012

6 – World Cancer Report 2014, IARC

7 – Données OMS sur le diabète, 2014

8 – Neal B., et al., *Managing the global burden of cardiovascular disease*, European Heart Journal Suppléments (2002) 4 (Supplément F), F2-F6

9 – Données UNICEF

10 – Données Global Genes

11 – Données Commission Européenne

12 – Données Alliance Maladies Rares

13 – Données du *Ministère des affaires sociales, de la santé et des droits des femmes.*

Ministères de l'Économie et de l'Industrie, des Affaires sociales et de la Santé et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, le **Comité Stratégique de Filière Industries et Technologies de Santé**, qui a défini les priorités suivantes :

- Conforter et accroître l'attractivité de la France comme lieu de recherche, de développement et de production pour les industries de santé ;
- Promouvoir le leadership français en matière d'innovation médicale ;
- Accroître la solidarité de filière en amplifiant les partenariats public-privé ;
- Augmenter la participation de la France dans les essais cliniques industriels ;
- Conquérir de nouveaux marchés à l'exportation.

Médicaments

Perte de brevets et développement de médicaments génériques et biosimilaires

L'un des défis majeurs auxquels l'industrie pharmaceutique doit faire face depuis plusieurs années est **l'arrivée à expiration de nombreux brevets de médicaments chimiques et biologiques de première importance**. Ainsi, sur le marché mondial, pour tous types de médicaments confondus, les médicaments perdant leurs brevets entre 2011 et 2015 ont un volume cumulé de ventes d'environ 150 milliards de dollars[14]. Cette dynamique devrait se renforcer à l'horizon 2020 avec les nouvelles arrivées à expiration de brevets.

- Médicaments génériques :

De nombreux médicaments chimiques phares sont remplacés ces dernières années par **l'arrivée massive de génériques sur le marché**, dont le prix de vente est généralement de l'ordre de 50 % inférieur à celui du médicament original. La part des médicaments génériques s'est ainsi accrue pour atteindre 19 % en valeur et 41 % en volume du marché global des pays de l'OCDE en 2011[15]. En 2013, en France, le marché des médicaments génériques représentait ainsi 5,1 milliards d'euros de chiffre d'affaires[16]. S'ils impactent les ventes « classiques », les médicaments génériques représentent cependant une opportunité de marché conséquente, tant pour les firmes spécialisées comme Teva, que pour les laboratoires classiques : rachat ou ouverture de divisions, filiales ou marques dédiées telles que Biogaran pour Servier, Zentiva pour Sanofi, Sandoz pour Novartis, etc.

- Médicaments biosimilaires :

L'expiration des brevets concernant des médicaments biologiques est un autre enjeu pour l'industrie pharmaceutique dans les 5 années à venir avec l'arrivée à expiration prochaine des brevets de 13 biomédicaments qui ont généré des ventes de 73 milliards de dollars en 2013[17]. Les biosimilaires commercialisés en France sont les érythropoïétines (Binocrit®, Retacrit®), le filgrastim (Ratiograstim®, Tevagrastim®, Zarzio®, et Nivestim®) et la somatropine (Omnitrope®). Les premiers biosimilaires d'un anticorps monoclonal, l'anti-TNF Remicade® (infliximab), (Inflectra® et Remsima®) ont obtenu une autorisation de mise sur le marché européen en septembre 2013 mais ne pourront être commercialisés en France qu'à échéance du brevet de Remicade®. De plus, le médicament biosimilaire Accor® (filgrastim) a reçu un avis favorable pour l'octroi d'une autorisation de mise sur le marché par le Comité des médicaments à usage humain (CHMP) de l'EMA en juillet 2014[18]. Cette perte d'exclusivité sur les biomédicaments représente une réelle opportunité pour les fabricants de biosimilaires (copie de produits biologiques hors brevet)[19], qui ont un prix de vente inférieur de l'ordre de 20 à 30 % par rapport aux médicaments princeps, notamment dans un contexte où la France a adopté une législation presque unique au monde favorisant la substitution en officine des produits dits « biosimilaires » dans le cadre de la Loi de Financement de la Sécurité Sociale 2014.[20] *A contrario*, l'impact pour l'industrie pharmaceutique est à relativiser : si le taux de croissance du chiffre d'affaires des produits biosimilaires a fortement progressé entre 2008 et 2012, la part de marché qu'ils occupent reste en effet réduite (ils ne concernent à l'heure actuelle que moins de 10 % des prescriptions[21]). Cela s'explique

14 – « Les brevets tombent mais la pharma s'en relèvera », Swissinfo, 18/01/2012

15 – *Panorama de la santé 2013*. Les indicateurs de l'OCDE, 2013.

16 – *Les entreprises du médicament en France : faits et chiffres*, LEEM, 2013.

17 – *Searching for Terra Firma in the Biosimilars and Non-Original Biologics*, IMS Health, 2013

18 – *Biomédicaments en France : état des lieux 2014*. LEEM. Septembre 2014

19 – *Searching for Terra Firma in the Biosimilars and Non-Original Biologics*, IMS Health, 2013

20 – Article 47/LFSS2014

21 – *Médicaments biosimilaires : état des lieux, ANSM*, septembre 2013.

notamment par la restriction des prescriptions aux seuls nouveaux patients, l'avantage tarifaire limité par rapport aux molécules originales et un degré d'acceptation encore limité des autorités, des praticiens et des patients quant à la sécurité des produits.[22] La croissance du marché des biosimilaires reste ainsi conditionnée par 5 facteurs : i) la date d'expiration des brevets des produits biologiques ; ii) le niveau de ventes de ces produits de référence ; iii) l'évolution de la réglementation du marché des biosimilaires ; iv) les recommandations pour chaque classe de produits biosimilaires ; v) l'incertitude quant à leur rentabilité[23].

Restructuration et externalisation

Ce nouvel environnement concurrentiel entraîne indéniablement des **mutations du modèle économique de l'innovation** pour les industriels pharmaceutiques. Cette évolution du marché pousse les acteurs industriels à diversifier leurs sources de molécules en faisant appel à de nouveaux modes de collaboration en réseau, entre la recherche publique et la recherche privée, par exemple, ou *via* des partenariats internationaux. L'industrie pharmaceutique a également intensifié son **effort de sous-traitance et d'externalisation de fonctions telles que la fabrication, la R&D et les métiers d'aval** (marketing et fonctions commerciales), ainsi que ses **relations avec les autres secteurs industriels, en particulier l'industrie chimique et les activités de services (R&D scientifique)**. L'industrie pharmaceutique française figure ainsi parmi les branches industrielles manufacturières qui ont le plus accru les effets d'entrainement de leur production sur les activités de R&D (56,5 % entre 2000 et 2010, contre 38,6 % pour l'ensemble de l'industrie manufacturière)[24]. En parallèle de ces nouvelles pratiques, les laboratoires pharmaceutiques sont engagés dans des **stratégies de concentration et de restructuration**. En France, Sanofi en 2011-2012 et Pierre Fabre plus récemment ont réduit leurs effectifs commerciaux et de R&D, entraînant de nombreuses incertitudes sur l'avenir de certains sites industriels. En ce qui concerne la tendance à la concentration du secteur, malgré les fusions récentes (Sanofi et Genzyme, Abbott et Solvay, etc.), **l'industrie du médicament reste peu concentrée en comparaison d'autres secteurs d'activité** : ses 5 premiers groupes représentent seulement 25 % du marché mondial, contre 40 % dans l'informatique, 50 % dans l'automobile ou 80 % dans l'aérospatial.

Efficacité et diminution des coûts

Autre enjeu directement lié au développement du marché des génériques, la volonté de produire des médicaments toujours plus efficaces à moindre coût. **Les pays qui détenaient jusque-là l'essentiel des brevets et les marchés émergents adoptent des orientations stratégiques différentes** pour répondre à ce besoin.

Dans la plupart des pays émergents, le premier enjeu pour les politiques de santé est de pouvoir garantir l'accessibilité du plus grand nombre aux médicaments. Les médicaments génériques, d'efficacité égale aux originaux et aux coûts réduits de moitié, représentent en ce sens une solution évidente. **C'est pourquoi des pays comme la Chine ou l'Inde ont fait le choix d'orienter l'essentiel de leur production autour des génériques**. L'Inde est ainsi le premier producteur et le premier exportateur mondial de ce type de médicaments. Les leaders internationaux de l'industrie pharmaceutique investissent, quant à eux, de plus en plus fortement en Asie, qui constitue le marché avec la croissance la plus dynamique à l'horizon 2020. Toutefois la qualité jugée insuffisante des données utilisées pour prouver la bioéquivalence de certains médicaments génériques indiens a amené en juillet 2015 l'Agence Européenne du Médicament à suspendre jusqu'à deux ans les autorisations de mise sur le marché de près de 700 médicaments[25].

22 – *Le marché français des biosimilaires : pertes de brevets, substitution, nouveaux entrants : quels enjeux et perspectives à l'horizon 2016*, Étude Xerfi, 2014

23 – *Perspectives du marché mondial des produits biosimilaires, focus spécifique sur le marché français*, Smart Pharma Consulting, février 2015

24 – *Les entreprises du médicament en France : faits et chiffres*, LEEM, 2013.

25 – *European Union Bans Hundreds of Drugs Over Clinical Trial Studies*, WSJ, 27 Juillet 2015.

Médicaments de thérapie innovante

Des thérapies innovantes ont vu le jour ces dernières années et **leur opportunité de développement à l'horizon 2020 constitue un enjeu fort de santé**. Les thérapies géniques, cellulaires et tissulaires ouvrent des perspectives toujours plus grandes **pour soigner des maladies pour lesquelles les médicaments chimiques apparaissent insuffisants**. Des maladies cardiovasculaires à l'oncologie en passant par le diabète, un très grand nombre d'aires thérapeutiques sont déjà concernées et beaucoup d'autres le seront certainement à l'horizon 2020, à l'instar des maladies neuro-dégénératives.

Le développement de médicaments de thérapie innovante a été rendu possible notamment par **les progrès des technologies dites « omiques »** (génomique, protéomique, métaomique, etc.) qui ont considérablement modifié les procédures de recherche par une approche globale qui permet de générer une très grande quantité de données analysables. **Les progrès de la recherche en biologie de systèmes**, qui permettent de mieux comprendre les mécanismes du fonctionnement cellulaire, **ont également contribué** au développement de solutions thérapeutiques innovantes.

De nombreuses thérapies sont ainsi actuellement en développement à différentes phases d'essais cliniques, ce qui laisse envisager **un développement important de leurs marchés respectifs à l'horizon 2020**. Le **marché mondial de l'ingénierie tissulaire et de la thérapie cellulaire** devrait croître à une croissance de 21 % pour attendre 73 milliards de dollars d'ici 2025[26]. La croissance la plus importante sur le marché de la thérapie cellulaire sera dans les maladies du système nerveux central, le cancer et les troubles cardiovasculaires. La réparation de la peau et des tissus mous, ainsi que le diabète sucré, seront d'autres marchés importants.[27] Le **marché de la thérapie génique** devrait, quant à lui, atteindre les 500 millions de dollars en 2020. Si les études initiales ont été menées principalement sur les maladies monogéniques, l'accent est maintenant mis sur le cancer en raison de besoins médicaux non satisfaits et d'une taille de marché conséquente[28].

Le développement de ces marchés est encore à un **stade précoce et reste conditionné à la levée de certains verrous.** D'un point de vue économique, le *business model* idéal de la thérapie cellulaire n'a pas par exemple encore été éprouvé même si l'utilisation de cellules allogéniques plutôt qu'autologues pourrait améliorer ce point.

Dispositifs médicaux

Les dispositifs médicaux regroupent une catégorie de produits qui peuvent être très différents selon leur poids, leur taille ou bien encore leur coût de production. Cependant, ces produits doivent répondre à une caractéristique commune essentielle : ils doivent être « *destinés par le fabricant à être utilisé chez l'homme à des fins médicales* » (article L 5211-1 R 5211-1 du CSP).

Les différents types de dispositifs médicaux peuvent ainsi être classés en différentes catégories (ex : diagnostic ou traitement) et être dédiés à différentes aires thérapeutiques (l'anesthésie et plus généralement les outils utilisés en bloc opératoire, le neuro-cardiovasculaire, l'orthopédie, la dermatologie, la pneumologie, l'otorhinolaryngologie, l'ophtalmologie, l'urologie, la néphrologie, la gynécologie), ou être transversaux (outils d'imagerie interventionnelle, aides techniques). Ils représentent une voie majeure de progrès et d'innovation dans le domaine de la santé.

Santé connectée et bien-être connecté

La santé connectée et le bien-être connecté sont des enjeux majeurs à l'horizon 2020. Ils impliquent une transformation profonde des usages du numérique (voir 3.3.1 Les grandes tendances d'usage – La santé connectée) et permettent **une évolution importante de l'offre de soins et de la médecine.**

La e-santé comprend la télémédecine définie à l'article L6316-1 du code de la santé publique, ainsi qu'une partie de la m-santé ou santé mobile[29], dont

26 – *The Future of Tissue Engineering and Cell Therapy to 2025*, Smithers Apex, février 2015.

27 – Research and Markets: *Global Cell Therapy Market 2015-2020 – Technologies, Markets and Companies.* Mai 2015.

28 – Research and Markets: *Global Gene Therapy Market & Pipeline Insight Report 2014.* Octobre 2014.

29 – Définie comme « les pratiques médicales et de santé publique reposant sur des dispositifs mobiles tels que téléphones portables, systèmes de surveillance des patients, assistants numériques personnels et autres appareils sans fil, ainsi que les applications qui peuvent se connecter à des dispositifs médicaux ou capteurs, les

le marché mondial est estimé à 23 milliards de dollars en 2017, l'Europe représentant 6,9 milliards[30] (TIC en mobilité tels que par exemple les *smartphones* qui contribuent à la prévention médicale) et du *quantified self* (mesure de soi). Le *quantified self* et la m-santé participent également en partie du bien-être connecté. Tous ces aspects de la santé numérique sont interconnectés et s'influencent mutuellement.

Objets connectés

Les objets connectés, qui seront plus fortement présents dans notre quotidien, vont bouleverser la pratique médicale et l'offre de soins. Par les données qu'ils permettent d'enregistrer *via* leurs capteurs, ils seront à la base de la santé et du bien-être connecté. Il est estimé que leur marché mondial va croître à une croissance annuelle de 12,2 % à 17,71 milliards de dollars d'ici 2020[31].

La distinction entre les objets de la santé (relevant de la réglementation spécifique applicables aux dispositifs médicaux) et ceux du bien-être (relevant de la réglementation applicable à tous les biens de consommations) est fonction des allégations d'usage définies par leur fabricant. Ainsi, par exemple, au bien-être connecté correspondent des produits sans allégation médicale tels que les balances connectées, les bracelets et montres connectés alors que l'on retrouve dans la catégorie des dispositifs médicaux connectés des produits avec des allégations médicales comme un stéthoscope connecté, un lecteur de glycémie connecté, un auto-tensiomètre connecté, etc.

Big Data et valorisation numérique des données

Les objets connectés permettent de générer un nombre toujours plus important de données à exploiter. La manière dont ces données seront utilisées en médecine sera modifiée en profondeur. La valorisation de ces données, à l'échelle du patient comme à celle de populations entières, trouve en effet de nombreuses applications que ce soit en **médecine personnalisée, ambulatoire, préventive, pour l'amélioration des essais cliniques, en recherche préclinique ou même en épidémiologie**.

La modélisation numérique de ces données permettra le développement de la médecine *in-silico*, particulièrement efficace en **prévention et prédiction**.

L'exploitation des données de santé et de bien-être soulève un certain nombre de questions comme celle de leur accès aux différents acteurs du parcours de soins, ou aux financeurs tels que les mutuelles et les assurances. Le caractère personnel et confidentiel de ce type de données complexifie cette question. Pour les objets de bien-être connecté, outre la sécurisation des informations recueillies, c'est parfois la pertinence des données qui peut être problématique, étant donné la très forte hétérogénéité des performances des produits disponibles.

Quantified self

Relevant principalement de la m-santé car relayé par des *smartphones*, le « *quantified self monitoring* » (ou mesure de soi) est un **enjeu important de la médecine de demain et de la médecine préventive en particulier**. Utile à la santé et au bien-être connecté, l'auto-mesure consiste en effet à enregistrer un grand nombre de données sur sa vie quotidienne, ses habitudes et ses activités, afin de pouvoir adapter son mode de vie en conséquence (sport, alimentation, prise de médicaments, etc.).

Télémédecine

La télémédecine, pratique médicale à distance, **fait appel aux technologies des TIC pour répondre à des besoins croissants en matière de santé** : égal accès aux soins et amélioration des délais de prise en charge, maintien de la qualité du diagnostic par un partage des informations rapide et performant entre professionnels de santé, limitation des complications liées à une prise en charge trop tardive[32].

Elle permet ainsi d'établir un diagnostic, d'assurer, pour un patient à risque, un suivi à visée préventive ou un suivi post-thérapeutique, de requérir un avis spécialisé, de préparer une décision thérapeutique, de prescrire des produits, de prescrire ou de réaliser des prestations ou des actes, ou d'effectuer une surveillance de l'état des patients[33].

systèmes de conseil personnalisés, les informations de santé et rappels de prise de médicaments envoyés par SMS et la télémédecine pratiquée par communication sans fil ». Livre vert sur la santé mobile, Commission Européenne, Avril 2014.

30 – Livre vert sur la santé mobile, Commission Européenne, Avril 2014.

31 – Wireless Devices Market, Markets&markets, Décembre 2014

32 – Données du *Ministère des affaires sociales, de la Santé et des Droits des femmes*

33 – Cf. art. L6316-1 du code de la santé publique

Le *quantified self monitoring* pourra bientôt participer à la télémédecine grâce aux objets connectés de santé. En effet, il permettra par exemple l'affichage et la transmission de **la mesure dans le cadre de la surveillance de maladies chroniques** comme le diabète ou l'hypertension. Les professionnels incitent ainsi de plus en plus leurs patients atteints de maladies chroniques comme le diabète à suivre leur activité physique, leur glycémie, etc. et les étudiants en médecine sont de plus en plus formés à comprendre ces données. Si dans le cadre de ces protocoles de suivi, le patient réalise seul les mesures, leur incidence sur sa santé reviendra toujours à un professionnel de santé comme la décision médicale qui pourra en découler.

Ingénierie médicale

La filière de l'ingénierie médicale est particulièrement prometteuse et intéressante pour la France à l'horizon 2020. À la croisée de la santé et de la technologie, **elle concilie des axes technologiques majeurs :** l'imagerie et le diagnostic, la robotique médico-chirurgicale, la bio-informatique et l'informatique médicale.

Son **caractère multidisciplinaire** constitue en outre une force essentielle à l'horizon 2020. Les progrès réalisés dans de nombreux domaines tels que la physique, la chimie ou les mathématiques serviront à son développement.

L'imagerie médicale interventionnelle ou de diagnostic est enfin particulièrement intéressante puisqu'adaptée aux besoins croissants en **télémédecine comme en médecine personnalisée.**

En France, c'est le segment du diagnostic médical par imagerie qui est le plus prometteur à l'horizon 2020, comme détaillé dans la fiche « Technologies d'imagerie pour la santé ».

Géronto-technologies

Le **bien vieillir est un aspect important dans le domaine de la santé à l'horizon 2020** du fait du vieillissement des populations et de l'augmentation du nombre de personnes en situation de perte d'autonomie ou de dépendance. Le développement de géronto-technologies, ou dispositifs pour l'autonomie, apporte ainsi des aides techniques médicales. De plus, ces technologies ouvrent des perspectives de marché prometteuses, ainsi qu'une réponse intéressante aux problématiques de prise en charge.

Les technologies en faveur du maintien à domicile des personnes en perte d'autonomie, telles que celles prévenant les chutes et constituant des aides aux troubles de la mobilité et de la cognition, seront ainsi particulièrement privilégiées. Des systèmes permettant de soigner les angoisses de la personne âgées sont également concernés.

Cosmétiques

Produits anti-âge

De même que les différents acteurs de la santé doivent s'adapter à l'évolution démographique, l'industrie du bien-être répond et s'adapte au potentiel de marché croissant lié aux seniors et étend sa gamme de produits-anti-âge, initialement restreinte aux produits dermatologiques, aux produits capillaires[34].

Par ailleurs, la demande de produits anti-âge est également soutenue par une pression sociétale de plus en plus forte, assimilant la performance à la jeunesse. Cette quête de l'éternelle jeunesse a favorisé l'émergence de cosmétiques à appliquer en prévention des effets de l'âge et la consommation croissante de ce type de produits.

Pays émergents : un ralentissement de la demande

Les pays émergents ont constitué un fort relais de croissance de l'industrie cosmétique depuis le début du XXIe siècle, notamment du fait de l'essor des classes moyennes urbaines. Ainsi, on estime qu'en 2013 **les nouveaux marchés en Asie-Pacifique et Amérique Latine ont généré 80 % de la croissance du marché global des cosmétiques du fait de l'augmentation des classes moyennes urbaines[35].** Contrairement à l'Europe ou aux États-Unis, en 2015, ces marchés ne sont pas encore arrivés à saturation[36].

Cependant, les pays émergents ne sont plus aussi facilement adressables pour les industriels de la cosmétique occidentaux qu'il y a encore quelques années. L'instabilité politique en Russie, le spectre de la récession économique au Brésil, ou encore la migration progressive des consommateurs chinois vers des marques

34 – *The elderly are a key consumer demographic for the beauty industry*, Mintel, 2014

35 – *Challenging growth in the luxury and cosmetics sector*, EY, 2014

36 – Selon Cosmetic Valley

locales ou sud-coréennes, obligent aujourd'hui les acteurs occidentaux de l'industrie cosmétique à revoir leur modèle économique, en proposant des produits se démarquant de la concurrence locale sur les marchés émergents, ou en cherchant des relais de croissance dans d'autres zones géographiques (voir chapitre « Les grandes tendances »)[37].

Naturalité

Depuis quelques années, la tendance des consommateurs qui demandent davantage de produits contenant moins d'ingrédients issus de l'industrie pétrochimique s'est confirmée. La méfiance vis-à-vis des produits issus de procédés chimiques, contenant certains composés jugés nocifs pour la santé, ou encore des préoccupations éthiques et environnementales ont favorisé l'émergence de produits cosmétiques « naturels »[38] et, dans une moindre mesure, biologiques[39].

Enfin, il est à noter que **ces produits sont plébiscités majoritairement par les classes de populations les plus aisées** et s'inscrivent dans la tendance des produits « premium » (voir chapitre « Les grandes tendances »)[40].

RÉGLEMENTATION

Médicaments

Cadre législatif en 2015

La réglementation du marché des médicaments est définie en France par le Code de la santé publique, qui encadre de manière stricte toute la chaîne du médicament, de la fabrication à la distribution en passant par l'importation et l'exportation. **La commercialisation d'un médicament ou d'un produit de thérapie génique ou cellulaire est ainsi soumise à une autorisation de mise sur le marché (AMM)** délivrée par l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) à l'échelle nationale ou par l'European Medicine Agency (EMA) à l'échelle européenne. Dans certains cas spécifiques (médicaments biosimilaires, médicaments orphelins et thérapies innovantes), les entreprises pharmaceutiques ont l'obligation de passer par une AMM centralisée afin de garantir la sécurité des patients.

Les médicaments sont admis au remboursement par décision ministérielle après avis de la Commission de la Transparence de la Haute Autorité de Santé (HAS). Pour être éligibles au remboursement, le Service Médical Rendu (SMR) ainsi que l'Amélioration du Service Médical Rendu (ASMR) par rapport aux thérapies déjà disponibles sur le marché sont évalués. Les médicaments candidats doivent prouver être au moins aussi efficaces que ceux déjà commercialisés pour la ou les même(s) indication(s).

Une fois l'AMM obtenue, et dans le cadre d'une demande de remboursement du laboratoire pharmaceutique qui exploite le médicament, le prix du médicament est établi par le Comité Économique des Produits de Santé (CEPS), en fonction notamment de l'ASMR et du SMR.

Le taux de remboursement relève, quant à lui, de la compétence des Ministres en charge de la Santé et de la Sécurité sociale, en fonction de l'avis de SMR, rendu par la HAS, puis de l'avis de l'Union nationale des caisses d'assurance maladie. Lorsqu'un médicament est déclaré non-remboursable, il peut être commercialisé directement après obtention de l'AMM à un prix dit « libre » car non fixé par les services de l'État. Si sa prescription n'est pas déclarée obligatoire alors sa publicité auprès du grand public peut également être autorisée par l'ANSM.

Évolutions à l'horizon 2020

Les principales évolutions du cadre réglementaire des médicaments à l'horizon 2020 porteront sur **l'adaptation aux nouvelles modalités de thérapies innovantes telles que la thérapie génique et cellulaire**.

Les médicaments de thérapie innovante font l'objet en France et en Europe d'une réglementation spécifique, particulièrement stricte, du fait des enjeux adressés par les technologies mobilisées pour leur mise en place (cellules souches pour la recherche sur les thérapies cellulaires et manipulations du génome humain pour la recherche sur la thérapie génique).

Dispositifs médicaux

Cadre législatif en 2015

En France, la règlementation qui encadre la mise sur le marché des dispositifs médicaux est de plus en plus stricte, avec pour objectif d'assurer la sécurité des

37 – *Turbulence in Emerging Markets but beauty will prevail*, GCI Magazine, 2014

38 – Cosmétique « naturel» : produit composé de substances d'origine végétale, animale ou minérale obtenus et traités au moyens de méthodes physiques, microbiologiques ou enzymatiques.

39 – *Les cosmétiques naturels bénéficient de la demande éthique dans les pays nordiques*, Premium Beauty News, 2015

40 – *Expansion and Challenges Ahead for Emerging Markets: Growth in Natural Skin Care*, Cosmetic & Toiletries, 2015

patients. La loi n°2011-2012 du 29 décembre 2011 relative au renforcement de la sécurité sanitaire du médicament et des produits de santé vise ainsi à aller plus loin que la transposition du cadre européen, notamment sur la question des modalités encadrant la publicité pour les dispositifs médicaux (cette loi concerne les DM et les DMDIV).

Les dispositifs médicaux entrent dans le cadre général européen de la nouvelle approche[41], qui permet la mise sur le marché d'une grande diversité de produits de consommation. Ce cadre vise essentiellement la suppression des barrières et la libre circulation des marchandises au sein du marché unique. Les produits portent un marquage CE prouvant leur conformité avec la législation applicable en matière de sécurité. Cependant, du fait des spécificités des dispositifs médicaux (action sur la santé humaine), ils sont couverts par une législation d'harmonisation sectorielle qui se compose de trois directives :

- Les dispositifs médicaux implantables actifs (directive 90/385/CEE);
- Les dispositifs médicaux (directive 93/42/CEE);
- Les dispositifs médicaux de diagnostic in vitro (directive 98/79/CE).

En France, l'autorité compétente en matière de contrôle réglementaire du marché est l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM). Elle intervient *a posteriori* pour surveiller le marché, c'est-à-dire garantir la conformité aux exigences de santé et de sécurité des dispositifs commercialisés au niveau national.

Les dispositifs médicaux pris en charge par l'Assurance maladie sont :

- **Ceux pour lesquels les dépenses sont intégrées dans les Groupes homogènes de séjours (GHS) dans les établissements de santé** (implants d'ophtalmologie, matériels d'ostéosynthèse, sutures et agrafes digestives, etc.). Une dérogation est prévue pour ceux susceptibles d'introduire une hétérogénéité des coûts de séjour en raison de leur prescription variable (implants cardiaques et vasculaires, etc.) : ils sont inscrits dans la « liste en sus » et peuvent ainsi être facturés en sus des prestations d'hospitalisation ;
- **Ceux qui sont inscrits sur la liste des produits et prestations remboursables (LPPR)**, après évaluation de la CNEDiMTS (dispositif médical, prestation). Le remboursement s'effectue sur demande, par le fabricant, d'inscription sur la liste sous forme générique ou sous nom de marque (produits innovants ou nécessitant un suivi particulier). La prise en charge est fondée sur le tarif du dispositif, fixé principalement en fonction du service attendu (SA), de l'amélioration du service attendu (ASA), des prix des produits ou des prestations comparables déjà remboursés, du volume des ventes prévues et des conditions prévisibles et réelles d'utilisation ;
- **Ceux qui sont considérés comme « innovants » dans les établissements de santé** (mesure législative du 24 juin 2009). Ceux qui ne seraient pas intégrés dans les GHS peuvent être pris en charge de manière dérogatoire et temporaire;
- **Ceux qui sont pris en charge dans le cadre de l'acte.** Lorsque des dispositifs médicaux ne sont pas pris en charge par la Sécurité sociale (inscription sur la LPPR ou sur la liste en sus, ou attribution d'un forfait innovation ou prise en charge dans le cadre de l'acte), leur prix est dit « libre » car non fixé par les services de l'État[42].

Évolutions à l'horizon 2020

Le **cadre réglementaire des dispositifs médicaux est amené à fortement évoluer à l'horizon 2020**. En premier lieu, les trois directives européennes établissant les conditions de mise sur le marché de dispositifs médicaux font actuellement l'objet d'une révision qui vise notamment à renforcer la sécurité des patients en améliorant la surveillance du marché. Ce projet devrait renforcer les règles concernant la mise sur le marché et la surveillance des dispositifs médicaux, la transparence, la traçabilité et les investigations cliniques.

En ce qui concerne les objets connectés et plus particulièrement la production et l'exploitation de données, il n'existe pas encore de législation spécifique suffisante. Les enjeux sont similaires à ceux posés par le *Big Data* (protection, accès et propriété des données, lutte contre le piratage, etc.) avec toutefois des enjeux spécifiques portant sur l'équilibre entre confidentialité et sécurité du patient. L'ouverture de l'accès aux données médicales est également un

41 – Voir le guide de la nouvelle approche : http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/11502

42 – *Parcours du dispositif médical*, HAS, 2009 (actualisation : 2013)

élément important, source de débats qu'il est nécessaire d'éclaircir au cours des prochaines années.

Le développement des objets connectés en santé soulève plusieurs questions dont celles de leur application médicale puis le cas échéant, de leur remboursement au titre des dispositifs médicaux pris en charge par la sécurité sociale. Si aujourd'hui ceux-ci ne sont pas pris en charge par la sécurité sociale, l'Ordre des Médecins à rendu en février 2015 un avis favorable, soumis toutefois à certaines conditions[43]. Les objets doivent en effet, selon l'Ordre, faire l'objet d'une évaluation scientifique neutre qui prouve leur utilité médicale. Une évaluation spécifique pour les dispositifs de télémédecine est également recommandée.

Cosmétiques

Cadre législatif en 2015

En France, la mise sur le marché de produits cosmétiques est soumise à plusieurs conditions issues des dispositions du règlement (CE) n°1223/2009 du Parlement Européen et du Conseil du 30 novembre 2009 relatif aux produits cosmétiques (mis en application le 11 juillet 2011), ainsi que des dispositions de la loi n°2014-201 du 24 février 2014 apportant des adaptations au droit européen dans le domaine de la santé. Une dizaine d'amendements entre 2009 et 2014 complètent le cadre législatif.

Contrairement aux médicaments, une autorisation préalable à la mise des produits cosmétiques sur le marché n'est pas nécessaire, même s'il existe des obligations à respecter. De surcroît, pour chacun des produits destinés à être mis sur le marché, le fabriquant doit :

- Déclarer une personne responsable ;
- Fournir un dossier d'information sur le produit « DIP » (description du produit, rapport sur la sécurité, description de la méthode de fabrication, déclaration de conformité aux bonnes pratiques de fabrication en vigueur, déclaration des effets indésirables, fourniture des preuves de l'effet revendiqué ainsi que des données relatives aux expérimentations animales réalisées, liste des nanomatériaux contenus au sein du produit)[44].

Par ailleurs, après avoir interdit en 2006 la vente de produits cosmétiques finis testés sur des animaux, l'Union Européenne a été pionnière en bannissant de surcroît tout produit dont l'un des ingrédients a été testé sur des animaux depuis mars 2013.

L'Europe constitue de ce fait la région où la législation est la plus exigeante au monde en termes d'éthique et de sécurité du consommateur. Cette forte rigueur est à double tranchant. D'un côté, des zones géographiques telles que les États-Unis peuvent produire des biens cosmétiques moins chers, car faisant appel à des protocoles de tests moins coûteux ou à des composés chimiques interdits en Europe, rendant les produits européens moins compétitifs sur ces zones. À l'inverse, cette rigueur est un gage de qualité des produits européens qui contribue à leur réputation de produits « premium », notamment pour les produits « made in France ».

De plus, les ONG de défense des droits des animaux nord-américaines, brésiliennes et japonaises exercent une forte pression sur les décideurs politiques afin de suivre la même voie[45]. Ainsi, l'avantage concurrentiel qu'ont ces pays sur l'Europe au niveau des tests n'est que temporaire. En parallèle, l'industrie européenne œuvre pour accélérer la validation des méthodes d'essais alternatives et leur acceptation par les organismes de réglementation internationaux afin de pouvoir vendre leurs produits testés avec ces protocoles sur le marché mondial.

Évolutions à l'horizon 2020

En Europe, le règlement (CE) n°1223/2009 relatif aux règles de mise à disposition de produits cosmétiques prévoit des rencontres pour légiférer autour de la labellisation des produits en 2016, ainsi que sur la mise à jour du cadre légal existant encadrant les nanomatériaux en 2018, sur la base des progrès scientifiques réalisés[46].

Des efforts, liés au lobbying exercé par des institutions telles que *Cosmetics Europe* ou la Fédération des Entreprises de la Beauté pour harmoniser et homologuer les protocoles de tests alternatifs excluant les animaux, se poursuivront à l'horizon 2020.

Enfin, **de nouvelles règlementations sur les cosmétiques sont attendues en Chine entre les**

43 – *Santé Connectée : de la e-santé à la santé connectée*, Le Livre Blanc du Conseil national de l'Ordre des médecins, janviers 2015

44 – *Règlementation des produits cosmétiques*, Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé, 2014

45 – *Nous devons veiller à la compétitivité de l'industrie cosmétique européenne*, Cosmetics Europe, 2014

46 – *Règlement (CE) n ° 1223/2009 du Parlement européen et du Conseil relatif aux produits cosmétiques »*, Journal Officiel de l'Union Européenne, 2009

années 2015 et 2016. Celles-ci devraient faciliter l'importation de produits occidentaux en se rapprochant du cadre légal européen et en augmentant la liste d'ingrédients autorisés dans les produits cosmétique[47]. La Chine constitue en effet un marché actuellement très contraignant pour les industriels européens car n'acceptant qu'une certaine liste d'ingrédients bien définie et peu mise à jour. Ainsi, il est extrêmement difficile pour une entreprise occidentale d'y lancer ses dernières innovations basées sur de nouveaux actifs.

MARCHÉ

Médicaments

Dans le monde

En 2014, le marché mondial du médicament est évalué à environ 1000 milliards de dollars[48] (contre moins de 200 milliards de dollars en 1990). Il devrait progresser à l'horizon 2020 à un taux de croissance annuel de 4 à 7 % par an, atteignant un chiffre d'affaires de 1300 milliards de dollars en 2018.[49]

Le marché américain reste le plus important et concentre 38 % du marché mondial, loin devant les principaux pays européens (Allemagne, France, Italie, Royaume-Uni et Espagne), qui représentent 18 % de ce marché, le Japon (9 %) et les pays émergents (Chine et Brésil) qui totalisent quant à eux 10 % de parts de marché.

Figure 1 : Le marché pharmaceutique mondial par zone géographique en 2013 (en prix producteur) – (*Leem – IMS Health*)

Figure 2 : Parts de marché estimées en 2017 – (*IMS Health*, estimation mars 2014)

Le développement des marchés des pays asiatiques émergents pourrait modifier à l'horizon 2020 la structuration du marché mondial du médicament. En effet, si la Chine est aujourd'hui le troisième pays en termes de part de marché derrière les États-Unis et le Japon, elle possède un marché particulièrement dynamique qui devrait croître à un taux de croissance annuel de 11 % d'ici 2018[50] (ce qui en ferait le deuxième marché mondial avec 14 % des ventes en 2018 derrière les États-Unis avec 32 % des ventes). Pour de nombreux groupes pharmaceutiques, la Chine est ainsi désormais un facteur clé au niveau de la croissance de la valeur absolue du chiffre d'affaires. L'Inde et le Brésil devrait également enregistrer des taux de croissance annuels de 10,5 % d'ici 2018[51]. L'introduction de mesures en faveur d'une protection sociale élargie, en Chine en particulier, n'est pas étrangère à ce mouvement.

Le retour de l'innovation devrait, quant à elle, permettre à des marchés matures comme les États-Unis et le Royaume-Uni d'afficher une croissance de 4 à 6 % par an.[52]

La croissance mondiale du marché est en outre, pour beaucoup, tirée par les génériques et les biomédicaments du fait notamment de l'arrivée à expiration de nombreux brevets. Les marchés des BRIC,

47 – *China proposes tighter cosmetics standards*, Chemical Watch, 2015

48 – Données IMS Health, mars 2015

49 – Données IMS Health, mars 2015

50 – Données IMS Health, mars 2015

51 – Données IMS Health, mars 2015

52 – Données IMS Health, mars 2015

en particulier l'Inde et la Chine, sont ainsi essentiellement portés vers les médicaments génériques.

À noter également**, la forte croissance des médicaments pour les maladies rares par rapport aux autres médicaments** prescrits pour traiter de plus larges populations : les médicaments orphelins vont en effet croître de 11 % par an jusqu'en 2020 alors que les autres médicaments ont une croissance estimée à 4 % (ces médicaments particuliers constitueront ainsi 19 % des ventes totales du marché en 2020 soit 176 milliards de dollars[53]).

En France

Le chiffre d'affaires des entreprises du médicament en France est estimé à 46,2 milliards de dollars en 2014 et devrait atteindre 48,2 milliards de dollars en 2020 **sur la base d'une croissance annuelle moyenne relativement faible de 0,7 %**[54]**.** La France constitue ainsi le deuxième marché européen derrière l'Allemagne.

Le marché est dominé par les médicaments brevetés mais du fait de politiques publiques visant à réduire les dépenses de santé ces dernières années (avec un objectif de 10 milliards d'euros de réduction en 2015-2017 pour la France[55]), **la part des génériques devrait augmenter au cours des prochaines années** (ce qui explique la faible croissance estimée du marché en valeur). À l'horizon 2020, la part des personnes âgées devrait cependant augmenter pour atteindre environ 20 % de la population, ce qui devrait alimenter la demande de manière plus conséquente que pour les pays à démographie plus jeune.

Dispositifs médicaux

Dans le monde

Au niveau mondial, le marché des dispositifs médicaux et des dispositifs de diagnostic *in vitro* est estimé à 290 milliards d'euros en 2014 et devrait atteindre **340 milliards d'euros d'ici 2018, avec un taux de croissance annuel moyen de 4,4 % entre 2011 et 2018**. Près de la moitié du chiffre d'affaires est réalisé par les fabricants nord-américains (soit 45 %) alors que les principaux pays européens cumulent 40,6 % de ce même chiffre. La Chine et le Japon représentent quant à eux 12,2 %.

*Allemagne, Espagne, France, Italie, Royaume-Uni, Suède et Suisse

Figure 3 : Répartition géographique du chiffre d'affaires mondial de l'industrie des dispositifs médicaux en 2011. Source : rapport PIPAME sur les dispositifs médicaux

Ce marché est porté par le **vieillissement de la population mondiale (qui entraîne une augmentation de la demande) ainsi que par les avancées technologiques (qui ont permis de diversifier l'offre**). Au cours des prochaines années, ce marché devrait bénéficier de l'arrivée de dispositifs innovants (capteurs, systèmes bio-embarqués comme les organes artificiels, objets connectés etc.).

Ainsi, par exemple, à **l'horizon 2020, le marché mondial des objets connectés de santé et de bien-être devrait connaître une très forte croissance** pour atteindre près de 117 milliards de dollars[56].

En France

En France, le marché des dispositifs médicaux et des dispositifs de diagnostic *in vitro* était estimé à 19 milliards d'euros en 2011[57], ce qui représente 6,5 % du marché mondial. Le marché français des dispositifs médicaux est considéré comme étant un marché mature du fait d'une population à la fois importante mais aussi vieillissante.

53 – *Orphan Drug Report 2014*, Evaluate Pharma, 2013

54 – *CountryFocus: Healthcare, Regulatory and Reimbursement Landscape – France*, GlobalData, 2015

55 – Bain & Company, Global healthcare private equity report, 2015.

56 – *Big Data in Internet of Things (IoT): Key Trends, Opportunities and Market Forecasts 2015 – 2020*, MaketResearch, Avril 2015

57 – Dispositifs médicaux : diagnostic et potentialités de développement de la filière française dans la concurrence internationale, PIPAME, juin 2011.

Figure 4 : Parts de marché du marché des dispositifs médicaux en France en 2011[58]

L'industrie des dispositifs médicaux, si elle apparaît faiblement structurée de par son importante étendue et sa variété, occupe un **marché qui connaît une croissance significative de l'ordre de 5 % par an[59].** Cette croissance s'explique notamment par un dynamisme important, lié à des cycles d'innovation courts.

Malgré un fort potentiel collaboratif de R&D[60], l'un des **enjeux majeurs pour cette industrie est de renforcer la coopération et l'inter connaissance entre la multitude d'acteurs compris dans cette filière**, des grands groupes aux PME. On y retrouve à titre d'exemple aussi bien des entreprises développant des appareils d'imagerie médicale (Guebert, Animascope, Philips, Toshiba, etc.) que *des start-ups* concevant des applications mobiles (I-Pact, Quintent, AED Map, Bodycap, etc.).

Cosmétiques

Dans le monde

En 2014, le marché mondial des cosmétiques était de 180 milliards d'euros en 2014 (hors savons, hygiène orale, rasoirs et lames), avec un taux de croissance de 3,6 % par rapport à 2013. Un ralentissement de ce secteur est observé depuis 2011, avec un taux de croissance en recul d'un point en 4 ans. Le luxe et les soins dermo-cosmétiques constituent les segments de marché les plus dynamiques, avec des croissances respectives de 5,2 % et 5,1 %[61]. La croissance annuelle moyenne du marché de la cosmétique à l'horizon 2020 est estimée à 4,5 %, et devrait être portée essentiellement par la demande des pays émergents, ainsi que par les produits anti-âges et premium dans les pays matures.

Plus d'un tiers du chiffre d'affaires est réalisé dans la région Asie Pacifique (34,7 %), suivi par l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord avec respectivement 21,8 % et 20,9 %. L'Amérique Latine, l'Europe de l'Est et la zone Afrique-Moyen Orient ferment la marche avec 12,5 %, 7,3 % et 2,8 % du marché respectivement[3].

Figure 5 : Répartition géographique du chiffre d'affaires mondial de l'industrie des cosmétiques 2014 (rapport annuel de L'Oréal 2015)

Analyse des tendances fortes du marché en 2015

■ Produits anti-âge

De 162 milliards de dollars en 2008, l'industrie de la cosmétique anti-âge associée aux actes médicaux ou dermatologiques anti-âge représentait 262 milliards de dollars en 2013[62]. Cette forte croissance est non seulement liée au nombre croissant de consommateurs (évolution démographique, augmentation des classes moyennes, etc.), mais également à l'extension de la gamme de produits aux propriétés anti-âges et au développement de produits ciblant les personnes de 45 ans et plus[63]. Cette tendance devrait perdurer à l'horizon 2020, la croissance annuelle moyenne de ce segment étant estimée à 5-8 %, soit la plus forte croissance attendue pour un produit de type « soins personnels »[64,65].

58 – Dispositifs médicaux : diagnostic et potentialités de développement de la filière française dans la concurrence internationale, PIPAME, juin 2011.

59 – *Dispositifs médicaux, enjeux et opportunités*, BPI France, 2014.

60 – L'étude PIPAME sur le secteur des dispositifs médicaux a ainsi identifié 690 projets de R&D collaboratifs auxquels des laboratoires de recherche publics français participent

61 – *Rapport d'activités 2014*, L'Oréal, 2015

62 – *10 things the anti-aging industry won't tell you*, Market Watch, 2014

63 – *Older consumers not buying into anti-aging skin care*, Skin Inc., 2015

64 – *Specialty Actives presentation at the in-cosmetics conference 2014*, Kline Group, 2014

65 – *Anti-Aging Market : Asia Pacific and rest of the World to emerge as global leaders »*, Transparency Market Research, 2015

■ Pays émergents : un ralentissement de la demande

Depuis le début du XXIe siècle, les industriels historiques de la cosmétique ont augmenté leur présence dans ces marchés pour rapidement devenir incontournables. Chez L'Oréal par exemple, les nouveaux marchés ont représenté 39,6 % du chiffre d'affaires en 2014[66].

Cependant, même si le chiffre d'affaires généré par les marchés émergents a crû de 9 à 10 % en 2014 par rapport à 2013, **la croissance annuelle est pour la première fois depuis 10 ans à un seul chiffre[67].** Ce ralentissement est principalement dû à une transformation économique des marchés émergents majeurs que sont notamment la Chine et le Brésil.

Malgré ce ralentissement, les marchés émergents demeurent les principaux foyers de croissance à l'échelle globale. Sur la période 2013-2018, un accroissement de 20 milliards de dollars de chiffre d'affaires est attendu en Chine et 16 milliards au Brésil, contre 6 milliards aux États-Unis[68]. De plus, l'ouverture progressive du marché iranien, demandeur de cosmétiques et à la réglementation favorable, constitue une forte opportunité pour les acteurs de l'industrie cosmétique, quelle que soit leur taille.

■ Naturalité

Les produits se positionnant comme naturels ou biologiques représentent un segment de marché en croissance à deux chiffres entre 2007 et 2013 pour atteindre un volume de 30 milliards de dollars cette même année[69]. Actuellement, la croissance de ce segment de marché est portée par les pays d'Asie-Pacifique, avec des taux de croissance proche de 15 % sur ce segment, contre environ 6 % dans les pays occidentaux[70].

En France

En France, l'industrie des cosmétiques représente 25 milliards d'euros et occupe le rang de numéro 1 mondial avec 25 % de parts de marché[71]. Le secteur cosmétique est le deuxième plus gros exportateur de l'économie française, avec un excédent commercial d'environ 8,9 milliards d'euros en 2014[72].

PRODUCTION

Médicaments

La France est dotée d'un **important tissu industriel de production pharmaceutique**, structuré autour de 224 sites dont deux tiers sont des sites de laboratoires pharmaceutiques (i.e. 149 sites) et un tiers des sites de sous-traitants pour la fabrication et le conditionnement des médicaments (i.e. 75 sites)[73]. L'environnement industriel est néanmoins hétérogène avec une contribution majeure de quelques acteurs :

■ Les 3 principaux sous-traitants représentent à eux seuls 20 sites de production. En revanche, 31 sous-traitants sur les 44 acteurs recensés n'ont qu'un seul site de production en France.

■ Les laboratoires d'origine française (Sanofi, LFB, Boiron, Ipsen, Servier et Pierre Fabre notamment) contribuent également largement à l'activité industrielle.

Par ailleurs, **le positionnement de la France est fort sur les médicaments chimiques mais est relativement faible sur les biomédicaments et les génériques**. Les besoins de production de lots biotechnologiques commerciaux ou cliniques et l'essor du façonnage ont toutefois été pris en compte par le Comité stratégique des industries de santé (CSIS) en 2009, 2012 et 2013. En effet, la France est particulièrement attentive aux évolutions des métiers par rapport à ses voisins.

Des sites de bioproduction ont également été ouverts ces dernières années, ce qui amène à 40 le nombre de sites de production biologique et biotechnologique, rapprochant la France de ses principaux concurrents à l'échelle mondiale. Parmi ces sites, on pourra citer le projet MabLaunch de Sanofi ou Cell4Cure du LFB, inauguré en septembre 2013.

66 – Rapport d'activités 2014, L'Oréal, 2015

67 – *Beauty Industry Wakeup Call on Emerging Markets*, GCI Magazine, 2015

68 – *The multifaceted evolution of global beauty in-cosmetics*, Euromonitor International, 2014

69 – *Natural trend continues as segment posts double-digit sales growth*, Cosmetics Design-Europe, 2014

70 – *Sales of natural cosmetics boosted by consumer awareness and innovation*, Premium Beauty News, 2014

71 – *La filière cosmétique, une industrie au parfum*, BPI France, 2014

72 – *France : L'industrie cosmétique confirme sa première place mondiale*, Premium Beauty News, 2015

73 – *Médicament : La France veut-elle rester une terre de production industrielle ?*, LEEM ,4 octobre 2012

Médicaments chimiques	Positionnement historique / convention avec l'État favorisant la production en France
Biotechnologies	Virage technologique vers les biotechs mal négocié Peu de sites de bioproduction capables de produire à petite et grande échelle
… dont insuline	Production développée notamment grâce aux sites de Novo Nordisk à Chartres et de Lilly France à Fegersheim
… dont vaccins	Positionnement historique grâce à Sanofi Pasteur Production plus récente avec les sites de Sanofi et GSK
… dont anticorps monoclonaux	Positionnement faible avec seulement quelques entreprises : ProteGenix, CliniSciences, projet MabLaunch
… dont produits dérivés du sang	Positionnement fort grâce aux sites de LFB et d'Octapharma
… dont biosimilaires	Positionnement très faible mais en développement
OTC/ Automédication	Marché peu développé mais ayant un bon potentiel de croissance
Génériques	Positionnement faible dû notamment aux contraintes réglementaires qui ont limité le développement d'une production nationale

Figure 6 : Positionnement de la France sur les principales typologies de médicaments (Alcimed)

Dispositifs médicaux en France

La France compte un tissu industriel conséquent avec près de 1100 acteurs des dispositifs médicaux. Parmi ceux-ci, 820 ont une activité de R&D et/ou de production alors que 259 développent à titre exclusif une activité de commercialisation en France.

La très grande majorité des fabricants implantés sur le territoire français regroupe des entreprises d'origine française (790 entreprises, soit 73 %) alors que la part de filiales est moins importante (285 entreprises, soit 27 %). Les filiales sont principalement d'origine américaine, allemande, suisse et japonaise.

À ces entreprises s'ajoutent également environ 700 sous-traitants et distributeurs.

La segmentation des activités des fabricants implantés en France peut s'effectuer selon les classes de produits développés et/ ou commercialisés. Les fabricants de dispositifs médicaux à usage individuel concentrent ainsi la majorité des activités (63 %), viennent ensuite les fabricants d'équipements médicaux (21 %), les fabricants de dispositifs médicaux de diagnostic *in vitro* (14 %) et les fabricants de dispositifs médicaux utilisables pour l'e-santé (2 %).

Cette segmentation correspond à la répartition de ces classes de produits selon le chiffre d'affaires qu'elles génèrent en France. Il faut cependant relever que la classe des dispositifs de diagnostic *in vitro* concentre les fabricants ayant la plus forte rentabilité par rapport aux autres classes de DM.

Le secteur des dispositifs médicaux en France bénéficie d'un savoir-faire particulier dans la production de produits à forte valeur ajoutée et à fort taux de croissance tels que les implants non actifs (prothèses), les aides techniques (orthopédie et produits de maintien à domicile), les appareils à rayon X, les appareils électromécaniques, le diagnostic *in vitro*[74].

À titre d'exemple, la filière des implants orthopédiques représente en France 10 000 emplois et pèse en terme de fabrication pour un tiers de la production mondiale. La filière française de production de diagnostic *in vitro* est également bien positionnée. Une entreprise française, BioMérieux, est l'un des *leaders* mondiaux du secteur (dans le classement des 100 meilleures entreprises mondiales en 2009) et la France compte une centaine d'entreprises, dont un tiers (33 %) produit directement sur le sol national. En 2013, l'ensemble de ces entreprises productrices ont réalisé en moyenne 85 % de leur chiffre d'affaires à l'export[75].

74 – Dispositifs médicaux : diagnostic et potentialités de développement de la filière française dans la concurrence internationale, PIPAME, juin 2011.

75 – Dispositifs médicaux : diagnostic et potentialités de développement de la filière française dans la concurrence internationale, PIPAME, juin 2011.

Outre ces produits, l'optique médicale représente en France plus de 10 000 salariés avec un chiffre d'affaires de 4,7 milliards d'euros et l'industrie de la fabrication et de la distribution de matériels et matériaux dentaires emploie environ 4 500 personnes dans 130 entreprises, principalement des PME, pour un chiffre d'affaires de 0,9 milliards d'euros[76].

Cosmétiques

La chaîne de valeur de la filière de cosmétique débute des fournisseurs de matières premières pour terminer à la distribution. Entre ces deux extrémités, on retrouve un certain nombre d'intermédiaires, tels que les laboratoires de formulation, les fabricants, les laboratoires d'analyse et de tests, ou encore les fournisseurs d'emballages.

Figure 7 : Chaîne de valeur de la filière cosmétique

Le niveau d'intégration sur cette chaîne dépend de la dimension et de la politique de l'industriel considéré. Ainsi, les tests et analyses de laboratoire sur les ingrédients cosmétiques seront réalisés en propre par les gros fournisseurs et sous-traités par les petits.

En France, l'ensemble de **ce tissu industriel regroupe 1 500 entreprises dont 80 % de PME et représente plus de 150 000 emplois[77]. On y recense environ 400 sites de production, et environ 60 sites de R&D dont 1/3 pour les grands fabricants** (produits ou ingrédients) et façonniers. En comparaison avec l'industrie pharmaceutique, la cosmétique conserve une R&D forte en France avec des investissements majeurs des grands groupes (exemples : construction du plus gros centre d'expertise capillaire mondiale par L'Oréal à Saint-Ouen (93)).

Bien que l'industrie des cosmétiques soit présente sur trois quarts des départements français, 4 régions se distinguent par leur concentration d'acteurs : l'Ile-de-France, le Centre, Rhône-Alpes et PACA.

76 – Données de l'Institut des Métiers et Formations des Industries de Santé

77 – Selon le pôle de compétitivité Cosmetic Valley

Enfin, il est à noter **que 3 entreprises françaises figurent dans le top 12 mondial : L'Oréal, LVMH et Chanel[78].**

Les grandes tendances

TECHNOLOGIQUES

Personnalisation

Il est communément admis qu'à l'horizon 2020 **la médecine personnalisée contribuera à l'évolution du parcours de soin du patient**, en permettant par exemple d'éviter les traitements inefficaces ou de limiter les effets secondaires potentiels des traitements.

Dans la lutte contre les maladies les plus prévalentes, 38 à 75 % des patients ne répondent pas aux traitements administrés[79]. En permettant d'identifier les patients qui répondront à un traitement donné, la médecine personnalisée devrait se montrer plus efficiente que celle qui utilise des traitements standards prescrits à une population dans son ensemble.

Par ailleurs**, la sécurité médicamenteuse est une problématique critique**, tant pour les patients que pour la société. En Europe, environ 5 % des admissions à l'hôpital sont liées à des effets indésirables de traitement, auxquels sont également associées plus de 200 000 morts chaque année[80]. Beaucoup des effets indésirables, identifiés grâce au système obligatoire de pharmacovigilance en France et alimentant la base de données européenne du médicament EudraVigilance, créée par l'European Medicines Agency, sont causés par des modifications génétiques au niveau des enzymes du métabolisme des patients. Un des objectifs de la médecine personnalisée est d'identifier ces mutations

78 – *Revenue of the leading 10 beauty manufacturers worldwide*, Statista

79 – *Personalized medicine spurred by Medico's Gene testing*, Carey, John, Businessweek, 2010

80 – Phillips, Kathrin A., et al. *Potential role of pharmacogenomics in reducing adverse drug reactions: a systematic review*, JAMA, 14 Nov 2011, 286 (18).

et donc d'optimiser la prescription et le dosage des médicaments chez les patients. Cela permettra de minimiser, voire éviter, les effets indésirables.

De plus, la **médecine personnalisée permettra de réduire les coûts et les temps de développement des médicaments**, en autorisant les chercheurs à sélectionner les populations de patients les plus appropriées. En effet, les tests génétiques pourraient être utilisés dans les étapes amont de développement, afin d'identifier des candidats médicaments de meilleure qualité, de cribler les cibles potentielles et de valider des approches plus rapidement dans le processus de développement. La médecine personnalisée devrait également permettre de diminuer le nombre de patients à inclure dans les essais cliniques. Elle permettra en effet de mieux cibler l'échantillonnage et d'augmenter la qualité des données entrant dans les statistiques[81].

Pour ce faire, **les avancées en séquençage du génome sont essentielles**. Les évolutions techniques de ces dernières années permettent de préciser les techniques de sélection de patients parmi de grands ensembles de populations. La médecine personnalisée du futur permettra d'appliquer une médication efficace pour une maladie spécifique grâce à la connaissance du génome du patient.

Le **développement des technologies du *Big Data*** est également important pour la médecine personnalisée puisque celle-ci intègre un ensemble de données relatives à un patient ou à un ensemble de patients (données génétiques, physiques, sociales susceptibles d'influencer l'état de santé, etc.). L'enjeu est de pouvoir analyser ce grand nombre de données pour les valoriser à des fins médicales. L'utilisation de ces données peut servir à la **modélisation numérique,** qui a pour objectif de créer des modèles personnalisés, adaptés à l'anatomie et la physiologie d'un patient afin de fournir des informations cliniques qui lui sont propres. La modélisation fonctionnelle des systèmes du corps humain fait à ce jour l'objet de nombreux travaux. Des modèles numériques de la fonction cardiaque sont déjà disponibles et demain, ce sont par exemple des modèles du cerveau qui pourront servir la médecine personnalisée.

81 – *The promises of personalized medicine and the challenges ahead*, Persomed, 2014

L'industrie de la cosmétique est également touchée par cette demande de personnalisation. L'accès croissant aux produits cosmétiques de personnes d'origines ethniques différentes appelle les industriels à proposer une offre adaptée à la typologie (de peau, de cheveux, …) de chacun. Cette dynamique concerne non seulement les pays émergents, mais également les pays développés, où l'augmentation en proportion des « minorités ethniques » (y compris par brassage) représente un vivier croissant de personnes à satisfaire[82,83]. Au-delà des questions ethniques, une demande croissante de recommandation et de personnalisation des produits cosmétiques existe. En effet, les consommateurs sont de plus en plus informés, connectés et demandent qu'on les guide avec expertise sur les produits qui leur sont les plus adaptés[84].

Sophistication des dispositifs médicaux et cosmétiques

Industrie de la santé

Ces dernières années, l'innovation s'est intensifiée dans les secteurs des dispositifs médicaux et des DM-DIV, matérialisée tant par des améliorations graduelles apportées au dispositif en général 18 à 24 mois après sa mise sur le marché que par des ruptures technologiques. **À l'horizon 2020 de nouvelles innovations sont à prévoir, qui devraient bousculer le paysage de la santé**.

Les progrès scientifiques et technologiques accomplis par exemple dans les domaines des produits associant un dispositif à un médicament, de l'ingénierie tissulaire, des technologies de l'information et de la communication (TIC), des nanosciences ou encore de la génétique et de la médecine personnalisée **ouvrent de nouvelles perspectives d'amélioration des soins de santé**.[85]

Les compétences nécessaires à l'innovation dans les dispositifs médicaux se situent de plus au croisement

82 – En 2040, plus de la moitié de la population américaine sera d'origine hispanique, asiatique, afro-américaine ou métisse selon Kline & Company.

83 – *Boundaries between mainstream and multicultural beauty brands to blur*, Premium Beauty News, 2014

84 – *Rapport d'activité 2014*, L'Oréal, 2015

85 – *Des dispositifs médicaux et des dispositifs médicaux de diagnostic in vitro sûrs, efficaces et innovants dans l'intérêt des patients, des consommateurs et des professionnels de la santé* Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions, 2012

des compétences des industries pharmaceutique, de l'électronique, des biotechnologies, de la mécanique et de l'informatique. Cette **multidisciplinarité est un des facteurs favorisant l'innovation dans le domaine des dispositifs médicaux qui se distingue ainsi du domaine pharmaceutique**. Les avancées de la chirurgie du dos où sont couplées prothèses et biothérapies sont un exemple d'innovation en santé induite par la convergence de différentes technologies.

L'innovation dans les secteurs des DM et des DMDIV est **particulièrement rapide et importante au regard des attentes sociétales et des enjeux de santé publique. Elle concerne également les** dispositifs de prévention des maladies et/ou de diagnostic précoce**. Ces innovations nécessitent une amélioration permanente des compétences, notamment des équipes utilisatrices, et créent paradoxalement une plus grande dépendance des professionnels de santé à leur égard. Elles permettent par ailleurs de créer des emplois**. Les technologies de santé en ligne (télémédecine, technologies d'assistance, etc.) qui se rapportent aux DM et DMDIV ouvrent ainsi de nouvelles possibilités de suivi ou traitement de patients à distance et permettent de réduire le nombre d'hospitalisations, et donc de potentiellement réaliser des économies financières.

Enfin, le nombre de dispositifs médicaux est amené à augmenter à l'horizon 2020 avec le développement d'objets connectés de santé plus fiables sur les mesures (améliorations des capteurs), sur la sécurité des données comme sur leur valorisation (récupération des données pertinentes pour la décision médicale).

Industrie cosmétique

Au sein des pays développés, les appareils de soin à domicile connaissent depuis quelques années une croissance sans précédent. Ce succès s'appuie sur le vieillissement de la population associé à une prise de conscience de l'efficacité de ces dispositifs pour des applications de type soins de la peau et des cheveux, ainsi que sur l'existence de produits pour tous les budgets. Ces appareils sont destinés à être utilisés en tant que tel ou conjointement à un produit cosmétique pour en accroître les performances[86].

Le marché global de ces appareils de soin est estimé à plus de 19 milliards de dollars en 2014, et une croissance annuelle moyenne de 18,7 % est attendue entre 2014 et 2020 pour atteindre un marché de plus de 50 milliards de dollars cette même année[87].

INDUSTRIELLES

Concentration et internationalisation des entreprises

Industrie de la santé

Les industries du médicament et des dispositifs médicaux tendent à se concentrer avec une réduction importante du nombre de sociétés sur le marché. Il s'agit d'une tendance observée depuis près de 40 ans pour l'industrie du médicament mais beaucoup plus récente pour l'industrie des dispositifs médicaux. Ainsi, depuis le début des années 1990, le nombre d'entreprises du médicament a été réduit de près de 30 % malgré la création dynamique de sociétés sur des segments comme les biotechnologies médicales par exemple.

Figure 8 : Évolution du nombre d'entreprises de l'industrie pharmaceutique en France de 1970 à 2013 selon le LEEM

Cette réalité s'observe à la fois aux niveaux français et mondial avec des rapprochements forts entre acteurs depuis 10 ans et l'acquisition fréquente de sociétés de biotechnologies par les *leaders* de l'industrie pharmaceutique.

Les rapprochements des grands groupes mondiaux (implantation géographique stratégique des entreprises, regroupement des entreprises par domaine d'intérêt thérapeutique, etc.) ont pour but de leur

86 – Selon la FEBEA (Fédération des Entreprises de la Beauté)

87 – Global Market Study on Beauty Devices: Asia to Witness Highest Growth by 2020, Persistence Market Research, 2015

permettre d'atteindre une taille critique afin de réaliser des économies d'échelle eu égard aux coûts de recherche, d'avoir une plus forte présence sur les marchés et de faire face à la pression exercée sur les prix des médicaments par les pouvoirs publics. Les fusions-acquisitions dans le secteur du médicament ont également pour objectif l'acquisition de nouvelles technologies, l'introduction dans un nouveau domaine thérapeutique ou sur un nouveau segment, l'acquisition d'une force de vente ou de distribution, l'implantation dans un pays étranger ou sur un continent[88].

En ce qui concerne les dispositifs médicaux, la tendance de l'industrie mondiale depuis 2014-2015 est également à la consolidation et aux stratégies de fusions-acquisitions parmi les principaux producteurs, notamment pour renforcer leur portfolio et toucher les marchés émergents. Deux autres grandes tendances se sont confirmées également en 2014-2015 : l'entrée sur le marché de concurrents dans les domaines de l'IT et de la production de biens de consommations et une évolution de l'innovation vers l'itération[89]. Dans une filière peu structurée en France, l'avenir du secteur passe ainsi par des collaborations entre grands groupes et PME et par des consolidations entre les différents acteurs[90].

Industrie cosmétique

Contrairement à l'industrie de la santé, la filière cosmétique est très découpée et composée de TPE et PME pointues et autonomes par rapport à des grands groupes. Au sein de l'industrie cosmétique, les fusions ou acquisitions majeures entre grandes entreprises de l'industrie, telle que le rapprochement en 2015 pour 10 milliards d'euros entre Coty[91] et 43 marques de cosmétiques de P&G, sont occasionnelles.

De manière plus fréquente, des partenariats ou fusions sont réalisés dans le cadre d'une stratégie d'expansion au sein des pays émergents afin d'y acquérir un relais de distribution, un savoir-faire ou une customisation locale à travers une marque dédiée séparée de la maison-mère.

En France, le marché reste peu concentré, puisque seules 20 % des 1 500 entreprises de l'industrie des cosmétiques ont une taille supérieure à celle d'une ETI.

Open-innovation

L'open-innovation est un *business model* utilisant à la fois les idées internes et les idées externes pour générer de la valeur et de l'innovation. Ce *business model* est adopté par les entreprises pharmaceutiques afin de faire face aux dépenses croissantes de R&D et à la diminution du nombre de nouveaux médicaments effectivement lancés sur le marché. Le développement de ce *business model* est notamment favorisé par la complexité croissante du secteur, l'arrivée de nouvelles technologies, la disponibilité d'experts hautement qualifiés externes à l'entreprise, ainsi que par la pression croissante sur les coûts et les délais de développement[92].

La R&D au sein de l'industrie des cosmétiques est historiquement fermée aux acteurs extérieurs à l'entreprise. C'est pourquoi, hormis des initiatives de grands leaders industriels, l'open innovation au sein de l'industrie cosmétique est un phénomène nouveau qui s'appuie sur une dynamique insufflée par les pôles de compétitivité. Ainsi, au sein de la Cosmetic Valley, le plus grand pôle de compétitivité français et mondial en matière de parfumerie et cosmétiques (voir chapitre « écosystèmes de l'innovation »), plus de 140 projets de recherche collaboratifs entre PME et universités ont été labellisés. Ce même pôle stimule les collaborations à travers différentes initiatives telles que des rencontres entres TPE/PME innovantes et grands groupes (Chanel, Johnson & Johnson, LVMH Recherche, Shiseido, L'Oréal, …) lors du salon mondial de l'innovation en cosmétiques « *Cosmetic 360* »[93].

D'USAGE

Santé connectée

La santé connectée ou e-santé, termes derrière lesquels se cachent l'usage de technologies numériques et leur mise en réseau, est en passe de **révolutionner la prise en charge de la santé.**

88 – Chiffres du *LEEM*.

89 – Medical Device Corporate Strategy & Business Development Conference, Cipher, mars 2015

90 – BPI France, rencontre stratégique des acteurs du secteur des dispositifs médicaux, 2015

91 – Coty est une société américaine majeure des cosmétiques et parfums avec un chiffre d'affaires en 2014 de 4,5 milliards d'euros.

92 – Schuhmacher A., et al. *Models for open innovation in the pharmaceutical industry*. 2013, Reutlingen University, Germany.

93 – *Cosmetic Valley renforce l'open-innovation en parfumerie cosmétique*, Biotech Info, 2015

La santé connectée recouvre **les pratiques médicales et de santé publique** reposant sur **des dispositifs communicants** tels que des téléphones portables, des systèmes de surveillance des patients (qui peuvent prendre la forme de dispositifs bio-embarqués ou de capteurs), des assistants numériques personnels et d'autres appareils sans fils[94]. Elle inclut également les systèmes de conseil personnalisés, les informations de santé et rappels de prise de médicament envoyés par SMS, et **la télémédecine pratique** par communication sans fil[95].

De la télémédecine (systèmes « Picture archiving and communication system » PACS), aux dossiers patients numériques (Dossier Médical Personnel, etc.) en passant par les applications mobiles, les technologies de la santé connectée vont permettre de répondre à un grand nombre d'enjeux de la médecine de demain tout en bouleversant l'organisation des systèmes de soins :

- ***Elles favorisent le maintien à domicile*** des personnes *via* par exemple leurs applications en médecine ambulatoire et en télémédecine. Cet aspect est particulièrement important à l'horizon 2020 puisqu'il permettra de répondre non seulement à des enjeux économiques (meilleure gestion des coûts) mais aussi de prise en charge de la santé dans un contexte de vieillissement des populations et de croissance de la demande de soins. Le maintien à domicile impliquera un changement important pour l'organisation des systèmes de soins de demain ;

- ***Elles permettent de resserrer les liens entre médecine de ville et hôpital et de constituer une solution aux enjeux de décloisonnement des systèmes de santé.*** Les réseaux permis par le développement de nouveaux outils relevant des TIC comme les systèmes d'information et dossiers médicaux informatisés sont en effet essentiels dans l'organisation d'interface entre médecine de ville et hôpital[96].

Le marché des applications et des objets connectés de santé connait de fait une croissance exponentielle, en raison de l'attente sociétale d'avoir des services de santé de plus en plus accessibles. Dans son livre vert[97], la Commission européenne retient essentiellement trois bénéfices potentiels en termes de soins : **prévention accrue et meilleure qualité de vie, systèmes de santé plus efficients et plus durables, patients plus responsables**. Les outils de la santé connectée contribuent essentiellement à l'éducation à la santé en complétant, voire en améliorant, l'accès aux services déjà disponibles en ligne. De même, en facilitant la consultation de bases de données et la communication entre professionnels de santé, les outils de santé mobile représentent de véritables assistants en situation d'exercice médical ou paramédical.

La santé connectée n'est cependant pas exempte de risques qui doivent être pris en compte dans son développement à l'horizon 2020. Ces risques portent sur la protection des données (données personnelles, données de santé) et la confidentialité, sur le défaut de validation clinique pour une solution qui s'apparenterait à un DM, sur le dysfonctionnement des produits et des logiciels, sur le manque de fiabilité des mesures et des analyses, et la vulnérabilité et les failles de sécurité des produits et logiciels[98].

La modification des habitudes et des usages des professionnels de santé comme des usagers est un processus long qui nécessite une réelle « **éducation au numérique »**[99], des efforts de communication importants et une sensibilisation aux enjeux.

Produits premium

Au sein de l'industrie cosmétique, l'une des tendances majeures qui s'est accélérée ces dernières années est la demande des consommateurs pour des produits luxueux ou « premium » accessibles à tous. Cela a donné naissance à différents types de produits :

- Des produits de beauté utilisables à domicile mais inspirés de salons tels que des appareils d'applications topiques ou encore des masques (notamment en Asie) ;

94 – *mHealth: New horizons for health through mobile technologies,* Global Observatory for eHealth series – Volume 3, p6, 2011.

95 – *Livre vert sur la santé mobile*, Commission européenne. Avril 2014

96 – Christian BOURRET, Les réseaux de santé ou la rencontre de la santé et des TIC pour décloisonner le système de santé français, Tic et Santé, Vol. 2, n°1, 2008.

97 – *Ibid.*

98 – *SANTÉ CONNECTÉE- Le Livre Blanc*, Conseil national de l'Ordre des médecins. Janvier 2015

99 – Eric Peres, *Les données numériques : un enjeu d'éducation et de citoyenneté*, Les avis du Conseil Economique, Social et Environnemental, Janvier 2015.

■ Des produits naturels et organiques qui utilisent des ingrédients plus nobles que des produits de synthèse.

Par ailleurs, les marques de luxe historiques connaissent également des taux de croissance supérieurs au marché des cosmétiques global, mais observent des disparités régionales. Ainsi, entre 2012 et 2013, les marchés majeurs tels que le Brésil, l'Indonésie, l'Inde, la Chine ou encore les États-Unis ont connu une croissance des produits premium supérieurs à ceux de masse.

Entre 2013 et 2018, des taux de croissance annuels pour ces produits supérieurs à 10 % sont attendus en Chine, Indonésie et Inde, contre 3 à 4 % en moyenne pour le monde sur la même période[100].

La position de la France

INDUSTRIELLE

Médicaments

L'industrie du médicament en France emploie 100 968 personnes en direct et 190 395 en emplois induits[101]. En comparaison, elle emploie 700 000 personnes en Europe, générant 3 à 4 fois plus d'emplois induits[102], et 810 000 emplois aux États-Unis, soutenant 3,4 millions d'emplois induits[103].

La part de la France dans le marché mondial du médicament était de 4,4 % en 2013. La France est **également l'un des principaux fabricants de médicaments au niveau international**. Ainsi, elle **se situe en 6e position européenne** derrière la Suisse, l'Allemagne, l'Italie, le Royaume-Uni et l'Irlande. Ces résultats sont, selon le LEEM, relativement fragiles face à concurrence de plus en plus marquée de l'Irlande et de la Belgique.

Figure 9 : Principaux pays producteurs de médicaments en Europe, en Mds€ (EFPIA)

Sur un marché peu concentré, **Sanofi, *leader* français du médicament,** est la 3e entreprise mondiale du secteur avec un chiffre d'affaires de 33,77 milliards d'euros en 2013, soit 4,4 % du marché mondial. **La France ne dispose pas d'autres acteurs de cette envergure mais de plusieurs « *middle pharmas* »** telles que Servier, Ipsen ou Pierre Fabre, qui disposent d'une forte capacité de R&D et d'un savoir-faire reconnu.

En comparaison du nombre d'implantations d'entreprises britanniques, allemandes ou suisses, les implantations françaises dans les plus grands marchés du monde, en particulier les États-Unis et le Japon, ont progressé significativement, mais elles restent faibles. D'après le LEEM, le contrôle des prix des produits et la faible rentabilité en France n'ont pas été favorables à l'internationalisation des groupes d'origine française. Toutefois, les produits d'origine française ont pénétré les marchés américain et japonais en raison des produits confiés en licence.

Dispositifs médicaux

L'industrie des dispositifs médicaux en Europe emploie **environ 575 000 personnes**[104] **dont environ 65 000 en France**[105]. En comparaison, l'industrie emploie environ 520 000 personnes aux États-Unis. Les États-Unis figurent d'ailleurs avec l'Allemagne et le Japon parmi les pays possédant l'industrie des dispositifs médicaux la plus dynamique. L'industrie française des dispositifs médicaux se positionne quant à elle au même rang que celle du Royaume-Uni.

100 – *The multifaceted evolution of global beauty in-cosmetics 2014*, Euromonitor International, 2014

101 – Les entreprises du médicament en France : bilan économique, LEEM, édition 2014

102 – Données EFPIA, 2012

103 – Données PhRMA

104 – Données Eucomed sur l'emploi dans le secteur des dispositifs médicaux en Europe

105 – Données SNITEM sur l'emploi dans le secteur des dispositifs médicaux en France

Les dispositifs médicaux en France composent un tissu industriel de près de 1 100 entreprises qui représentent un effectif de 65 000 emplois uniquement consacrés aux activités de R&D et de production. Le secteur est composé à 94 % de PME (moins de 250 salariés), dont 45 % de TPE (moins de 20 salariés). Cette proportion élevée de PME s'explique par la présence de marchés « de niche » sur ce secteur. Le principal groupe industriel d'origine française de plus de 5 000 salariés est Air Liquide Santé et 16 ETI d'origine française sont dédiées à plus de 50 % aux dispositifs médicaux. Quelques start-up françaises telles que Pixium Vision, Carmat, CorWave, Withings, etc. se spécialisent dans le développement de technologiques de rupture sur le marché des dispositifs médicaux.[106] Le secteur reste largement dominé par les grands groupes américains et allemands : parmi les 30 plus grandes entreprises produisant des dispositifs médicaux, les 2/3 ont ainsi leur maison mère aux États-Unis et aucune en France.

Le secteur français du diagnostic *in vitro* regroupe quant à lui environ 100 entreprises telles que BioMérieux, Stago ou Theradiag. Ces entreprises représentent 12 000 emplois directs dont 16 % en R&D et 28 % en production. 90 % de ces entreprises sont des PME.

Au niveau national, un écosystème technologique, scientifique et clinique permet d'accompagner de manière significative le développement des DM et ce malgré l'absence notable de clusters dédiés à la filière alors qu'ils sont présents dans les pays *leaders* comme la Suisse ou les États-Unis.

Cosmétiques

L'industrie de la cosmétique en Europe emploie de manière directe ou indirecte 1 500 000 personnes, dont 150 000 en France[107]**.** La France est le leader mondial de ce secteur avec 1 500 entreprises impliquées qui génèrent plus de 25 milliards d'euros de chiffre d'affaires[108]. La France est également l'un des principaux pays exportateurs de cosmétiques (1er en Europe), avec 10,6 milliards d'euros de biens exportés en 2013. En comparaison, les exportations de l'Allemagne, au deuxième rang européen, ont représenté 6,8 milliards d'euros cette même année[109]**.**

Les principaux acteurs en France en 2014 sont :

- L'Oréal : 22,53 milliards d'euros de chiffre d'affaires (n°1 France, n°1 monde) ;
- Chanel : 4,7 milliards d'euros de chiffre d'affaires (n°2 France, n°9 monde) ;
- LVMH : 4 milliards d'euros de chiffre d'affaires (n°3 France, n°11 monde).

ACADÉMIQUE ET ÉCOSYSTÈME DE L'INNOVATION

Industrie de la santé

Recherche : les groupes pharmaceutiques éprouvent des difficultés pour trouver de nouvelles molécules et sont tenus de **réduire significativement leurs capacités de recherches**, comme Sanofi et Pierre Fabre l'ont récemment fait en France. En conséquence, **les acteurs académiques** (INSERM, CNRS, AP-HP, Universités, Institut Pasteur, CEA, Genopole, **etc.) deviennent progressivement des acteurs incontournables du développement de nouveaux médicaments et de nouvelles technologies pour la santé**. Les Rencontres internationales de recherche (RIR), organisées chaque année en France pour valoriser le potentiel de la recherche académique française dans les sciences de la vie, sont saluées par l'industrie pharmaceutique mondiale comme une excellente initiative.

Dans le domaine des dispositifs médicaux la France **jouit d'une position d'excellence en matière de recherche, notamment sur le segment de l'imagerie médicale**. En 2013, plus de 1 100 chercheurs statutaires et 650 doctorants et post-doctorants travaillaient au développement technologique dans le secteur de l'imagerie médicale, principalement structuré autour de six grands pôles régionaux : Île-de-France, Rhône-Alpes, Aquitaine, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Alsace et Bretagne.

Autre indicateur de ce dynamisme académique : le nombre important de structures ou initiatives en imagerie médicale financées par le programme des

106 – Sofinnova, mars 2014

107 – *Rapport Annuel 2013*, Cosmetics Europe, 2014

108 – D'après Cosmetic Valley

109 – *Rapport Annuel 2013*, Cosmetics Europe, 2014

investissements d'avenir : 4 IHU, 1 IRT, 16 Equipex, 11 LabEx et 2 Infrastructures nationales en biologie et santé.

Au-delà de la recherche fondamentale et appliquée, la France dispose par ailleurs d'une recherche clinique dense organisée en réseau. Les études cliniques sont facilitées par la structuration de 53 Centres d'Investigation Clinique (CIC), au sein des CHU. Ces CIC constituent le réseau national F-CRIN (*French Clinical Research Infrastructure Network*), participation française au réseau européen E-CRIN (*European Clinical Research Infrastructures Network*).Les entreprises de biotechnologies (biotechs) et de technologies médicales (medtechs) jouent par ailleurs un rôle important au sein de l'écosystème de l'innovation français. Selon le Panorama France Biotech/Ernst&Young 2012, la France est ainsi le deuxième acteur économique mondial pour les sciences de la vie avec plus de 1 300 entreprises. Ce sont essentiellement des PME et des TPE avec un effectif moyen de 22 personnes. Les entreprises de Biotech et de Medtech ont pour objectif de développer des produits à partir de recherches fondamentales et sont de ce fait des acteurs directs de la valorisation de la recherche française.

La recherche en santé s'appuie sur un réseau de laboratoires de référence, d'alliances et Consortium de Valorisation Thématique (CVT) tels qu'AVIESAN, de pôles de compétitivité (Medicen, LyonBiopole, Systematic, CapDigitial, etc.) et d'instituts Carnot, ainsi que sur les 30 Centres Hospitaliers Universitaires et les 2 Centres Hospitaliers Régionaux que compte le territoire français.

Investissements : cette excellence est accompagnée dans le cadre des Investissements d'Avenir, la biologie et la santé constituant l'une des thématiques phares avec **2,5 milliards d'euros de financements dédiés** à une centaine de structures :

- 45 Laboratoires d'excellence (LabEx) en biologie et santé répartis sur 86 sites (vagues 1 et 2) ;
- 24 Équipements d'excellence (Equipex) en biologie et santé répartis sur 32 sites (vagues 1 et 2) ;
- 6 IHU (ICAN, Imagine, A-ICM, Mix-Surg, POLMIT, LYRIC);
- 3 démonstrateurs en biotechnologies et santé (MGP, CIMTECH, PGT) répartis sur 7 sites,
- 16 infrastructures nationales en biologie et santé spécifiquement dédiées aux applications de santé réparties sur 39 sites et telles que métaboHub, Profi, FBI ou Biobanques ;
- 1 IRT, Bioaster, en infectiologie, réparti sur deux sites.

Figure 10 : Sites des structures recevant des financements dans le cadre des Investissements d'Avenir (*Source : Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche*)

Outre les **investissements publics français**, qui s'intéressent de plus en plus aux technologies médicales et à la santé et des financements innovants permettant à des start-up françaises d'obtenir des financements pour des collaborations, les entreprises bénéficient également de **crédits d'impôts** pour leurs activités de R&D réalisées en France[110]. L'Union Européenne (UE) finance également les thématiques de la santé, du bien-être et du vieillissement à hauteur de 7,5 milliards d'euros sur 7 ans dans le cadre du programme **Horizon 2020**[111] et l'initiative européenne **Innovative Medicine Initiative (IMI)** dispose de financements à hauteur de 2 milliards d'euros pour développer les partenariats de recherche public-privés.

En ce qui concerne les **investissements privés en capital-risque** en revanche, l'Europe et la France restent en-deçà des États-Unis: en 2010 les entreprises américaines de capital-risque ont ainsi investi 15 milliards d'euros contre 3,4 milliards pour les entreprises européennes et les investissements en début de croissance représentaient 2,2 million d'euros par entreprise en moyenne aux États-Unis contre 400 000 dans l'UE. Cependant une nouvelle génération d'investisseurs européens commence à se concentrer sur les investissements d'amorçage.[112] En outre, les sciences de la vie sont le premier secteur d'investissement en capital-risque en Europe, comptant pour 37,1 % de ces investissements[113]. Dans le domaine de la santé, au-delà des marchés traditionnels, les investisseurs privés s'intéressent particulièrement aux sociétés de biotechnologies et fabricants d'objets connectés pour le grand public.

110 – Sofinnova, mars 2014

111 – Commission Européenne, factsheet : Horizon 2020 budget, Novembre 2013

112 – H. Tyabji et al., venture capital firms in Europe vs. America : the under performers, *Ivey Business Journal*, mars/avril 2011

113 – European Private Equity and venture Capital Association, données 2013.

En revanche, **même si le secteur français est sain et s'améliore, il tend à se focaliser sur des investissements de croissance, des fusions et acquisitions et des IPO (offre publique initiale) plutôt que sur des investissements d'amorçage et de capital-risque** proprement dits. En conséquence, il y a un écart entre le financement de la R&D et des étapes de transfert de la technologie au démarrage précoce d'une part, et la phase d'expansion commerciale d'autre part, et les start-up françaises sont moins capitalisées que les start-up américaines. En outre, lorsque les entreprises françaises et européens recherchent des financements plus importants, particulièrement les entreprises de biotechnologies, elles ont tendance à partir aux États-Unis.[114]

Industrie cosmétique

La France dispose d'une dynamique de recherche en cosmétique très forte grâce notamment au pôle de compétitivité de 1er rang mondial : Cosmetic Valley. Ce pôle s'étend sur 6 départements allant du Centre à la Haute Normandie. Au total, on y retrouve 550 entreprises, 84 projets R&D, 7 universités, 200 laboratoires publics, 8 600 chercheurs pour 63 000 emplois et 18 milliards d'euros de chiffre d'affaires. Il réunit au sein d'un même réseau tous les métiers et savoir-faire des cosmétiques (hors aromatiques et dans une moindre mesure parfums), faisant ainsi de Cosmetic Valley un écosystème d'innovation de renommée mondiale. Cette entité a pour mission de créer une synergie entre ses membres et d'accroître leur visibilité.

Au-delà de grand noms ou grandes marques tels que Dior, Guerlain, Chanel, Shiseido ou L'Oréal, 80 % des membres de Cosmetic Vallley sont des TPE et PME.

En France se trouvent deux autres centres d'innovation notables en cosmétique et qui complètent le champ de compétences de Cosmetic Valley : le Centre Européen de Dermocosmétologie (CED) en région Rhône-Alpes Lyon (3 500 salariés, 20 entreprises, 250 chercheurs) et le pôle de compétitivité Parfum Arômes Senteurs Saveurs (PASS) dans la région PACA (9 600 salariés, 84 projets R&D labellisés, 155 membres industriels ou académiques)[115].

Par ailleurs, depuis 2015, le CNRS initie pour la première fois une dynamique de recherche autour des cosmétiques. Deux Groupes De Recherche (GDR) dédiés ont ainsi vu le jour : Cosmactifs, focalisé sur les soins de la peau du visage et du corps, et O^3 focalisé sur les problématiques « Odorat, Odeurs et Olfaction ».

114 – Woodside Capital Partners, 2011

115 – Début 2016, PASS est amené à perdre son label « pôle de compétitivité ». Un rapprochement avec Cosmetic Valley est à l'étude.

ANALYSE AFOM DE LA FRANCE

ATOUTS

Constitution du Comité stratégique de filière Industries et technologies de santé.

Important tissu industriel de production pharmaceutique, notamment pour les molécules chimiques (6ème acteur à l'échelle européenne), et premier producteur mondial de cosmétiques.

Présence de Sanofi (3ème entreprise mondiale du secteur de la santé) et plusieurs *middle pharmas* avec une forte capacité de R&D et un savoir-faire reconnu, ainsi que de 3 leaders internationaux de l'industrie des cosmétiques (dont L'Oréal, 1ere entreprise mondiale)

Savoir-faire particulier de PME françaises en cosmétiques et dans la production de dispositifs médicaux à forte valeur ajoutée et à fort taux de croissance (implants non actifs, aides techniques, appareils à rayon X, appareils électromécaniques, diagnostic in vitro, etc.), la production dentaire et optique.

Écosystème académique, hospitalier et de l'innovation dense et bien organisé.

Dynamisme et développement des start-up de biotechnologies et spécialisation de start-up dans les technologies de rupture sur le marché des dispositifs médicaux.

Accessibilité des investissements publics aux laboratoires de recherche, start-up et PME pour la recherche et le transfert de technologies.

FAIBLESSES

Relativement faible niveau d'implantation des entreprises françaises dans les plus grands marchés mondiaux.

Faible niveau de coordination et d'intégration des acteurs de la filière dispositifs médicaux.

Très faible présence internationale des entreprises françaises de dispositifs médicaux.

Faiblesse des investissements en capital-risque par rapport aux États-Unis et difficulté à lever des capitaux significatifs en phase d'amorçage pour les start-up et biotechs françaises qui les exposent à des prises de participation ou des rachats par des firmes internationales ou les incitent à traverser l'Atlantique.

OPPORTUNITÉS

Forte croissance de la demande en matière de santé et du bien-être liée à l'évolution démographique mondiale.

Nombre important de maladies négligées ou rares pour lesquelles aucun traitement n'est encore disponible.

Développement de la médecine personnalisée.

Développement de la santé connectée.

Ouverture de marchés étrangers tels que l'Iran où l'environnement réglementaire vis-à-vis des cosmétiques est favorable.

MENACES

Politique de rationalisation des dépenses publiques de santé et de limitation des remboursements qui est favorable aux génériques et aux biosimilaires et qui ne favorise pas l'innovation et le développement de nouvelles molécules.

Arrivée à expiration des brevets de molécules chimiques et biologiques *blockbusters*.

Risque de disparition ou rachats par des capitaux étrangers de PME à forte croissance sous-capitalisées.

SOURCES

Bilan des règles applicables à la sécurité des dispositifs médicaux et propositions d'amélioration. ANSM. Septembre 2012

Biomédicaments en France : état des lieux 2014. LEEM. Septembre 2014

Boundaries between mainstream and multicultural beauty brands to blur, Premium Beauty News, 2014

China proposes tighter cosmetics standards, Chemical Watch, 2015

Challenging growth in the luxury and cosmetics sector, EY, 2014

Cosmetic Valley renforce l'open-innovation en parfumerie cosmétique, Biotech Info, 2015

Des dispositifs médicaux et des dispositifs médicaux de diagnostic in vitro sûrs, efficaces et innovants dans l'intérêt des patients, des consommateurs et des professionnels de la santé Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, 2012.

Dispositifs médicaux : diagnostic et potentialités de développement de la filière française dans la concurrence internationale, Ministère de l'économie des finances et de l'industrie / PIPAME, 2011

Dispositifs médicaux : enjeux et opportunités. BPI France. 2014

European IDV Market Statistics, The European Diagnostic Manufacturers Association (EDMA). 2013

European Union Bans Hundreds of Drugs Over Clinical Trial Studies, WSJ, 27 Juillet 2015

Expansion and Challenges Ahead for Emerging Markets: Growth in Natural Skin Care, Cosmetic & Toiletries, 2015

Factsheet : Horizon 2020 budget. Commission Européenne. Novembre 2013

Finding Value in Europe – Executive insights, L.E.K, 2013

Global & USA Cancer Immunotherapy Market Analysis to 2020. Research and markets. Avril 2015

Global Beauty Care Market (2014-2018), Gyan Research and Analytics Pvt. Ltd., 2014

Global Cell Therapy Market 2015-2020 – Technologies, Markets and Companies. Research and Markets. Mai 2015.

Global Gene Therapy Market & Pipeline Insight Report 2014. Research and Markets. Octobre 2014.

Global healthcare private equity report. Bain & Company. 2015

Global Market Study on Beauty Devices: Asia to Witness Highest Growth by 2020, Persistence Market Research, 2015

Imagerie médicale du futur, Ministère du Redressement Productif / PIPAME, 2013

L'économie du médicament : marché mondial. LEEM. 2014

La filière cosmétique, une industrie au parfum, BPI France, 2014

Le marché français des biosimilaires : pertes de brevets, substitution, nouveaux entrants : quels enjeux et perspectives à l'horizon 2016. Étude Xerfi. 2014

Les cosmétiques naturels bénéficient de la demande éthique dans les pays nordiques, Premium Beauty News, 2015

Les entreprises du médicament en France – Bilan Économique. LEEM, 2014 *L'industrie du Diagnostic in vitro édition 2014*, SIDIV, 2014*Médicaments biosimilaires : état des lieux.* ANSM. Septembre 2013

Livre vert sur la santé mobile. Commission Européenne. Avril 2014

Natural trend continues as segment posts double-digit sales growth, Cosmetics Design-Europe, 2014

Neal B., et al., *Managing the global burden of cardiovascular disease*, European Heart Journal Suppléments (2002) 4 (Supplément F), F2-F6.

Medical Device Corporate Strategy & Business Development Conference. Cipher. Mars 2015

Médicament : La France veut-elle rester une terre de production industrielle ? LEEM. 4 octobre 2012

mHealth: New horizons for health through mobile technologies, Global Observatory for eHealth series – Volume 3, p6, 2011.

Schuhmacher A., et al. *Models for open innovation in the pharmaceutical industry*. 2013, Reutlingen University, Germany.

Orphan Drug Report 2014. Evaluate Pharma. 2014

Pacte pour la compétitivité de l'industrie Française, rapport au Premier ministre : Louis Gallois, 2012.

Panorama de la santé 2013 : Les indicateurs de l'OCDE, Éditions OCDE. 2013

Parcours du dispositif médical. HAS. 2009 (actualisation : 2013)

Personalized medicine spurred by Medico's Gene testing, Carey, John, Businessweek, 2010

Perspectives du marché mondial des produits biosimilaires, focus spécifique sur le marché français. Smart Pharma Consulting. février 2015

Phillips, Kathrin A., et al. *Potential role of pharmacogenomics in reducing adverse drug reactions: a systematic review,* JAMA, 14 Nov 2011, 286 (18).

Rapport de la Commission Innovation 2030, remis à l'Elysée le 11 octobre 2013.

Règlementation des produits cosmétiques, Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des produits de santé, 2014

Rencontre stratégique des acteurs du secteur des dispositifs médicaux. BPI France. 2015

Revenue of the leading 10 beauty manufacturers worldwide, Statista

Sales of natural cosmetics boosted by consumer awareness and innovation, Premium Beauty News, 2014

Santé connectée – le livre blanc. Conseil national de l'ordre des médecins. Janvier 2015

Searching for Terra Firma in the Biosimilars and Non-Original Biologics. IMS Health. 2013

The Future of Tissue Engineering and Cell Therapy to 2025. Smithers Apex. Février 2015

The multifaceted evolution of global beauty in-cosmetics 2014, Euromonitor International, 2014

The promises of personalized medicine and the challenges ahead. Persomed. 2014

Turbulence in Emerging Markets but beauty will prevail, GCI Magazine, 2014

Tyabji H., et al., *Venture capital firms in Europe vs. America : the under performers,* Ivey Business Journal, mars/avril 2011.

Wireless Devices Market. Markets&markets. Décembre 2014

World Cancer Report 2014. IARC. 2014

World Preview 2018 - A Consensus View of the Medical Device and Diagnostic Industry. Evaluate MedTech, 2012

GLOSSAIRE

AMM : Autorisation de mise sur le marché

ANSM : Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé

ASA : Amélioration du service attendu

ASMR : Amélioration du service médical rendu

ASR : Amélioration du service rendu

CEPS : Comité économique des produits de santé

CIC : Centre d'Investigation Clinique

CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor

CNEDiMTS : Commission nationale d'évaluation des dispositifs médicaux et technologies de santé

CSP : Code de la santé publique

CVT : Consortium de valorisation thématique

DM : Dispositif médical

DM-DIV : Dispositif médical de diagnostic *in vitro*

EFPIA : European Federation of Pharmaceutical Industries and Associations

EMA : European Medicine Agency

Equipex : Équipements d'excellence

EUCOMED : Syndicat européen des fabricants de dispositifs médicaux

FEBEA : Fédération des Entreprises de la Beauté

GHS : Groupes homogènes de séjours

HAS : Haute Autorité de Santé

IHU : Institut Hospitalo-Universitaire

IRM : Imagerie par Résonnance Magnétique

IRT : Institut de recherche technologique

LabEx : Laboratoires d'excellence

LEEM : Syndicat Les Entreprises du Médicament

LPPR : Liste des produits et des prestations remboursables

PACS : Picture archiving and communication system

PASS : Pôle de Compétitivité Parfums Arômes Senteurs Saveurs

PIPAME : Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques

R&D : Recherche et développement

SA : Service attendu

SMR : Service médical rendu

SNITEM : Syndicat National de l'Industrie des Technologies Médicales

T2A : Tarification à l'acte

© Egidium Technologies

SÉCURITÉ

Définition

La sécurité couvre l'ensemble des champs de la prévention et de la protection face aux risques, qu'ils soient naturels, technologiques, ou sanitaires (biosécurité) ainsi que les « cyber-risques » (piratage informatique, protection des données personnelles, des données stratégiques ou sensibles). Cela inclut la protection directe des populations d'une part, et la sécurité en matière d'infrastructures et de services d'autre part. Sont donc comprises au sein du concept de sécurité la sécurité intérieure, c'est-à-dire la surveillance des frontières, la gestion des crises et la sécurité individuelle et privée (protection des données personnelles, protection contre la criminalité, protection des entreprises et des individus). L'augmentation de la connectivité au sein de notre société fait des risques numériques un enjeu croissant en termes de sécurité. De fait, la prévention des risques naturels et le marché de la sécurité civile restent un des segments majeurs du domaine, mais les enjeux stratégiques et de développement se concentrent davantage autour des questions de cybersécurité.

Les enjeux liés à la défense ne seront traités ici que dans leurs liens avec la sécurité civile. Les technologies et enjeux militaires ne seront abordés que dans la mesure où la frontière entre civil et militaire s'avère poreuse, en particulier dans le cas des transferts de technologies.

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / Transversale
1	Matériaux avancés et actifs	Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données massives	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique	Transversale
5	Internet des objets	Transversale
6	Infrastructures de 5ème génération	Transversale
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs	Transversale
10	Cobotique et humain augmenté	Transversale
11	Intelligence artificielle	Transversale
12	Robotique autonome	Transversale
13	Communications sécurisées	Transversale
19	Analyse comportementale	Transversale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel	Transversale
21	Supercalculateurs	Transversale
34	Authentification forte	Spécifique

Les grands enjeux et les stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

L'environnement entendu comme l'ensemble de l'espace au sein duquel évolue un individu, peut concentrer une multitude de risques liés à la malveillance, aux risques naturels ou/et aux risques technologiques.

Insécurité et malveillance

L'insécurité entendue comme fruit des actes de malveillances se concentre en particulier au sein des environnements urbains. Cette insécurité plus présente au sein de certains territoires fait partie des préoccupations de l'État comme en témoigne la mise en place en 2012 des Zones de sécurité prioritaire (ZSP). Aujourd'hui au nombre de 80, ces zones bénéficient d'un renforcement de la présence des forces de l'ordre afin de juguler l'insécurité quotidienne et la délinquance enracinée. 77 de ces territoires sont également concernés par le nouveau programme national de renouvellement urbain[1], impliquant une nouvelle conception du bâti et de l'aménagement des territoires sensibles. À cela vient s'ajouter la mise en place de dispositifs de vidéosurveillance venant renforcer les moyens des forces de l'ordre.

Le risque de malveillance peut également être étendu à une échelle nationale et supra nationale, au conflit armé et plus particulièrement sur le territoire national, au terrorisme. La probabilité que l'aléa se produise est modérée au regard des autres risques susmentionnés, mais les conséquences lorsque celui-ci se produit n'en sont que plus importantes. La prévention est donc un élément majeur en particulier au sein des environnements à risque. Les aéroports, les transports en commun, les gares, les lieux de cultes, les lieux d'enseignement (scolaire et universitaire) et les espaces à forte fréquentation comme les zones touristiques de la capitale… font ainsi l'objet d'une attention particulière dans le cadre de la mise en place du plan Vigipirate, tout comme les réseaux d'approvisionnement en eau. Face à ce risque et dans ces contextes, les techniques

1 – NPRU 2014-2024, Ministère de la Ville, de la Jeunesse et des Sports, 2014

et les technologies de surveillance et de prévention répondent à des problématiques spécifiques telles que la capacité à identifier un comportement déviant (cf. Analyse comportementale).

Les enjeux liés à la sécurité se déclinent également au sein d'un environnement en pleine expansion, celui du cyberespace. « Le cyberespace constitue un espace très particulier qui tient du far-west »[2] où les risques sont d'autant plus présents que la conscience du risque est encore limitée. « La crainte d'être piraté lorsque l'on paye en ligne, le risque d'espionnage industriel à l'encontre de nos entreprises ou les attaques dématérialisées contre nos intérêts nationaux sont autant de menaces qu'il nous faut anticiper et neutraliser »[3]. Face à ces menaces, une dynamique est mise en place à l'échelle nationale dans le cadre de la Nouvelle France Industrielle au travers de la Solution Confiance Numérique. Celle-ci englobe les enjeux de la cybersécurité des individus et s'étend bien évidemment jusqu'à la souveraineté nationale.

Les cybermenaces, qu'il s'agisse de conséquences d'erreurs, d'accidents ou directement d'actes de malveillance ont un coût financier important pour un particulier comme pour une entreprise, ces dernières étant les cibles privilégiées des cyberattaques. Il est très difficile d'évaluer le coût réel de ces attaques dans la mesure où toutes ne sont pas connues, et quand elles le sont, ne sont pas nécessairement déclarées, être victime d'une cyberattaque pouvant être très nuisible à l'image d'une entreprise. Cependant, la prévention de ce risque implique certes un besoin de protection pour les organisations et les particuliers (authentification, sécurisation des communications…) mais également une sensibilisation à la mise en place de bonnes pratiques. Les risques associés au BYOD (Bring your Own Device), tendance grandissante au sein des entreprises sont, par exemple, de plus en plus pris en compte, dans la mesure où les smartphones, clés USB et autres éléments introduits par les salariés sont autant de brèches dans la sécurisation des systèmes d'information de l'entreprise. Si nombre de cybermenaces ont un retentissement important en raison de leur multiplication, il se développe également des cyberattaques beaucoup plus ponctuelles et aussi beaucoup plus dévastatrices. En effet, depuis deux à trois ans, un critère dominant des cyberattaques réside dans leur caractère ciblé. Ces attaques prennent la forme d'APT (Advanced Persistent Threat ou Menaces Persistantes Avancées). Celles-ci sont spécifiques par leur durée, leur discrétion et leur complexité. Elles combinent plusieurs méthodes d'attaques afin de s'adapter au mieux à leur cible. Leur objectif est généralement de voler des informations précises auprès d'industriels, grands groupes comme PME, disposant d'informations sensibles ainsi qu'auprès d'institutions gouvernementales.

Risques et environnement naturel

La **dégradation de l'environnement** est également un enjeu pour le marché de la sécurité. Bien que les sources de pollutions soient différentes, la dégradation de l'environnement concerne aussi bien le milieu urbain que rural : les risques chroniques et d'origine anthropique concernant la qualité de l'eau et de l'air, et l'exposition aux polluants (avec par exemple les particules fines ou l'usage des pesticides), sont de plus en plus pris en compte par les autorités sanitaires. La qualité de l'air extérieur est devenue la principale préoccupation des Français (43 %[4]) devant le changement climatique ou les catastrophes naturelles. Le traitement de ces risques repose cependant davantage sur les technologies du marché de l'environnement que sur celles du marché de la sécurité, et sera donc abordé dans la monographie du secteur environnement

L'évolution de l'environnement naturel, notamment **le changement climatique,** influence également le marché de la sécurité. Outre les catastrophes naturelles (tremblements de terre, tsunami…), les phénomènes météorologiques extrêmes (cyclones, sècheresses, inondations, submersion marines…) augmentent en nombre et en intensité.

À l'échelle mondiale, les catastrophes naturelles ont coûté la vie à 11 000 personnes en 2014 et le coût total estimé des dégâts est de 113 milliards de dollars[5]. Ces chiffres, très variables d'une année à l'autre en fonction des évènements (le coût moyen annuel

2 – Michel BENEDITTINI, 2011, ancien directeur général adjoint de l'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information (ANSSI) sur <http://www.cerac-univ.eu/fr/le-cerac-vous-guide/le-cyberespace-et-ses-dangers> consulté le 18/06/2015

3 – Industrie du Futur, Réunir la nouvelle France industrielle, mai 2015

4 – SOeS, plate-forme Environnement de l'enquête de conjoncture auprès des ménages (Insee)

5 – Swiss Re, 2014

sur les 10 dernières années est évalué à 188 milliards de dollars) est en augmentation depuis la fin des années 1980. Les inondations représentent le premier aléa en termes de coût pour la France (estimé par les assureurs à plus de 1,8 milliards d'euros en 2014). Les feux de forêts en lien avec les phénomènes météorologiques[6] constituent un autre aléa majeur pour la France ; ils sont mieux contrôlés, la surface brûlée diminue chaque année malgré l'augmentation du risque (en nombre d'incendies mais également en superficie soumise au risque).

Cette évolution de la fréquence et de la gravité des catastrophes naturelles conduit à la mise en place de moyens de surveillance, à la recherche d'une plus grande résilience des aménagements et à des systèmes d'alerte des populations plus efficaces.

On note que si les risques naturels touchent tous les pays, les conséquences humaines en sont bien souvent nettement plus lourdes dans les pays en développement, du fait de structures moins résistantes et de services de secours moins dotés. Qui plus est, l'urbanisation croissante, voire galopante dans les pays émergents, pose la question de la résilience de ces nouveaux espaces face aux risques, en particulier dans des zones fortement touchées par les risques météorologiques ou sismiques. De nouveaux modes de prévention des risques doivent être déployés tant en termes d'accessibilité qu'en termes de mesures permettant l'alerte des populations.

À ce risque naturel, peut s'ajouter le risque technologique pour générer les « NaTech » (contraction de « naturel » et « technologique »), définies par l'INERIS comme « l'impact qu'une catastrophe naturelle peut engendrer sur tout ou partie d'une installation industrielle – impact susceptible de provoquer un accident, et dont les conséquences peuvent porter atteinte, à l'extérieur de l'emprise du site industriel, aux personnes, aux biens ou à l'environnement.» Si ces catastrophes ne représentent qu'une part modeste de l'ensemble des accidents (5 % des accidents en Europe, 7 % pour la France[7]), elles font l'objet d'une attention particulière et sont considérées comme un risque « majeur ». La fréquence est faible mais la gravité peut être très importante. La catastrophe de Fukushima en 2011 est emblématique de ces NaTech.

RÉGLEMENTATION

En matière de sécurité, les réglementations sont présentes à divers niveaux et intègrent de plus en plus les échelons supranationaux et en particulier européens, tant pour la maîtrise des risques sanitaires et environnementaux, qu'en termes de lutte contre la cybercriminalité et de protection des données personnelles.

Les plans de prévention des risques

Afin de se prémunir contre les risques naturels tels que les inondations, les mouvements de terrain, les avalanches, les éruptions volcaniques, la mise en place de Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN) permet de limiter l'usage des sols. Cette réglementation peut aller de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions. Les objectifs de ces plans sont d'une part de mieux connaître et prévenir les risques naturels (par la surveillance des aléas et la sensibilisation des populations) et, d'autre part de prendre en compte ces aléas directement dans les décisions d'aménagement.

De la même manière, la prévention des risques sanitaires conduit à la mise en place de plans de prévention ponctuels venant renforcer les règlementations sur le transit de marchandises ou de personnes. En parallèle aux phénomènes ponctuels de type épidémiques, des plans de préventions des risques sanitaires sont mis en place en particulier au sein des EPC (Établissement Public Communal) et EPCI (Établissement Public de Coopération Intercommunale).

Les installations à risque

Les installations à risque (sites industriels, ICPE…) sont particulièrement concernées par ces réglementations et leur harmonisation à l'échelle européenne avec notamment la mise en application de la Directive SEVESO 3 à partir du 1er juin 2015. La révision de la directive SEVESO 2 vient modifier et aligner la liste des substances dangereuses sur le modèle de classification du règlement CLP (Classification, Labelling, Packaging), mais surtout elle vient renforcer la politique de prévention des accidents majeurs. La modification de la directive SEVESO élargit la mise en application des réglementations à de nouveaux

6 – Risque évalué selon l'indice Forêt-Météo (IFM)

7 – Base de données ARIA gérée par le Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI) du Ministère chargé de l'Écologie et base de données MARS sous la responsabilité du Joint Research Centre (JRC) de la Communauté Européenne. 2012

établissements et fait passer certains établissements de seuil bas à seuil haut. Les systèmes de gestion de la sécurité seront également applicables aux établissements de seuil bas. En 2011, les investissements de réduction des risques réalisés par les établissements classés Seveso ont représenté un montant global estimé à environ 150 à 200 millions d'euros[8]. Le renforcement de la directive SEVESO 3 implique donc une augmentation des investissements de la part des établissements. Par ailleurs, l'une des principales mesures étant l'accès à l'information pour les populations à proximité des sites, cette mise en application va créer de nouveaux besoins de formation sur les questions de communication vers le public.

Au niveau national, cette directive est renforcée par la règlementation ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) qui regroupe « les usines, ateliers, dépôts, chantiers […] qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publique, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature, de l'environnement et des paysages, soit pour l'utilisation rationnelle de l'énergie, soit pour la conservation des sites et des monuments ainsi que des éléments du patrimoine archéologique »[9]. Ces installations sont soumises soit à déclaration soit à enregistrement pour celles à faible risque. Lorsque le risque est plus important, elles doivent répondre à des normes de sécurité croissantes et sont soumises à autorisation voire à « autorisation et servitude d'utilité publique » (ce qui correspond aux installations classées SEVESO seuil haut). Toutes sont susceptibles d'être inspectées.

Autour des sites soumis au régime de l'autorisation avec servitudes, sont établis des PPRT, Plan de Prévention des Risques Technologiques. Ils « visent à améliorer la coexistence des sites industriels à haut risques existants avec leurs riverains, en améliorant la protection de ces derniers tout en pérennisant les premiers. »[10]. La réduction des risques dans ces zones passe par les mesures foncières sur l'urbanisation existante, des mesures de réduction des risques à la source (s'ajoutant à celle prévue par la réglementation ICPE), des travaux de renforcement des constructions voisines ou encore des restrictions sur l'urbanisme futur. Ces dispositifs sont élaborés par le Préfet en association avec les communes, les EPCI, les exploitants des installations à risque et la Commission de suivi de site.

Sécurité intérieure et Opérateurs d'importance vitale

La directive SEVESO identifie les sites pouvant s'avérer dangereux en cas d'accident, à ce risque s'ajoute la nécessité de sûreté du site, c'est à dire la résilience du site en cas d'actes de malveillance et notamment de terrorisme. Les sites qui sont soumis à ces autres considérations, définis comme étant OIV (opérateurs d'importance vitale) sont concernés par la mise en place de dispositifs de sûreté propres à leur secteur et définis par les Directives nationales de sécurité en lien avec le code de la défense.

Face aux cybermenaces, l'État réaffirme au travers du Livre Blanc Défense et Sécurité Nationale (2013) la nécessité de s'en prémunir, en particulier concernant les « activités d'importance vitale pour le fonctionnement normal de la Nation ». Cela passe par la mise en place d'un système de protection des systèmes d'information de l'État, des industries stratégiques et des OIV. Cette nécessité se traduit par un volet dédié au sein de la LPM de 2013 qui assure un renforcement des capacités humaines et financières consacrées à la cyberdéfense. L'un des volets consacrés à la recherche et technologie est dédié à la « montée en puissance de la cyberdéfense »[11].

8 – DGPR ; *Bilan détaillé des actions nationales 2011 de l'Inspection des Installations classées*

9 – Article L 511-1 du code de l'environnement, Légifrance, consulté le 18/05/2015

10 – http://www.developpement-durable.gouv.fr/Maitrise-de-l-urbanisation-PPRT,12775.html, consulté le 14.09.2015

11 – Loi n° 2013-1168 du 18 décembre 2013 relative à la programmation militaire pour les années 2014 à 2019 et portant diverses dispositions concernant la défense et la sécurité nationale.

L'intérêt de l'État pour la cybersécurité concerne non seulement les enjeux vitaux pour la nation mais également les entreprises et administrations, pour lesquelles les cyberattaques représentent un coût potentiellement important. Les entreprises concentrent en effet plus de la moitié des cyberattaques[12]. La prévention et la sensibilisation des entreprises constituent l'un des éléments clés de la promotion de la cybersécurité en France.

La protection des données personnelles

Si les enjeux liés à la protection des données personnelles et notamment les enjeux de protection contre le piratage peuvent être un moteur pour le développement des technologies de cybersécurité telles que l'authentification forte, la législation[13] encadre le développement de certains systèmes de sécurité en particulier biométriques en raison du caractère « personnel » des données traitées. À titre d'illustration, le système veineux devient de ce fait un mode de contrôle plus aisé à mettre en place : il est infalsifiable et ne se modifie pas avec le temps contrairement aux empreintes digitales. Qui plus est, les restrictions mises en place par la CNIL sont moins sévères notamment concernant le contrôle d'accès : pour mettre en place un système biométrique lié aux empreintes digitales, une demande d'autorisation est nécessaire tandis qu'une déclaration de conformité suffit pour utiliser le système veineux (cf. Authentification Forte).

L'augmentation des activités liés à la valorisation des données massives pose de plus en plus de questions quant à la récupération et à l'usage qui est fait des données personnelles par des tiers (applications, entreprises, individus…), ce qui peut constituer des freins au développement de certaines technologies et activités ; la mise en place en mars 2014 d'un règlement européen sur les données personnelles vise à préciser le cadre des échanges de données transfrontaliers et garantir l'uniformité de leur traitement. Le non-respect de ce règlement implique des amendes allant jusqu'à 100 millions d'euros ou 5 % du chiffre d'affaires annuel de l'entreprise contrevenante. De nouvelles dispositions en discussion devraient renforcer le cadre de protection des données sur Internet.

La loi n° 2015-912 du 24 juillet 2015 relative au renseignement et ses évolutions pourront venir modifier le contexte du marché de la sécurité à l'interface des données personnelles. Cette loi vise à renforcer l'arsenal juridique face aux menaces pour notre sécurité. La loi, outre la lutte contre le terrorisme, concerne aussi la prévention de la criminalité organisée, ainsi que la sécurité des intérêts essentiels de la France. Plusieurs outils pourront être mis en place pour rendre plus efficaces les dispositifs de surveillance. Il est prévu que cette loi et son impact soient évalués dans les 5 ans.

La règlementation peut aussi permettre aux entreprises du secteur de la sécurité de gagner en visibilité grâce aux différentes labellisations et certifications mises en place à l'échelle nationale et européenne. Les normes ISO, certaines certification comme APSAD (sur les risques incendies) sont en place depuis longtemps. Depuis quelques années, la certification des acteurs de la sécurité se développe principalement en lien avec les enjeux de confiance numérique :

- Le règlement eIDAS qui porte sur l'identification électronique et les services de confiance pour les transactions électroniques au sein du marché intérieur, définit le cadre relatif à la sécurisation des services de confiance proposés par les États membres. Les exigences prévues par ce règlement et les actes d'exécution associés, en matière de certification, seront dimensionnantes pour les entreprises du secteur ;
- parmi les actions prioritaires de la solution « confiance numérique » de la nouvelle France industrielle figure la création du label France Cybersecurity destiné à promouvoir l'offre française de produits et de services de cybersécurité à l'export ;
- la Solution « confiance numérique » de la nouvelle France industrielle prévoit également la mise en place d'un schéma de labellisation des formations en cybersécurité courant 2016.

MARCHÉ

Pour une vision approfondie du marché (hors le champ environnemental visé supra), nous recommandons la lecture de l'étude du PIPAME[14] « Analyse du marché et des acteurs de la filière industrielle française de sécurité » (2015).

12 – Baromètre de la cybersécurité, Usine Digitale, Orange Business, 2014

13 – LOI n° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés

14 – Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques

Le marché de la sécurité se structure en différents segments se déclinant face aux différents types de risques.

Le marché de la sécurité et ses différents segments sont corrélés aux évolutions de notre environnement : la mobilité accrue des populations et l'ouverture des frontières, l'intégration de nouvelles technologies toujours plus connectées et les évolutions démographiques et sociologiques ont un impact sur ce marché.

Les facilités de transports et d'échanges induisent pour les marchandises des besoins de contrôle toujours plus importants en termes de traçabilité (capteurs et traceurs) et de veille sanitaire (contrôle aux aéroports, règlementation douanière pour l'importation). La mobilité des populations induit également une nécessaire adaptation à la fois en termes de contrôle d'identité (passeport biométrique) que de veille sanitaire (détecteurs aux aéroports pour limiter les risques de propagation de maladies contagieuses).

La prévention des risques

En appliquant le ratio généralement admis que 1 euro investi en prévention permet une économie de 7 euros de coûts induits par une catastrophe naturelle, on peut évaluer, compte tenu des dommages annuels estimés en moyenne à 200 Md $, le marché mondial annuel de la prévention à un montant atteignable de près de 30 Md $.

Le marché de la prévention et la gestion du risque naturel en France est de l'ordre de 150 à 350 millions d'euros[15] et est influencé par l'augmentation des catastrophes naturelles en nombre et en gravité. À titre d'illustration, une crue centennale de la Seine comparable à celle de 1910 aurait aujourd'hui un coût estimé de 30 à 40 milliards d'euros.

La prévention des risques environnementaux d'origine anthropique est avant tout un marché de la surveillance avec au cœur de la prévention des risques, la métrologie et les technologies de capteurs et de traitement de la donnée associée (l'analyse de l'air, de l'eau et des sols, l'observation satellitaire, l'ingénierie de données environnementales). Ce secteur de la prévention est cependant davantage lié aux marchés de l'environnement et sera donc traité dans la section correspondante.

Figure 1 : Volume d'achats (M€) : Equipements Protection civile - Données recueillies par le pôle Risques, 2012

Les moyens de protection civile, s'ils sont plus largement mobilisés par les risques naturels, sont communs avec les risques technologiques. En 2013, le budget global des dépenses de sécurité civile s'est élevé à près de 870 millions d'euros dont 270 pour le matériel d'incendie et autant pour les autres dépenses d'équipement[16]. Le marché extérieur est relativement similaire en termes d'équipements.

La surveillance et la prévention des risques est un marché en constante évolution du fait de l'augmentation des phénomènes naturels mais aussi en lien avec l'introduction de nouvelles énergies et de nouveaux matériaux (voiture électrique, énergie éolienne). Cela conduit à la naissance de nouveaux moyens de lutte

15 – Pôle Risque, 2013

16 – Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises ; *Les statistiques des services d'incendie et de secours* ; édition 2014.

contre les incendies, les pollutions et implique l'introduction d'une ingénierie de la résilience dans les secteurs innovants (habitats durables et sécuritaires, prise en compte des catastrophes naturelles potentielles dès la conception). La recherche en matière de nano-sécurité et liée au développement des nanotechnologies représente ainsi 14 à 30 millions d'euros par an à l'échelle européenne (PCRD).

Sécurité connectée

La prise en compte des enjeux de sécurité se développe, en particulier dans les pays développés mais aussi de plus en plus dans les pays émergents. La recherche du risque zéro est une tendance de plus en plus présente au sein des populations qui souhaitent une réelle protection face aux différents risques. Cette recherche du risque zéro est accentuée par l'augmentation des aléas (catastrophes naturelles, actes de malveillance, etc.). L'augmentation du vandalisme et de la criminalité conduit par exemple les particuliers et les entreprises à s'équiper face aux risques notamment au travers d'appareils de vidéosurveillance, de contrôle d'accès… Le marché de la vidéosurveillance a connu une hausse de 12 % en 2014. À l'échelle mondiale et tiré par les pays émergents, le taux de croissance de la vidéosurveillance est supérieur à 10 % (12 % en 2014 pour 15,9 milliards de dollars[17]) et ne devrait pas faiblir en particulier concernant la vidéosurveillance IP. Ce dernier devrait atteindre 43 milliards de dollars d'ici 2019 avec un taux de croissance annuel supérieur à 20 %[18] avec en première position l'Amérique du Nord suivie par la région Asie-Pacifique. Le marché du transport représente le premier demandeur (transport public et réseaux routiers).

Le développement de la domotique facilite le développement de ce marché à destination des particuliers par l'intégration des systèmes à un ensemble de services proposés par les applications domotiques. Ce marché est corrélé à celui du bâtiment puisque 80 % des installations domotiques se font sur des logements neufs. Le marché mondial de la domotique devrait croître de 30 % par an en moyenne d'ici à 2020 pour atteindre plus de 35 milliards de dollars[19].

Cette situation engendre également un terrain favorable au développement des contrôles dans les lieux publics. Entre 2009 et 2011, le nombre de caméras de vidéosurveillance dans les communes françaises est passé de 20 000 à 60 000. Les contrôles d'accès, facilités par les technologies du sans contact et le développement des technologies biométriques (notamment les dispositifs qui permettent de ne pas conserver des données à d'autre fin que le contrôle d'accès avec par exemple l'usage du contour de la main), se développent dans des établissements jusque-là peu équipés (petites collectivités locales, PME, établissements d'enseignement, etc.). Les marchés de la détection intrusive, du contrôle d'accès et de la vidéosurveillance vont connaître une hausse de l'ordre de 6 % par an en France entre 2013 et 2020 (base 2013 environ 150 millions d'euros[20]), plaçant ainsi la France en 3ème position à l'échelle européenne derrière l'Allemagne et le Royaume Uni.

Les enjeux de la surveillance et de la protection (autant physique que cyber) résident dans la capacité d'anticipation avec entre autres le développement de l'analyse comportementale par détection de mouvements (de foule ou de personne) mais également par l'analyse des comportements déviants dans le monde virtuel. Ce marché s'adresse à la fois aux secteurs public (lieu public, sites gouvernementaux…) et privé, entreprises comme particuliers.

La cyber-sécurité

L'augmentation du nombre et des applications des objets connectés, ainsi que le développement des environnements digitaux créent de nouveaux risques et donc un nouveau marché pour le secteur de la sécurité : la connectivité des populations conduit au besoin de protection des données personnelles face à la cybercriminalité. Le marché de la cybersécurité est ainsi en plein essor avec un taux de croissance de 7 à 8 % par an, il devrait atteindre 86 milliards de dollars en 2016 à l'échelle mondiale.[21]

L'Internet des objets induit un accroissement des problématiques liées aux transactions de données du fait de l'augmentation du nombre d'objets connectés. Selon l'Idate, leur nombre devrait atteindre 80 milliards

17 – IHS Technology

18 – *Video Surveillance and VSaaS Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2013-2019* ; Transparency Market Research

19 – Financière d'Uzes, « Les objets connectés », 2011

20 – Atlas 2012 d'En toute Sécurité

21 – <http://dge-et-vous.entreprises.gouv.fr/numero-003>, consulté le 12/05/2015 – chiffres d'une étude du cabinet Gartner.

en 2020 dans le monde, tous secteurs confondus. Qui plus est, les usages faits des objets connectés, en particulier du smartphone, sont de plus en plus hétérogènes et incluent des actions sensibles (paiement sans contact). Cela accentue encore le besoin de sécurisation. À cela s'ajoute la connectivité croissante d'équipements sensibles comme les voitures ou les trains (le marché de la voiture connectée devrait quasiment quadrupler d'ici à 2020[22]) mais également les dispositifs médicaux connectés. Le renforcement de la sécurisation est donc un défi majeur et ce d'autant qu'il ne doit pas venir alourdir l'expérience utilisateur du dispositif.

La dématérialisation de nombreux services privés et publics (services bancaires, impôts, CAF, élection en ligne, citoyenneté numérique) induit la nécessité d'un renforcement des systèmes de sécurité informatique. La sécurité des réseaux connaît ainsi une croissance à deux chiffres depuis 2008 atteignant un taux de croissance de 17 % en 2012 en France pour un chiffre d'affaire de 1,1 milliards d'euros[23]. La cybersécurité dans son ensemble représente 40 000 emplois en France[24].

Le développement du marché de l'authentification et notamment de l'authentification forte est corrélé au précédent. Les enjeux sont d'autant plus importants que l'usage de technologies de stockage dématérialisé ou d'accès à distance comme le cloud se déploie rapidement avec notamment la multiplication des supports d'usage (téléphone, tablette, ordinateur…).

PRODUCTION

La production industrielle dans le domaine de la sécurité souffre avant tout du coût de la main d'œuvre dans les pays développés.

La production des équipements de protection individuelle (EPI) en France est de plus en plus compliquée face à la concurrence asiatique à moindre coût. Pour pallier cela, la délocalisation partielle est courante. Cependant, des atouts sont mis en exergue par les entreprises françaises avec notamment les délais de livraison plus courts, la préservation des secrets de production et la maîtrise de la propriété intellectuelle.

La production des cartes à puce, secteur dans lequel la France est en bonne position, fait appel à différents acteurs et en premier lieu les fondeurs implantés en majeure partie en Asie (TSMC et UMC à Taïwan et CSM en Chine). Les développeurs qui fournissent les logiciels sont peu nombreux (Trusted Logic ou Gemalto par exemple). Le marché des encarteurs est oligopolistique avec 4 acteurs mondiaux dont deux français (Gemalto, Oberthur, Giesecke & Devriert et Morpho). Les encarteurs régionaux commencent à émerger en particulier en Chine (Datang, Eastcom Peace). La montée en puissance de ces nouveaux acteurs fait chuter la compétitivité des cartes à puce françaises dont 60 à 70 % du coût global réside dans le coût de la main d'œuvre. L'activité de l'encartage connaît donc un très fort taux de délocalisation. Seules les activités de logiciel et de personnalisation des cartes à puce restent encore en France.

Cependant, la concentration de cette activité donne également naissance à un écosystème d'acteurs innovants. Les start-ups comme Secure ID ou TrustInSoft, ou les centres d'Évaluation de la Sécurité des Technologies de l'Information (CESTI) tels que le laboratoire d'expertise Serma, le LETI, ou encore Thalès CEACI bénéficient de la présence des acteurs mondiaux français afin de se positionner sur le marché.

Les grandes tendances

TECHNOLOGIQUES

Le domaine de la sécurité favorise l'émergence de technologies spécifiques notamment dans le cadre de technologies militaires pouvant ensuite être adaptées à la sécurité civile. Le développement concomitant des technologies n'est pas rare d'autant que certaines entreprises travaillent à la fois pour la sécurité militaire et la sécurité civile.

Les TIC occupent une place de plus en plus centrale en matière de sécurité civile comme militaire :

- Les technologies de protection des données sont de plus en plus stratégiques, et ce à la fois en amont via **l'authentification** et lors du transfert de données via les technologies de **communication sécurisée** ;
- La **valorisation des données massives** est une réalité centrale dans le domaine de la sécurité informatique : la surveillance des réseaux, l'authentification

22 – The Connected C – 2014 Study PwC

23 – Atlas 2014 d'En toute sécurité

24 – Industrie du futur, Réunir la Nouvelle France Industrielle, mai 2015.

et l'autorisation des utilisateurs, la gestion des identités, la détection des fraudes, les contrôles de sécurité, etc. Son exploitation permet aux responsables de la sécurité des systèmes d'information et aux directeurs des systèmes d'information de corréler l'information pour avoir une représentation la plus fidèle possible des vulnérabilités et menaces, et permet de répondre en partie aux cybermenaces. La mise en place de techniques d'anonymisation du stockage des données permettrait de développer à son maximum la valorisation des données massives tout en traitant les données dans un cadre de protection adéquat.

D'autres technologies des TIC sont utilisées dans le secteur de la sécurité :

- la **réalité virtuelle et la réalité augmentée** sont des technologies réutilisées par les secteurs de la sécurité civile et militaire pour la mise en situation (exercice de gestion de crise, formation du personnel) et l'immersion ;
- **l'intelligence artificielle et l'analyse comportementale** viennent faciliter le traitement des informations et la décision face à l'affluence de données liée à l'augmentation de la surveillance. Ainsi des systèmes capables de détecter un comportement divergent permettent de contrecarrer une cyberattaque avant que celle-ci ne se produise. En l'état actuel des technologies, il est possible de bloquer une cyberattaque lorsque celle-ci a lieu, d'anticiper une nouvelle attaque similaire mais l'action de lutte s'effectue toujours en réaction non en anticipation. Cette capacité d'anticipation est un verrou majeur dans l'avancée de l'analyse comportementale.

Les capteurs (intégrés ou non à d'autres technologies comme les textiles techniques) sont utilisés dans différents secteurs de la sécurité. La métrologie est particulièrement concernée avec des associations possibles à d'autres technologies notamment de datamining ou de robotique.

La robotique, dont les drones, se développe dans le champ de la sécurité en particulier militaire mais également civile au travers de la robotique de surveillance (sites industriels) et de surveillance environnementale ou encore de la cobotique (assistance à personne). Notons que les drones sont des outils au service de la sécurité, mais qu'ils peuvent également représenter une menace à prendre en compte dans les stratégies de prévention et de sécurité.

Les différents matériaux avancés incluant les textiles techniques et intelligents s'avèrent utiles en matière de protection environnementale (barrage antipollution), de lutte contre les catastrophes (digues anti-inondation). Les équipements de protection individuelle (EPI) sont également un débouché pour les textiles techniques développant résistance au feu, aux produits chimiques… tout en préservant une certaine ergonomie pour s'adapter aux usages. Les EPI deviennent également de plus en plus performants. La recherche d'une connectivité intégrée permet d'anticiper les risques pour la personne munie de l'équipement. La localisation, la surveillance des paramètres vitaux permettraient d'identifier les défaillances et la position de la personne en danger.

INDUSTRIELLES

La production industrielle dans le secteur de la sécurité est influencée par le degré d'importance des technologies utilisées. Les centres de R&D restent implantés en France mais, s'agissant des équipements utilisant peu de technologies « sensibles » comme les équipements d'interdiction d'accès, les équipements de protection et les textiles techniques, les lieux de production importent relativement peu (cf. 2.4 Production). Les équipements de protection de base (gants, chaussures, lunettes…) sont majoritairement fabriqués par des entreprises asiatiques, et les entreprises françaises sous-traitent la fabrication de ce type d'éléments à leurs filiales étrangères. Cependant, l'obligation de respecter la norme NF pour certains équipements de sécurité (comme les DAAF) donne un avantage aux entreprises disposant de leurs sites de production en France, ceux-ci étant considérés comme un gage de qualité.

Pour ce qui est des véhicules de sécurité (incendie, ambulances, forces de l'ordre…), l'activité de carrosserie est majoritairement implantée en France. Bien que l'un des premiers acteurs français, le groupe Gruau, dispose d'antennes en Espagne et en Pologne (sur les sites à proximité des constructeurs automobiles français), les activités liées aux véhicules sanitaires ou ambulances se font sur les différents sites français. Il en va de même pour les activités de GifaCollet dont les deux sites de production sont français (Normandie et Vendée).

Dès lors que les technologies développées ont des domaines d'application impliquant la sécurité intérieure

par exemple (technologie des communications, systèmes liés à la cyber-sécurité), les questions de souveraineté nationale sont primordiales (comme le montre la possibilité de restreindre l'accès aux marchés publics pour « exception de sécurité »).

Deux grandes tendances dans le secteur de la défense résident dans l'association entre acteurs publics et privés, et l'innovation duale. Le financement de la R&D militaire bénéficie donc aussi aux entreprises civiles. L'État prévoit un investissement de 730 millions d'euros d'ici à 2019 pour ses dépenses de R&D militaires selon la Loi de Programmation Militaire et une partie de cette somme est dédiée aux innovations duales. La Direction générale de l'armement (DGA) par exemple, dans le cadre du dispositif RAPID (régime d'appui aux PME pour l'innovation duale) subventionne des projets de recherche industrielle ou de développements expérimentaux intéressant le secteur de la défense. Le dispositif RAPID est ouvert en permanence et les projets peuvent être déposés à tout moment. Les projets éligibles doivent être innovants, à fort potentiel technologique et présenter des applications à la fois sur les marchés militaires et civils.

D'USAGE

La prévention des risques se pense de plus en plus à une échelle globale et transnationale. Les États travaillent de plus en plus conjointement pour prévenir et lutter contre les différents risques de grande envergure (crise sanitaire, catastrophe naturelle, cybercriminalité). Cette nécessaire coopération suppose une uniformisation des règlementations à l'image de la directive Seveso 3 mais aussi dans certains cas une interopérabilité des systèmes qui n'est pas toujours effective au sein même des États entre les différents services. La gestion de crise est de plus en plus gérée via des technologies informatiques : la simulation en temps réel est déjà très présente au sein des centres opérationnels pour les mises en situation. De même, la formation du personnel de sécurité civile (pompiers, policiers…) s'effectue au travers de mises en situation par la réalité virtuelle. Le déploiement de l'infrastructure Antares (Adaptation nationale des transmissions aux risques et aux secours) fait par exemple partie des enjeux budgétaires français concernant la sécurité civile. Il s'agit d'un réseau Radio numérique chiffré national dans la bande 380-410 MHz basé sur une technologie TETRAPOL.

D'autre part, l'usager est de plus en plus confronté aux cyber-risques et impliqué dans la prévention de ceux-ci. En lien avec le déploiement des objets connectés (domotique, voiture, smartphone…) et le transit accru de données personnelles, les risques augmentent. Face à la méfiance accrue de l'utilisateur, l'objet connecté doit donc s'adapter et instaurer la confiance face aux risques de piratage (prise de contrôle de l'objet par un tiers, vol de données). Cette sécurisation des objets passe par le développement d'une cybersécurité « by design ».

Celle-ci se déploie également au travers de la communication et de l'éducation aux cyber-risques (vol des données personnelles) augmentant avec le nombre d'objets connectés et de services d'e-gouvernement. La prévention peut passer par le biais de serious games, de diffusion de messages préventifs…

La position de la France

Pour une analyse plus détaillée sur les acteurs de la sécurité et la position de la France, nous recommandons la lecture de l'étude du PIPAME « Analyse du marché et des acteurs de la filière industrielle française de sécurité » (2015).

INDUSTRIELLE

La France compte quelques acteurs industriels majeurs dans le domaine de la sécurité avec en premier lieu Morpho sur l'anti-terrorisme, le contrôle d'accès et la sécurité incendie. Avec un chiffre d'affaire de 1,5 milliards d'euros en 2014 et 9 % de celui-ci dédié à la R&D[25], Morpho est le leader mondial des documents d'identité sécurisés par la biométrie, des systèmes automatisés d'identification biométrique des empreintes digitales, de l'iris et du visage, et troisième en termes de cartes à puce.

Thales Communication & Security est le numéro un européen dans les produits et systèmes d'information et de communication sécurisés pour les forces armées et de sécurité et dans les systèmes de sécurité urbaine, de protection des infrastructures critiques et des voyageurs. Avec 20 % de son chiffre d'affaire dédié à la

25 – <http://www.morpho.com/>, consulté le 18/02/2015

R&D, la filiale du groupe Thales dispose de l'un des centres majeurs de R&D.

Gemalto, avec un chiffre d'affaires de 2,4 milliards d'euros, se positionne également parmi les leaders mondiaux en termes de sécurité numérique (principalement les services bancaires et les services d'e-gouvernement) et plus particulièrement sur les systèmes d'exploitation sécurisés embarqués dans divers objets comme les cartes UICC ou SIM, les cartes bancaires, les tokens, les passeports électroniques…

Oberthur Technologies, avec un chiffre d'affaires de 950 millions d'euros en 2013, est le deuxième fabricant mondial de carte à puce. Ce groupe international concentre une grande partie de ces activités de R&D en Bretagne et concentre ses activités sur les domaines des Smart Transactions, du Machine-to-Machine, de l'identité numérique et du Contrôle d'accès.

Cassidian, aujourd'hui intégré au sein d'Airbus Defence and Space, est un leader mondial dans le domaine des solutions et systèmes de sécurité intégrés.

Concernant les équipements de sécurité civile, la France compte quelques industriels bien positionnés ou dispose de filiales de grands groupes. Desautel et Camiva (filiale du groupe IVECO Magirus, spécialiste mondial du matériel de lutte contre l'incendie) pour les engins d'incendie et de secours, Pok (avec un chiffre d'affaires de 15 million d'euros dont 50 % à l'export dans 75 pays[26]), Leader ou encore Pons pour les matériels portables, le Groupe Gruau pour les ambulances. Les équipements de protection individuelle (EPI) sont principalement produits par Balsan (30 millions d'euros de chiffre d'affaires en 2013[27]), Paul Boye (61,8 millions d'euros de chiffre d'affaires en 2013[28]), MSA-Gallet (filiale du groupe américain MSA) et Honeywell Safety (filiale du groupe américain Honeywell).

La France compte également une multitude de petits acteurs locaux dynamiques qui se concentrent sur les marchés français de la sécurité. On dénombre 4 500 entreprises intervenant sur le marché de la sécurité.

26 – <http://www.pok.fr/societe/>, consulté le 18/02/2015

27 – <http://www.balsan.fr/>, consulté le 18/02/2015

28 – http://www.paul-boye.fr/, consulté le 18/02/2015

L'État soutient la structuration de la filière industrielle de la sécurité en France et a pour cela donné naissance en 2013 au Comité de la filière des Industries de Sécurité (COFIS). Les objectifs du comité reprennent principalement les éléments suivants mis en lumière par le Livre Blanc sur la défense et la sécurité publié la même année :

- identifier les forces et faiblesses du marché français de la sécurité;
- identifier les technologies critiques et stratégiques à préserver ou développer;
- élaborer un premier recensement des besoins prioritaires de l'État et des opérateurs;
- soutenir le lancement de projets de démonstrateurs structurants pour la filière;
- soutenir les entreprises française à l'export, favorisant l'émergence du « Club France » ;
- utiliser le levier européen, en proposant une stratégie nationale publique-privée vis-à-vis des instruments européens;
- mettre en réseau les acteurs.

Sur ce dernier point, la structuration de la filière permettra entre autres au vivier de PME et de start-ups innovantes de gagner en visibilité et en force de frappe. Le secteur reste aujourd'hui plutôt atomisé, faciliter des regroupements à l'image d'HexaTrust créé en 2013 renforcerait l'attractivité des PME françaises pour les clients étrangers.

Parallèlement à l'émergence du COFIS, l'année 2014 a vu la mise en place et la montée en puissance de la Délégation ministérielle aux industries de sécurité (DMIS) au sein du Ministère de l'Intérieur. S'intégrant dans un écosystème d'acteurs institutionnels implantés depuis longtemps comme la DGA, la SGDSN, l'ANSSI ou encore la DGAC, la mission centrale de la DMIS est de contribuer à la création et à la structuration d'une filière industrielle de sécurité. Elle accompagne les acteurs qui développent et conçoivent des solutions techniques, aussi bien en termes d'équipements, de systèmes ou de technologies avancées. Cette mission se décline notamment dans les domaines de la prospective et de l'innovation.

ACADÉMIQUE

La France dispose également de laboratoires de recherche reconnus sur le secteur de la sécurité. Le CEA

se concentre sur la sécurité nationale et les enjeux de défense, c'est l'un des acteurs de la dissuasion nucléaire, il focalise également les questions des risques liés à la production d'énergie nucléaire, d'entretien et de démantèlement des centrales. Le CEA LIST (Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies) concentre quant à lui ses activités en matière de sécurité autour des systèmes embarqués et surtout sur les capteurs et le traitement du signal.

Le GIS 3SGS (Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes) dont le centre névralgique est implanté au sein de l'Université de Technologie de Troyes, regroupe 10 laboratoires publics et privés dont :

- Le CRAN : Centre de Recherche en Automatique de Nancy (UHP, INPL, CNRS)
- Heudiasyc : Heuristique et diagnostic des systèmes complexes (UTC, CNRS)
- L'Institut Charles Delaunay (UTT, CNRS) avec plus particulièrement le LM2S (Laboratoire de Modélisation et Sûreté des Systèmes)
- LAGIS : Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique & Signal (USTL, ECL, CNRS)
- LAMIH : Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (UVHC, CNRS)
- LCFR : Laboratoire de Conduite et Fiabilité des Réacteurs (CEA)
- LORIA : Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications (UHP, INPL, INRIA, CNRS)

Ses thèmes de recherche recoupent différents domaines comme les enjeux de pronostic et diagnostic (validation de données, tolérance aux fautes, évaluation quantitative des risques, modélisation des dégradations et des défaillances, modélisation des incertitudes, réseaux de capteurs), d'estimation, de stratégie proactive et d'aide à la décision, la simulation et les supports à la formation (modélisation des comportements, des situations de crise, interface multitouche), l'organisation et le management des risques ainsi que la sécurité des réseaux et les questions liées à la cybercriminalité (équipements nomades, protection de la vie privée…).

Sur ce dernier axe de recherche, Telecom ParisTech et EDF ont créé un laboratoire de recherche conjoint centré exclusivement sur la recherche en sécurité et Internet des objets, le SEIDO.

Les enjeux de sécurité liés aux matériaux se retrouvent au sein de différents centres de recherche comme le Limatb de l'Université de Bretagne qui travaille sur l'Ingénierie des matériaux et dispose d'une branche concernant les matériaux intelligents et auto-réparables.

L'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) se focalise sur l'évaluation et la prévention des risques liés aux installations industrielles, aux exploitations souterraines…, que ces risques soient accidentels ou chroniques. Il effectue des travaux de recherche amont autour de quelques priorités scientifiques tels que le développement de méthodes permettant de prédire les dangers des substances chimiques ou le développement de mesures dans les milieux complexes (air, eau, sol) en particulier de polluants émergents (nanoparticules). Il contribue également à la mise au point de procédés industriels et au développement de nouvelles technologies (hydrogène, nanomatériaux) plus sûres, intégrant dès leur conception la maîtrise des risques.

Le LabEx SERENADE dont est membre l'INERIS se concentre quant à lui sur la nano-sécurité lié aux développements des nanomatériaux, aux conséquences d'exposition répétées, aux enjeux de fin de vie...

À ces laboratoires spécifiquement centrés sur la sécurité viennent s'ajouter des acteurs travaillant sur des axes précis de la sécurité comme :

- Le LCIS – Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes qui est principalement orienté vers les systèmes embarqués et communicants,
- l'INRETS, l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité,
- l'ONERA travaillant sur les enjeux de sécurité dans l'aérospatial,
- le CNRFID qui travaille sur les solutions RFID et NFC et s'intéresse donc aux enjeux de sécurité qui y sont liés,
- l'XLim centré sur l'électronique, l'optique-photonique, la CAO, les mathématiques, l'informatique et l'image, dont l'un des domaines d'application sont les environnements sécurisés, de la bio-ingénierie, des nouveaux matériaux, de l'énergie et de l'imagerie.

Plusieurs pôles de compétitivité et une grappe d'entreprises viennent également structurer le secteur :

– Le pôle Risques concentre son action sur les questions liées à la gestion des risques (naturels, industriels et chroniques), à la vulnérabilité des territoires et aux enjeux de sécurité civile. Il regroupe 260 adhérents principalement localisés dans les régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur, son zonage régional, mais il travaille également en collaboration avec l'Espagne, l'Allemagne, la Tunisie, le Maroc…

– Le pôle SCS (Solutions Communicantes Sécurisées) est un pôle mondial implanté en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Il regroupe des acteurs de la microélectronique, des logiciels, des télécommunications et du multimédia, autour des services et usages des Technologies de l'Information et de la Communication.

– Le pôle TES (Transactions électroniques sécurisées) concentre son activité autour des techniques électroniques, informatiques et télématiques permettant d'effectuer des échanges d'informations sûrs et en confiance.

– Le pôle Systematic regroupe les acteurs de la révolution numérique appliqués à différents marchés et dispose notamment d'un axe Confiance Numérique & Sécurité.

– Le cluster Eden, labellisé grappe d'entreprise par le CGET (ex-DATAR), originellement implanté en Rhône-Alpes, bénéficie aujourd'hui d'antennes en Bretagne, en Provence-Alpes-Côte d'Azur et en région Centre. Il regroupe des PME du secteur de la défense.

D'autres pôles interviennent également sur le secteur de la sécurité sans pour autant être structurés de façon à gérer les projets suivant une segmentation sécurité. C'est le cas des deux pôles Mer (Bretagne et PACA), de CapDigital, Image et Réseaux, Minalogic ou encore I-Trans.

Notons enfin que l'ANSSI dispose de compétences très avancées en matière de R&D en cybersécurité et joue donc un rôle majeur en matière de structuration de l'écosystème.

Matrice AFOM

ATOUTS

Quelques acteurs français parmi les leaders mondiaux

Un tissu industriel qui se structure progressivement

Bon positionnement des acteurs académiques français

Enjeux de souveraineté nationale

FAIBLESSES

Délocalisation des activités industrielles à faible valeur technologique (EPI)

Difficulté à l'export pour les PME du secteur

OPPORTUNITÉS

Contexte sociétal propice au développement technologique

Augmentation du nombre de catastrophes naturelles

Définition de la cybersécurité comme priorité nationale au sein de la solution « confiance numérique » et établissement d'une stratégie nationale de cybersécurité par le gouvernement

Création d'un label France Cybersecurity

MENACES

Développement d'acteurs internationaux

Question d'acceptabilité de la surveillance par les populations

SOURCES

Alliance pour la Confiance Numérique, 2013, *Observatoire de la filière de la confiance numérique en France*

Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises, 2012, *Les statistiques des services d'incendie et de secours*

DGPR, 2011, *Bilan détaillé des actions nationales 2011 de l'Inspection des Installations classées*

En toute sécurité, 2014, *Atlas 2014*

Haut Comité Français pour la défense Civile, 2011, *Risques et menaces exceptionnels – Quelle préparation ?*

INERIS, 2011, *Les « NaTech » à la croisée des risques majeurs*

MSI Reports, 2013, *Marché des systèmes de sécurité électroniques dans le secteur non résidentiel en France*

MSI Reports, 2014, *Le marché du contrôle d'accès électronique en France*

MSI Reports, 2014, *Marché des équipements de protection individuelle de la tête et du corps en France*

OCDE, 2013, *Report of the workshop on NaTech risk management*

Pôle Risques, 2013, *Feuille de Route stratégique*

PIPAME, 2015, *Analyse du marché et des acteurs de la filière industrielle française de sécurité*

GLOSSAIRE

ANSSI : Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information

ANTARES : Adaptation Nationale des Transmissions Aux Risques Et aux Secours, réseau numérique des services publics de sécurité civile

APSAD : Assemblée Plénière de Sociétés d'Assurances Dommages – la certification APSAD est une marque de certification attestant de la qualité d'un système de sécurité incendie

APT : Advanced Persistant Threat ou Menace Persistante Avancée

BYOD : Bring Your Own Device

CESTI : Centre d'Évaluation de la Sécurité des Technologies de l'Information

CLP : Classification, Labelling, and Packaging of substances and mixture : réglementation européenne sur la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et mélanges.

CNIL : Commission Nationale de l'informatique et des libertés

CNRFID : Centre National RFID

COFIS : Comité de la Filière des Industries de Sécurité

CRAN : Centre de Recherche en Automatique de Nancy

DAAF : Détecteur Autonome Avertisseur de Fumée

DGA : Direction Générale de l'Armement

DGAC : Direction générale de l'aviation civile

DMIS : Délégation ministérielle aux industries de sécurité

EPC : Établissement public communal

EPCI : Établissement public de coopération intercommunale

EPI : Équipement de protection individuelle

ETIC : Étude de l'Incendie en milieu Confiné

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des risques

INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

LAGIS : Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal

LAMIH : Laboratoire d'automatique de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines

LCFR : Laboratoire de Conduite et Fiabilité des Réacteurs

LCIS : Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes

LORIA : Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications

LETI : Laboratoire d'électronique et de Technologie de l'Information

LIE : Laboratoire des Incendies et Explosifs

LM2S : Laboratoire de Modélisation et de Sûreté des Systèmes

Natech : contraction de « naturel » et « technologique », un aléa naturel ayant un impact sur une installation industrielle entrainant un ou une série d'accidents avec des effets majeurs à l'extérieur du site.

OIV : Opérateur d'Importance Vitale

PCRD : Programme Cadre de Recherche et Développement

PIPAME : Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques

PPRN : Plan de Prévention des Risques Naturels

PPRT : Plan de Prévention des Risques Technologiques

RAPID : Régime d'Appui aux PME pour l'Innovation Duale

SGDSN : Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale

TETRAPOL : norme de radiocommunication numérique, principalement implémentée dans des matériels utilisés par des forces de sécurité

ZSP : Zone de Sécurité Prioritaire

© Fotolia

ENVIRONNEMENT

Définition

Au sein de cette étude, l'environnement recouvre les activités et pratiques de gestion durable de l'eau, des sols, de la qualité de l'air et des déchets, mises en place aussi bien par les opérateurs de services à l'environnement que les autres industriels, les collectivités ou encore les particuliers.

Ces activités et pratiques durables cherchent à limiter les pressions sur les écosystèmes à travers une exploitation des ressources naturelles raisonnée et respectueuse de la biodiversité. Elles se démarquent ainsi du régime de croissance économique et démographique actuel fondé sur une exploitation de plus en plus intensive des ressources. Ce régime accentuerait les menaces sur les équilibres naturels en amplifiant notamment les pollutions chimiques, atmosphériques, organiques et biologiques[1]. Il contribuerait directement au réchauffement climatique selon le 5e rapport du GIEC[2] publié en 2014 : « *l'influence humaine sur le système climatique est claire, les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) d'origine anthropique sont les plus élevées de l'histoire* ». La croissance démographique (7,3 milliards d'individus en 2015, 7,7 milliards en 2020) est par ailleurs couplée à un phénomène d'urbanisation qui accroît d'autant plus les pressions sur l'environnement (artificialisation des sols, menace sur la biodiversité, etc.) : 54 % de la population vit actuellement en zone urbaine et cette proportion devrait passer à 66 % d'ici 2050[3].

De la réduction des émissions de GES au recyclage des déchets, en passant par la gestion raisonnée des systèmes vivants et la préservation des écosystèmes, les enjeux pour un développement plus durable sont nombreux. Ils font l'objet d'une littérature abondante (rapports du GIEC, rapports de l'Agence Européenne, etc.) et motivent la prise d'initiatives politiques et règlementaires au niveau mondial (ex : Protocole de Kyoto – 1997 ; Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants – 2001 ; Cop 21-2015), national (ex : Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte – 2015) ou encore infranational (ex : Agenda 21 locaux).

© logoCOP21_FR2-01

Figure 1 : Projection de la population urbaine mondiale en 2050[4]

1 – La pollution biologique consiste à introduire une espèce exogène ou des organismes génétiquement modifiés dans un milieu, avec pour effet de le déséquilibrer. Contrairement aux pollutions organiques ou chimiques, qui se dégradent au cours du temps, elle se multiplie avec la reproduction du vivant. Si elle est devenue mineure en France, elle constitue toujours la première pollution dans de nombreux pays en développement, à l'image du choléra qui provoque 100 000 à 120 000 décès par an dans le monde (OMS).

2 – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

3 – ONU, 2014 : *World Urbanization Prospects.*

4 – UNICEF, 2012 : *Perspectives d'urbanisation en 2050.*

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / Transversale
1	Matériaux avancés et actifs	Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données massives	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique	Transversale
5	Internet des objets	Transversale
6	Infrastructures de 5ème génération	Transversale
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs	Transversale
8	Procédés relatifs à la chimie verte	Transversale
12	Robotique autonome	Transversale
16	Recyclage des métaux critiques et terres rares	Spécifique
17	Microfluidique	Transversale
18	Métaomique	Transversale
35	Gestion intelligente de l'eau	Spécifique
36	Technologies de diagnostic rapide (eau, air et sol)	Spécifique
37	Traitement des sols pollués	Transversale

Les grands enjeux et stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

Gestion de l'eau

Les enjeux liés à l'eau sont d'abord quantitatifs. L'accessibilité aux ressources hydriques reste très inégale au niveau mondial : 900 millions de personnes n'auraient pas accès à l'eau potable et 2,4 milliards de personnes ne disposeraient pas d'un système d'assainissement[5]. Selon un travail de recherche publié en 2012, ce déficit génère un coût global estimé à 1,5 % du Produit intérieur brut (PIB) mondial, avec des disparités importantes en fonction des régions (jusqu'à 4,5 % du PIB en Afrique subsaharienne[6]). Parallèlement, la consommation d'eau devrait continuer de croître avec l'urbanisation, comme le montre la figure 2.

Figure 2 : Évolution entre population urbaine et consommation d'eau sur la période 1959-2030[7]

Les situations de stress hydrique devraient par ailleurs s'intensifier sous l'impact du réchauffement climatique, dont les conséquences pourraient varier selon les régions du globe : les précipitations devraient augmenter dans les hautes latitudes et certaines zones des tropiques, mais baisser dans les latitudes plus basses (région méditerranéenne, zones subtropicales, etc.). Les évènements climatiques extrêmes devraient par ailleurs gagner en ampleur (précipitations intenses, cyclones tropicaux, inondations liées à la montée des mers, etc.). En conséquence, si les interrelations entre le climat et le cycle de l'eau sont complexes à analyser, le GIEC estimait dans un rapport dédié au sujet publié en 2008 que le nombre de personnes souffrant d'un manque d'eau pourrait tripler au cours du XXIe siècle, pour atteindre 3,2 milliards d'individus[8].

Les enjeux de l'eau sont également qualitatifs : améliorer la qualité de l'eau, préserver et restaurer les ressources hydriques. Au niveau européen, le « bon état des eaux » est prescrit par la Directive cadre sur l'eau (2000/60/CE), qui impose une meilleure gestion des eaux souterraines et la réduction, voire la suppression des substances dangereuses. Comme l'indique la figure 3, les rejets domestiques, agricoles et industriels constituent les trois principales sources de pollution de l'eau. Depuis 1998, on constate en France une baisse de la pollution des cours d'eau par les macropolluants, due notamment au développement des stations d'épuration et à l'amélioration de leur performance. Les teneurs des cours d'eau en orthophosphates, ammonium et DBO (demande biochimique en oxygène) sont également stables. Toutefois, aucune baisse significative pour la teneur en nitrates n'est observée.

5 – OMS / UNICEF.

6 – OMS, 2012 : *Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG target and universal coverage.*

7 – UN Water, 2010 : *World urbanization prospects.*

8 – IPCC, 2008 : *Technical Paper on Climate Change and Water.*

Figure 3 : Principales sources de pollution de l'eau en France[1]

Une meilleure gestion de l'eau et des milieux aquatiques, couplée notamment à l'installation de nouveaux procédés à faible consommation, seront déterminants pour garantir une eau de qualité et en quantité suffisante dans toutes les régions du globe, même les plus arides.

Qualité de l'air

La concentration croissante de GES[10] dans l'atmosphère terrestre constitue l'un des facteurs du réchauffement climatique[11], et leur diminution un véritable enjeu. En France, si l'agriculture, la sylviculture, l'industrie manufacturière et l'industrie de l'énergie ont réduit leurs émissions ces vingt dernières années, la tendance inverse peut être constatée pour les secteurs des transports, les secteurs tertiaire, institutionnel et commercial ainsi que le traitement des déchets (figure 4).

Figure 4 : Émissions de GES par secteur en France en 1990 et 2009[12]

Second enjeu en matière de qualité de l'air, la concentration des polluants[13] atmosphériques peut être d'origine naturelle (émissions volcaniques, foudre, radon, etc.), mais également d'origine humaine : transport, industrie, chauffage des bâtiments, agriculture (utilisation d'engrais azotés, de pesticides, etc.).

9 – IFEN, 2006 : *L'Environnement en France.*

10 – Ces composants gazeux absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et contribuent à l'effet de serre.

11 – Les principaux gaz à effet de serre naturels présents dans l'atmosphère sont la vapeur d'eau (H2O), le dioxyde de carbone (CO2), le méthane (CH4), le protoxyde d'azote (NO2) et l'ozone (O3). Ceux d'origine industrielle comprennent des hydrocarbures halogénés comme les hydrochlorofluorocarbures, le HCFC-22, les chlorofluorocarbures (CFC), le tétrafluorométhane (CF4) ou encore l'hexafluorure de soufre (SF6).

12 – Inventaire national d'émissions de gaz à effet de serre réalisé par le CITEPA (mai 2011).

13 – Par « polluant », on désigne un agent physique, chimique ou biologique à l'origine d'une altération de la qualité d'un milieu.

Figure 5 : Principaux émetteurs de polluants[14]

Des avancées politiques et réglementaires ont toutefois permis d'améliorer la qualité de l'air en milieu urbain depuis les années 2000, comme le montre la figure 6.

Figure 6 : Pollution de l'air en milieu urbain en France métropolitaine[15]

Toutefois, un récent rapport de l'Agence Européenne de l'Environnement démontre que les plafonds d'émissions fixés pour le NH3, les NOx et les composés organiques volatiles non méthaniques sont régulièrement dépassés par les États-membres[16].

Aujourd'hui, il existe une problématique sanitaire et environnementale autour des particules fines. À titre d'exemple, les particules fines issues de la combustion du diesel, classées comme cancérogènes par l'Organisation Mondiale de la Santé, causeraient 42 000 décès par an en France selon une étude réalisée en 2005[17]. Même à des niveaux d'exposition faibles, ces particules accroîtraient le risque de mortalité immédiate.

Les problématiques liées à l'air intérieur sont également clés, les espaces clos dégageant de nombreux polluants. Selon la base de données de l'OMS, 4,3 millions de personnes mourraient chaque année prématurément de maladies imputables à la pollution de l'air à l'intérieur des habitations, qui résulte d'une utilisation inefficace de combustibles solides.

Protection des sols

Les sols sont nécessaires aux équilibres environnementaux (protection de la biodiversité, stockage du CO_2, etc.) et constituent une ressource essentielle de la croissance économique (par l'agriculture notamment). Toutefois, leurs processus lents de formation et de régénération ne peuvent compenser la dégradation accélérée provoquée par les activités humaines (érosion, tassement, salinisation, etc.). Les pollutions des sols ont des sources très diverses. Au-delà d'évènements naturels comme les retombées des cendres d'un volcan suite à une forte éruption, elles peuvent être d'origine industrielle (fuite, accident, abandon de site, etc.) ou agricole (épandage des produits phytosanitaires, rejets des bâtiments d'élevage et/ou des

14 – ADEME, 2009.

15 – Base de données nationale de la qualité de l'air, LCSQA, juillet 2013 / Traitements SOeS, 2013, France métropolitaine hors Corse.

16 – Agence Européenne de l'Environnement, 2015 : *Summer 2014 ozone assessment.*

17 – CAFE, 2005 : *CAFE CBA : Baseline analysis 2000 to 2020.*

exploitations). Elles peuvent également provenir des décharges et stations d'épuration.

En France, sur les 5 871 sites pollués recensés au sein de la base de données BASOL, on observe dans 70,7 % des cas une pollution des sols ou d'une nappe d'eau souterraine. Les hydrocarbures, le plomb et les HAP[18] en constituent les principaux polluants.

Figure 7 : Sites et sols pollués pour l'ensemble des industries en 2012[19]

L'enjeu de préservation des sols est d'autant plus critique que la demande alimentaire augmente, tirée par la croissance démographique mondiale. La surface cultivée disponible par personne diminue : de 0,38 ha en 1970, elle devrait passer à 0,15 ha en 2050[20]. Pour concilier la hausse de la production alimentaire et la préservation de l'environnement, plusieurs axes sont envisagés, en particulier l'amélioration de l'efficience et de la productivité agricoles ainsi que la réduction du gaspillage.

Gestion des déchets

Issus au niveau européen de la construction (34 %), des mines et carrières (27 %), de la fabrication (11 %), des ménages (9 %) et de l'approvisionnement en énergie (3 %), les déchets sont à 43,5 % des déchets minéraux. Au sein de l'UE, chaque personne générait près de 500 kg de déchets par an en 2013[21]. En 2014, le poids mondial des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) atteignait un record à 41,8 millions de tonnes[22].

Mal gérés, les déchets peuvent devenir des nuisances pour l'environnement. La plupart d'entre eux sont non dégradables sur une durée courte, à l'image des 10 millions de tonnes de déchets terminant chaque année dans les mers et océans, principalement sous forme de matières plastiques. Notamment ingérés par les espèces marines, ils contaminent les écosystèmes aquatiques et altèrent les chaînes alimentaires. Sur terre, d'autres déchets peuvent être assimilés par les organismes vivants, perturber leur fonctionnement voire générer des risques de santé publique.

Une meilleure gestion des déchets passe par leur réduction, réemploi, recyclage et valorisation (énergétique ou matière). En France, de plus en plus de matières premières de recyclage intérieures sont utilisées dans la production de l'acier, de papiers / cartons et de verre (cette tendance s'avère moins nette dans la production de plastiques et de métaux non ferreux). Par ailleurs, la part des matières premières primaires dans la production totale d'acier, de métaux non ferreux, de papiers-cartons, de verre et de plastiques a diminué depuis 1993 en valeur absolue comme relative.

Figure 8 : Origine des matières premières dans la production d'acier, de métaux non ferreux, de papiers-cartons, de verre et de plastiques en France entre 1993 et 2010[23]

Toutefois, d'autant plus au niveau mondial, des défis économiques et technologiques doivent être encore surmontés pour accélérer le recyclage des déchets. Des

18 – Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

19 – Inventaire 2012 national des matières et déchets radioactifs réalisé par le MEDDE et la DGPR (Basol au 16 janvier 2012) / Traitement : SOeS, 2012.

20 – Base de données de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

21 – Eurostat – 2013.

22 – United Nations University, 2015 : *The Global E-waste Monitor 2014: Quantities, Flows and Resources.*

23 – Ademe, 2012 : *Bilan annuel du recyclage.*

freins subsistent notamment pour le recyclage des métaux dits « critiques »[24]. En particulier, la compatibilité très variable entre ces différents métaux rend difficile la structuration d'une filière unique de recyclage.

Il convient finalement de préciser que les technologies de gestion durable de l'eau, des déchets, et l'air et des sols visant à apporter des réponses aux différents enjeux présentés ci-dessus, ont elles-mêmes un impact écologique non négligeable. L'extraction des matériaux nécessaires à leur production génère un coût environnemental souvent conséquent, auquel s'ajoute un faible taux de collecte et de recyclage. Ensuite, leur fonctionnement entraîne fréquemment un surcoût de consommation énergétique, à l'image des drones de cartographie pour la protection des sols. L'amélioration de l'efficacité écologique des technologies de gestion durable constitue donc un enjeu de premier plan, amené à s'amplifier dans les prochaines années.

RÉGLEMENTATION

La protection de l'environnement est encadrée par des politiques règlementaires et tarifaires. La prise de conscience environnementale a conduit à des initiatives volontaristes au niveau européen. L'action de la Communauté européenne débute dans les années 1970, avec l'adoption du premier Programme d'action pour l'environnement en 1972, et de nombreux actes communautaires suivent. Cette politique est inscrite dans les traités avec l'Acte unique européen (1986) et le Traité de Maastricht (1992). Le Traité d'Amsterdam (1997) prolonge cette évolution en intégrant le principe de développement durable[25] ; la protection de l'environnement devient une exigence à laquelle sont soumises toutes les politiques et actions de l'Union Européenne. Enfin, le Traité de Lisbonne (2009) ajoute un nouvel objectif avec la promotion, sur le plan international, de mesures destinées à faire face aux problèmes régionaux ou planétaires de l'environnement, et en particulier la lutte contre le changement climatique[26].

Gestion de l'eau

L'Union Européenne a adopté des mesures pour prévenir la pollution des eaux (normes de qualité pour l'eau, établissement de valeurs limites par exemple pour les nitrates ou la qualité des eaux résiduaires urbaines). La Directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE) en est la pierre angulaire, et vise pour 2015 l'atteinte d'un « bon état de l'eau ».

En France, les pouvoirs publics mettent en place des politiques dédiées dans cette direction, dont les principaux instruments sont les schémas directeurs de gestion et d'aménagement des eaux (SDAGE) et leur programme de mesures associé (PDM). Au nombre de 12 pour chacun des grands bassins hydrographiques français, les SDAGE et PDM planifient pour 6 ans les orientations stratégiques et actions à suivre. Un nouveau plan à horizon 2015-2021 est en cours d'élaboration avec une optique d'amélioration de la qualité physico-chimique et biologique.

Qualité de l'air

L'objectif de la Commission européenne est de réduire de 40 % d'ici 2020 (par rapport au niveau de 2000) le nombre de décès liés à la pollution atmosphérique. À cette fin, la réglementation en matière de pollution de l'air cherche à réguler aussi bien les sources fixes (sites industriels) que les sources mobiles (transports). Les règlementations des pays-membres de l'UE sont principalement indexées sur la Directive (2008/50/CE) du 21 avril 2008 *Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe*[27]. La Directive 2001/81/CE, actuellement en cours de révision pour être indexée sur l'objectif de réduction du nombre de décès à l'horizon 2020, vise à réduire les émissions de certains polluants atmosphériques (dioxyde de souffre, oxydes d'azote, composés organiques volatils et ammoniac).

La réduction des émissions de GES constitue le second axe fort de la réglementation. En octobre 2014, les dirigeants européens se sont notamment accordés pour réduire ces émissions de 40 % en Europe d'ici 2030 par rapport au niveau de 1990. Cet objectif ambitieux vise à faire du continent européen un territoire leader dans le domaine de la lutte contre le changement climatique. Au niveau mondial, l'un des enjeux de la COP21 (Conférence des Parties), organisée

24 – Un métal est dit « critique » lorsqu'il possède un rôle clé pour l'économie et lorsque les risques pesant sur son approvisionnement sont forts. En 2010, la Commission Européenne sur les approvisionnements en matières premières a identifié 14 métaux critiques (indium, magnésium, tungstène, rhénium, tellure, tantale, germanium, etc.).

25 – « Développement qui répond aux besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs ».

26 – Article 191 du Traité sur le Fonctionnement de l'Union Européenne (TFUE).

27 – CAFE.

à Paris fin 2015, sera de trouver un accord pour remplacer le protocole de Kyoto, qui fixait les objectifs internationaux en matière de réduction des GES depuis 1997.

Par ailleurs, des plafonds d'émissions sont fixés au niveau européen pour contrôler le rejet de substances appauvrissant la couche d'ozone. Les normes EURO VI s'appliquent par exemple à tous les véhicules utilitaires lourds mis en service depuis le 1er janvier 2014.

Au niveau français, la qualité de l'air s'inscrit dans le cadre plus vaste de la préservation de la santé environnementale[28]. Celle-ci a été établie comme l'une des priorités du Grenelle de l'Environnement, organisé en 2007. Les engagements pris à la faveur du Grenelle ont ensuite été déclinés en un plan d'action au sein du 2e Plan national santé environnement pour la période 2009-2013. Le 3e Plan national 2015-2019, tout juste entré en vigueur, avance des mesures comme la surveillance des pesticides dans l'air.

Protection des sols

En 2014, la Commission européenne a écarté définitivement un projet de directive européenne en faveur de la protection des sols qui remontait à 2006. L'absence d'un texte dédié n'exclut pas pour autant toute réglementation en la matière. La Politique Agricole Commune (PAC) 2015-2020 définit notamment qu'environ 30 % de ses aides seront conditionnées au respect par les agriculteurs de trois critères : la diversité de l'assolement, le respect du taux de Surface d'Intérêt Écologique (SIE – 5 % de la surface arable pour toutes les exploitations détenant plus de 15 ha de terres cultivées) et le maintien de certaines prairies permanentes. La PAC vise ainsi à favoriser les pratiques durables dans le secteur de l'agriculture.

Par ailleurs, la gestion durable est au cœur de la nouvelle stratégie européenne en faveur des forêts, lancée en 2013. Cette stratégie a notamment vocation à favoriser au sein des États-Membres de l'UE une exploitation des ressources-bois respectueuse des écosystèmes et de la biodiversité.

Enfin, au niveau national, le Code de l'Environnement définit un certain nombre d'obligations pour les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)[29], qui incluent par exemple la constitution de garanties financières, l'information de l'acheteur du terrain où a été exploitée une ICPE ou encore la remise en état du site lors d'une cession d'activités. Les orientations à suivre pour le traitement des sols ont par ailleurs été orientées par deux circulaires successives (18/10/2005 ; 08/02/2007). Celles-ci expliquent notamment que le traitement de chaque site doit dépendre de son impact effectif sur l'environnement et de l'usage auquel il est destiné.

Gestion des déchets

Au niveau européen, la gestion des déchets est règlementée par la Directive-cadre sur les déchets (2008/98/CE) et repose sur la prévention, le recyclage, la réutilisation des déchets et l'amélioration des conditions de leur élimination finale. Elle est abordée de façon plus spécifique et sectorielle au sein des Directives relatives aux emballages et déchets d'emballages (94/62/CE), aux déchets d'équipements électriques et électroniques (2002/96/CE) ou encore à la gestion des déchets de l'industrie extractive (2006/21/CE).

Au niveau français, des objectifs de réduction et recyclage des déchets ont été fixés en s'indexant sur cette législation européenne au sein du Programme national de prévention des déchets 2014-2020. Ces objectifs comprennent notamment une diminution de 7 % des déchets ménagers et assimilés en 2020 par rapport au niveau de 2010 ainsi qu'une stabilisation voire un infléchissement de la production de déchets des activités économiques et des déchets du BTP d'ici 2020. Pour les DEEE, une volonté a été affichée de développer la collecte « préservante », un modèle de recyclage qui vise à conserver l'état du déchet collecté depuis sa prise en charge jusqu'à son entrée en centre de tri – réparation.

Par ailleurs, l'Union européenne a pris de nombreuses mesures afin de prévenir les déchets dangereux de source industrielle. Le règlement REACH (1907/2006/CE) relatif à l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des produits chimiques à horizon 2020, constitue un cadre pour la gestion des produits chimiques impliquant l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur. D'autres législations comme la Directive Seveso (96/82/CE), relative à la limitation de l'utilisation de certaines

28 – La santé environnementale regroupe les aspects de la santé qui sont influencés par l'environnement.

29 – Le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie définit les ICPE comme *« les installations et usines susceptibles de générer des risques ou des dangers »*.

substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, dite RoHS (2002/95/CE), et la Directive biocides (98/8/CE), couvrent des risques chimiques et technologiques spécifiques.

MARCHÉ

Les marchés de la gestion durable de l'environnement ont subi une évolution très rapide depuis dix ans. Bornés essentiellement à la simple problématique de la dépollution, ils se sont progressivement étendus à de nouveaux enjeux avec l'introduction de produits et technologies « propres » dans la plupart des secteurs de l'économie. La demande s'oriente de plus en plus vers des produits de substitution plus facilement recyclables et des procédés de production moins polluants. Dans un cadre industriel, l'optimisation de l'énergie et de l'eau est également facilitée par des technologies logicielles de plus en plus performantes, permettant un suivi précis des consommations.

En 2008, le PNUE évaluait ainsi le poids du marché mondial des écotechnologies (incluant les écotechnologies dans le domaine de l'énergie) à 1 400 milliards d'euros, soit 2,5 % du PIB mondial. Il devrait connaître une croissance d'environ 10 % par an, tirée essentiellement par les nouveaux secteurs en lien avec l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables ainsi que par les pays émergents. En 2020, il devrait atteindre 3 100 milliards d'euros, la gestion des déchets, le traitement de l'eau, la pollution de l'air et la dépollution des sites et sols pollués représentant respectivement 40,1 %, 38,5 %, 6,4 % et 3,1 % de ce marché[30].

Parmi les grands bouleversements à l'œuvre dans les services à l'environnement, les opérateurs traditionnels voient l'irruption de nouveaux acteurs sur les marchés de la gestion de l'eau[31]. Les entreprises des services du numérique investissent le segment en plein essor de la gestion de l'eau intelligente (*smart water*), qui regroupent les technologies permettant le pilotage en temps réel et centralisé des usines d'eau, des réseaux et de la gestion client dans une optique d'optimisation du service. Pour répondre à cette nouvelle concurrence, particulièrement forte dans les pays émergents, les opérateurs français Suez Environnement et Veolia ont chacun lancé leur propre projet de *smart water* à partir de 2013.

En France, les dépenses pour la protection de l'environnement n'ont cessé d'augmenter depuis les années 90, comme l'indique le graphique suivant (dépenses combinées des ménages, des entreprises et des administrations) :

Figure 9 : Évolution de la dépense de protection de l'environnement et du PIB en France[32]

Plus précisément, pour le marché français :

- La dépense de protection de la qualité de l'air est estimée en 2010 à 3,1 milliards d'euros, dont 1,2 milliards d'euros proviennent des dépenses courantes et des investissements des entreprises du secteur industriels, en croissance ;
- La dépense en gestion des eaux usées, s'élevant à 12,8 milliards d'euros en 2012, est stable depuis 2009 en raison notamment d'une contraction des investissements ;
- La dépense nationale de gestion des déchets atteint 16,7 milliards d'euros, avec une croissance annuelle moyenne de 5 % depuis 2000. Cette hausse s'explique notamment par une amélioration de la qualité des modes de gestion des déchets et le dispositif fiscal TEOM[33], qui progresse indépendamment des quantités de déchets produits ;
- Les dépenses pour la protection et l'assainissement des sols, estimées à 1,7 milliards d'euros, progressent sous l'impulsion en particulier des entreprises.

PRODUCTION

Les exigences réglementaires en matière environnementale entraînent le développement de nouveaux métiers. En 2012, les éco-activités (y compris

30 – PNUE, 2008 : *Green Jobs: Towards Sustainable Work in a Low-Carbon World.*

31 – Les Echos, 20/11/2014 : « Veolia et IBM s'allient dans la « smart water ».

32 – SOeS, 2013.

33 – Taxe d'Enlèvement des Ordures Ménagères.

énergies renouvelables)[34] représentaient en France 447 500 emplois en équivalent temps plein pour une production de 85 milliards d'euros.

Figure 10 : État des lieux et évolution de l'emploi environnemental en France[35]

Sur le marché du travail, en 2013, l'économie verte[36] représentait 13 % des offres d'emplois déposées par les employeurs auprès de Pôle emploi. L'eau, l'assainissement, les déchets et l'air en représentaient 5,6 %.

Les grandes tendances

TECHNOLOGIQUES

Gestion de l'eau

La production d'eau potable constitue l'un des premiers objectifs des avancées technologiques actuelles. Elle sous-tend le développement de techniques à tous les niveaux de la chaîne de gestion de l'eau : captage, transport (raccords, tuyaux, pompes, vannes, filtres, etc.), traitement (séparation et purification en milieu liquide : nano et ultra-filtration, utilisation de membranes de dessalement, etc.) et assainissement (dégrillage, dessableur, bioréacteurs, systèmes pour l'assainissement non collectifs, etc.).

Parallèlement, les technologies permettent une connaissance toujours plus précise des ressources hydriques. En particulier, les outils de cartographie sont largement utilisés dans la gestion de l'eau. À titre d'exemple, ceux développés par l'ONEMA synthétisent les données sur l'eau, la qualité des milieux aquatiques et leurs usages (prix de l'eau, teneurs en nitrates, niveau des nappes, etc.) en France métropolitaine et en Outre-Mer. Sur site, les besoins en outils de diagnostic rapide sont de plus en plus importants pour détecter d'éventuelles traces en milieu aqueux (effluents industriels notamment), prendre des décisions dans un temps court et réaliser un suivi en continu de la qualité. Enfin, les équipements *smart water* permettent d'optimiser la gestion de l'eau à travers la collecte, l'analyse et le traitement des données de desserte et de consommation en temps réel grâce à l'installation de capteurs et d'équipements de télésurveillance/télérelève.

Qualité de l'air

L'assainissement de l'air extérieur (GES, microparticules atmosphériques, etc.) et intérieur (particules provenant des moquettes et revêtements, appareils à combustion, etc.) couvre une diversité de chantiers

34 – Celles-ci regroupent les activités qui produisent des biens et services ayant pour finalité la protection de l'environnement ou la gestion des ressources naturelles. Les activités transversales à plusieurs domaines environnementaux en font également partie.

35 – Données du marché du travail de la Dares et de Pôle Emploi, 2014 / Traitement SOeS

36 – Le périmètre des métiers de l'économie verte, défini dans le cadre des travaux de l'Observatoire national des emplois et métiers de l'économie verte (Onemev112), est constitué de deux ensembles :
Les métiers verts : *« métier dont la finalité et les compétences mises en œuvre contribuent à mesurer, prévenir, maîtriser, corriger les impacts négatifs et les dommages sur l'environnement »* ;
Les métiers verdissants : *« métier dont la finalité n'est pas environnementale, mais qui intègre de nouvelles « briques de compétence » pour prendre en compte de façon significative et quantifiable la dimension environnementale dans le geste métier »*.

technologiques. Les recherches actuelles portent notamment sur l'amélioration de la mesure, du captage et filtration des poussières et la classification des particules. Des solutions métrologiques et d'instrumentation novatrices permettent de détecter avec précision les traces de pollution dans l'air, à l'image de drones urbains à l'étude en Chine pour l'air extérieur[37] ou d'appareils intelligents mesurant en continu le niveau de polluants dans un espace clos[38].

Protection des sols

La dépollution des sols est permise notamment par des traitements biologiques (utilisation de bactéries), des traitements par extraction (chauffage des sols pour volatilisation des polluants) et par confinement / encapsulation (stockage du sol au sein d'une alvéole). Parmi les tendances actuelles, le traitement *in situ* (dépollution sans excavation qui regroupe des techniques comme le *venting*, le *stripping* ou le lessivage) rencontre un intérêt croissant depuis le milieu des années 2000[39]. Le traitement biologique élargit progressivement son champ d'application en s'ouvrant aux sols contaminés par des déchets compliqués à traiter, tels que les déchets plastiques. Par ailleurs, de nouveaux outils technologiques permettent d'obtenir une connaissance plus fine des sols et de leurs caractéristiques, avec en toile de fond l'émergence de la métagénomique des écosystèmes[40].

L'usage de drones et satellites se développe également pour observer l'étalement urbain, dans une optique de lutte contre l'artificialisation des sols et de la préservation de leur biodiversité. Depuis 2010, l'imagerie satellitaire est notamment utilisée pour cartographier les trames vertes et bleues sur le territoire français[41].

Gestion des déchets

L'innovation technologique se déploie à tous les maillons de la chaîne de gestion des déchets, qui étaient traités en 2011 par incinération à 31 %, simple décharge à 30 %, valorisation matière à 24 % et gestion biologique (compostage/méthanisation des déchets organiques) à 15 %[42].

En amont de la chaîne, le développement de matériaux d'emballage et de surface plus facilement recyclables vise à anticiper leur valorisation à terme dès l'étape de la production. Ensuite, le tri des déchets est facilité par de nouvelles techniques telles que les outils de déconditionnement de produits alimentaires ou les technologies optiques. Enfin, la valorisation matière ou énergétique s'ouvre à de nouveaux déchets et applications : recyclage et valorisation des boues d'épuration, traitement des déchets solides par oxydation avancée, optimisation des déchets minéraux pour le BTP, récupération du CO_2, etc. La valorisation des métaux, en particulier les métaux critiques, constitue à ce titre un champ de R&D de premier plan. C'est également le cas des matériaux biosourcés réalisés à partir de matières recyclées. La ouate de cellulose, fabriquée à partir de déchets de papiers et cartons, peut notamment se révéler un isolant performant dans la construction.

INDUSTRIELLES

Sur le plan industriel, les préoccupations écologiques, les pressions réglementaires et la nécessité d'optimiser les consommations de ressources dans un contexte économique contraint se traduisent par une volonté de rendre plus « propres » les outils de production (produits et process) en s'appuyant sur le développement technologique.

L'amélioration des intrants de la production constitue un premier axe d'efficacité environnementale. En effet, la chimie des produits biosourcés ouvre des pistes prometteuses pour la production de nouveaux matériaux (matériaux biosourcés), produits chimiques ou carburants notamment. Cette dernière s'appuie largement sur les biotechnologies industrielles consistant au développement de procédés industriels basés sur l'usage de microorganismes ou d'enzymes par exemple. La diminution de l'impact environnemental des process industriels représente un second champ d'innovation. Les technologies explorées incluent par exemple les procédés d'extraction en eau subcritique, la découpe à l'azote

37 – ConsoGlobe, 27/04/2014 : « Pollution chinoise : et si on envoyait des drones ? ».

38 – IT Industries&Technologies, 18/12/2014 : « Des matériaux nanoporeux pour mesurer la qualité de l'air intérieur ».

39 – Le Moniteur, 24/11/2006 : « Traitements des terres souillées – La dépollution in situ en plein essor ».

40 – Étude de l'ensemble des génomes issus d'un même milieu et de leurs interactions.

41 – IRSTEA.

42 – ADEME, 2014 : *Déchets, chiffres-clés – Édition 2014.*

liquide ou encore les procédés thermochimiques. La maîtrise des extrants de la production constitue un dernier axe pour améliorer la performance environnementale des industries. Cette maîtrise passe notamment par une valorisation énergétique ou matière des effluents ou encore un stockage des émissions de GES issus de la production.

D'USAGE

La gestion durable passe également par l'innovation dans les usages des industriels et des citoyens. En particulier, les premiers mettent en place des démarches relevant de l'économie circulaire en décloisonnant la gestion de l'eau, des sols, de l'énergie et des déchets. Les boues de récupération issues du traitement de l'eau sont par exemple valorisées pour produire de l'électricité et de la chaleur. Les eaux usées deviennent des gisements de matière organique pour la production de bioplastiques. Cette transversalité nouvelle nécessite une coopération renforcée entre les entreprises, mais également avec les pouvoirs publics. Les projets d'écologie industrielle[43], consistant à optimiser les flux de matière et d'énergie au niveau d'une zone d'activités, constituent de bons exemples de coordination entre acteurs et collectivités à l'échelle d'un territoire.

Enfin, les citoyens jouent un rôle clé pour la diffusion de pratiques respectueuses de l'environnement, en se tournant de plus en plus vers les circuits courts de distribution ou les marchés de l'occasion. En tant qu'usagers des services essentiels, ils peuvent participer également de plus en plus directement aux services à l'environnement avec le développement de l'internet mobile et d'applications participatives : signalement en temps réel d'une fuite d'eau sur la chaussée, retour qualitatif sur le service de collecte des déchets, contribution à des bases de données environnementales collectives, etc. L'association française Aristote, qui regroupe des organismes de recherche, des instituts d'enseignement et des entreprises des nouvelles technologies de l'information et de la communication, évoque à ce sujet l'émergence du « citoyen capteur ».

43 – En juillet 2014, OREE, association de promotion des pratiques de gestion durable à l'échelle des territoires, recensait une cinquantaine de projets d'écologie industrielle en cours en France.

La position de la France

INDUSTRIELLE

En 2012, la France était le 5e exportateur mondial dans le domaine des éco-industries, disposant notamment de leaders mondiaux pour l'eau et les déchets. Le volume d'activités de certains secteurs a progressé rapidement, en raison notamment de l'amplification des enjeux environnementaux. Entre 2000 et 2010, le chiffre d'affaires des entreprises françaises de dépollution a par exemple été multiplié par 2,5 pour atteindre 470 millions d'euros, selon le Ministère de l'Écologie. Selon la Direction générale du trésor, la France reste toutefois peu positionnée sur les technologies dites « préventives », permettant de limiter l'impact des activités économiques sur l'environnement (réduction des déchets, etc.), se concentrant plutôt sur les technologies dites « curatives » (dépollution).

Gestion de l'eau

La filière de l'eau regroupe des sociétés d'ingénierie, qui conçoivent et construisent des stations de production et d'épuration, des fabricants d'équipements et produits pour ces stations, des entreprises spécialisées dans le captage et le forage et enfin des opérateurs de gestion, d'exploitation et de maintenance des installations d'eau et d'assainissement.

La France occupe une position de leader au niveau mondial. Disposant d'une forte capacité de recherche et d'innovation, la filière est structurée autour de grands opérateurs français comme Veolia et Suez Environnement, qui desservent plus de 200 millions d'habitants dans le monde, et d'une diversité de PME spécialisées.

Qualité de l'air

La filière du traitement de l'air intérieur est encore émergente en France et mal quantifiée. Elle regroupe principalement des sociétés spécialisées dans les équipements de métrologie et surveillance de l'air et des entreprises de génie climatique, fabricants et installateurs. La qualité de l'air extérieur, dépendante principalement des transports, de l'industrie, du secteur résidentiel et de l'agriculture, s'est structurée depuis la fin des années 1990. La France dispose d'un leader européen dans le secteur : Environnement SA.

Protection des sols

La France dispose de savoir-faire reconnus concernant la dépollution des sols. En matière d'ingénierie technique, certains acteurs français possèdent une dimension internationale comme AnteaGroup ou Burgeap. C'est également le cas pour les sociétés françaises de travaux de dépollution, au premier rang les filiales des principaux opérateurs de services à l'environnement (GRS Valtech pour Veolia et Sita Remediation pour Suez Environnement), bien implantées sur le marché européen. Aux côtés de ces « poids lourds » du secteur, nombre de PME proposent souvent des prestations spécialisées en s'adressant davantage au marché français.

Gestion des déchets

En 2012, la France se classait en dixième position au niveau européen en matière de gestion des déchets selon un classement établi par la Commission Européenne, derrière l'Autriche, les Pays-Bas, le Danemark ou encore l'Allemagne. La quantité totale de déchets recyclés ou encore la tarification de l'élimination des déchets étaient notamment jugées insuffisantes, malgré la mise en place depuis le milieu des années 1990 de la responsabilité élargie des producteurs (REP), qui impose la constitution de filières de recyclage dans un nombre toujours plus grand de secteurs. Toutefois, les principaux groupes français (Veolia, Suez Environnement, Séché Environnement, etc.) de la gestion des déchets vont davantage chercher des relais de croissance à l'international, avec l'objectif en particulier de capter la demande de plus en plus forte des pays émergents[44].

La filière française de la gestion des déchets peut par ailleurs s'appuyer sur de nombreux projets de R&D, qui associent le secteur privé, des pôles de compétitivité et des établissements publics. Fédérés autour de l'entreprise Pellenc Selective Technologies, le consortium d'une dizaine de partenaires industriels et académiques du projet TRI + ont par exemple développé une nouvelle génération de machines de tri optique entre 2009 et 2013. Intégrant des technologies photoniques, le projet vise à proposer des solutions de tri pour certains déchets qui ne bénéficient pas de solutions performantes et améliorer le tri des déchets déjà triés[45].

44 – UBIFRANCE, 2011 : *Le marché de la gestion des déchets et du recyclage.*

45 – ADEME, 2013 : *Le savoir-français dans le domaine de la gestion des déchets.*

ACADÉMIQUE ET ÉCOSYSTÈME DE L'INNOVATION

En 2012, la dépense hexagonale de R&D dans le domaine de l'environnement atteignait 4,3 milliards d'euros, les administrations y contribuant à hauteur de 1,7 milliards d'euros[46]. Dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA), 150 millions d'euros ont notamment permis de doter en 2012 un fonds d'investissement en appui des PME innovantes dans le domaine des « *green tech* » (FCPR Ecotechnologies).

L'écosystème français de l'innovation dans le domaine de l'environnement est représenté dans le graphique ci-dessous :

Figure 11 : Écosystème de l'innovation en France dans le domaine de l'environnement (Source : ALCIMED)

Ces acteurs ont des champs de recherche multiples. À titre d'exemple, l'ANDRA[47] a lancé en 2014 un appel à projets pour rendre plus performants le tri et l'orientation des déchets issus du démantèlement des installations nucléaires françaises. L'ADEME[48] et l'INRA[49] ont par ailleurs étudié récemment plusieurs scénarios technologiques afin de réduire la production de CO_2 et de NO_2 et explorer les possibilités de stockage souterrain du carbone atmosphérique.

46 – SOeS, Compte Satellite de l'environnement, 2014.

47 – Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs.

48 – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

49 – Institut national de la recherche agronomique.

Analyse AFOM

ATOUTS

Position *leader* de la France dans les services à l'environnement

Groupes internationaux avec de fortes capacités d'investissement

Écosystème d'innovation dense et dynamique

FAIBLESSES

Faible positionnement des acteurs français sur les technologies préventives par rapport aux technologies curatives

OPPORTUNITÉS

Développement sur les marchés des pays émergents, notamment pour le traitement des pollutions biologiques non résolues

Rôle actif de la France lors de grands rendez-vous internationaux pour le développement durable (ex : COP21)

Structuration de nouvelles filières ouvrant de nouveaux débouchés pour les acteurs français (ex : recyclage des métaux critiques)

Possibilité d'établir des collaborations avec les concurrents locaux en émergence

MENACES

Concurrence forte d'autres pays de l'OCDE (Allemagne, Israël, etc.), notamment sur les marchés de la gestion intelligente de l'eau et des déchets

Emergence de concurrents locaux sur les marchés de l'environnement à l'international dans les pays émergents

SOURCES

Améliorer la qualité de l'air extérieur, agir dans tous les secteurs, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2014

Baseline Analysis 2000 to 2020, Clean Air for Europe (CAFE) Programme, 2005

Bilan annuel du recyclage, Ademe, 2012

CAFE CBA : Baseline analysis 2000 to 2020, CAFE, 2005

Déchets, chiffres-clés – Edition 2014, ADEME

Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG target and universal coverage, Hutton, 2012

Green Jobs: Towards Sustainable Work in a Low-Carbon World, PNUE, 2008

Inventaire national d'émissions de gaz à effet de serre, mai 2011, CITEPA

L'économie de l'environnement en 2012, Commissariat Général au Développement Durable, 2014

Le marché de la gestion des déchets et du recyclage, UBIFRANCE, 2011

Le savoir-faire français dans le domaine de la dépollution des sols et des eaux souterraines, ADEME, 2011

Le savoir-français dans le domaine de la gestion des déchets, ADEME, 2013

Marché mondial de l'environnement et perspectives pour les éco-entreprises françaises, Direction générale du trésor et de la politique économique, 2010

Summer 2014 ozone assessment, Agence Européenne de l'Environnement, 2015

Technical Paper on Climate Change and Water, IPCC, 2008

The Global E-waste Monitor 2014: Quantities, Flows and Resources, United Nations University, 2015

World urbanization prospects, UN Water, FAO Aquastat, 2010

« Des matériaux nanoporeux pour mesurer la qualité de l'air intérieur », 18/12/2014, IT Industries&Technologies

« Pollution chinoise : et si on envoyait des drones ? », 27/04/2014, ConsoGlobe

« Traitements des terres souillées – La dépollution in situ en plein essor », 24/11/2006, Le Moniteur

« Veolia et IBM s'allient dans la « smart water », 20/11/2014, Les Echos

www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/

www.terre-net.fr/

www.ec.europa.eu/eurostat

GLOSSAIRE

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

AEE : Agence Européenne pour l'Environnement

ANDRA : Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CAFE : Clean Air For Europe

CIRAD : Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement

FAO : Food and Agricultural Organization

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

INRA : Institut national de la recherche agronomique

IRSTEA : Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

ONEMA : Office national de l'eau et des milieux aquatiques

ONERA : Office national d'études et de recherches aérospatiales

PNUE : Programme des Nations-Unies pour l'Environnement

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

© Fotolia

HABITAT

Définition

Le domaine Habitat regroupe pour cette étude les secteurs du logement et des bâtiments pour le tertiaire. Le terme « bâtiments pour le tertiaire » est à considérer au sens large, il regroupe à la fois les bureaux, les cafés, hôtels et restaurants, les commerces et les établissements publics tels que les établissements d'enseignement et les hôpitaux. De plus, de nombreuses technologies sont communes entre le logement et le tertiaire.

L'habitat est lié aux secteurs suivants :

- Production des matériaux de construction,
- Bâtiment (conception, construction, rénovation, réhabilitation, exploitation, maintenance),
- Mobilier et aménagement intérieur de l'habitat,
- Exploitation énergétique de l'habitat,
- Gestion immobilière (promotion immobilière).

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / transversale
1	Matériaux avancés et actifs	Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données massives	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique	Transversale
5	Internet des objets	Transversale
6	Infrastructures de 5ème génération	Transversale
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs	Transversale
8	Procédés relatifs à la chimie verte	Transversale
9	Fabrication additive	Transversale
13	Communications sécurisées	Transversale
14	Technologies immersives	Transversale
15	Procédés relatifs à la chimie du pétrole	Transversale
38	Systèmes de rénovation du bâti existant	Spécifique
39	Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf	Spécifique
40	Systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment	Spécifique

Les grands enjeux et les stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

Les enjeux majeurs de l'habitat sont liés en France à une insuffisante dynamique de construction de nouveaux logements pour s'adapter aux modifications démographiques du pays (poursuite de la concentration urbaine, évolutions des revenus…).

Pour relever ce dynamisme, outre des mesures sur l'environnement juridique et fiscal (non traitées ici), les entreprises doivent prendre en compte la forte pression environnementale autour de l'habitat qui se concrétise autour des trois axes majeurs suivants :

1) la consommation énergétique du secteur et son impact sur les émissions de gaz à effet de serre,

2) une conception bioclimatique pour gérer les flux énergétiques naturels et intégrer le bâti dans son environnement,

3) l'impact environnemental des matériaux.

Ces trois axes sont successivement décrits ci-dessous.

La réhabilitation est aussi un enjeu important pour le pays. Avec 1 % à 2 % de turn over dans les logements et le tertiaire, ces contraintes environnementales doivent s'intégrer dans la rénovation.

Consommation énergétique du bâtiment

Le secteur du bâtiment est le premier secteur consommateur d'énergie en France avec 42 % de la consommation totale d'énergie finale[1]. L'habitat résidentiel et tertiaire est responsable de 22 % des émissions de gaz à effet de serre[2] soit environ 77 Mt de CO_2 en 2011. Cette réalité fait du secteur du bâtiment le gisement d'économie d'énergie le plus important

1 – Centre d'analyse stratégique, « Des technologies compétitives au service du développement durable », 2012

2 – Ademe, « Chiffres clés bâtiment 2013 »

à moyen terme[3]. En conséquence, un effort important des pouvoirs publics est déployé pour réduire l'impact énergétique du bâtiment. Cela se traduit notamment par la mise en place des réglementations thermiques « RT » (décrites au paragraphe 3.2) dont la version 2020 repose sur le BEPOS (Bâtiment à énergie positive), concept également décrit au paragraphe 3.2.

Une conception du bâti adaptée à son environnement direct et ses potentielles évolutions

Dans une ambition de réduction des consommations énergétiques, il est crucial de prendre en compte l'environnement direct des bâtiments dans leur conception ainsi que leur potentielle évolution liée notamment aux changements climatiques. En effet, les températures moyennes et les températures extrêmes auxquelles le bâtiment va être soumis influencent sa conception. Par exemple, en France, la RT 2012 a mis en place un découpage du territoire français en fonction des climats et pour chaque territoire la réglementation sur la construction est spécifiquement adaptée au climat.

Figure 1 : Carte des zones climatiques définies pour la RT2012

Des phénomènes comme la sécheresse, les inondations, les hausses ou les baisses de températures, engendrant par exemple des phénomènes de dilatation/rétractation des matériaux ont des impacts sur les bâtiments, leur résistance et leur durée de vie. Les îlots de chaleur urbains, déjà synonyme de microclimats urbains dans lesquels règnent des températures de quelques degrés supérieurs aux températures observées ailleurs, sont également des phénomènes à anticiper et limiter par la construction de zones urbaines adaptées.

Il est généralement considéré que les bâtiments construits aujourd'hui vont subsister pendant deux à quatre générations. Ceci implique donc que les futurs changements sont à penser dès maintenant, au risque de voir de nombreuses constructions inadaptées d'ici quelques décennies. De plus, le secteur du bâtiment lui-même pourrait subir des impacts directs dus par exemple aux intempéries qui auront pour effet d'allonger la durée du chantier et donc d'augmenter les coûts.

Malgré le fait que de nombreuses organisations (gouvernements, IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, UNEP - United Nations Environment Programme…) étudient et communiquent sur ces impacts, il n'y pas aujourd'hui de plan précis permettant de construire des habitats prenant en compte le changement climatique. En effet, bien que Météo France ait travaillé sur des projections climatiques pour la France[4], on considère aujourd'hui que les bâtiments sont vulnérables à la fois aux évolutions progressives de températures et aux évènements extrêmes et que les solutions techniques actuelles ne permettent pas de résister simultanément à ces deux phénomènes sauf à des coûts encore élevés[5], ce qui rend la prise en compte de ces phénomènes d'autant plus compliquée.

Mi-2015, en France, la réflexion progresse même si les impacts à l'horizon 2020 en termes de réglementation, incitations ou autres mesures tels que les formations ne sont pas certains. En France, la réflexion est menée dans le cadre du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC). Cette réflexion a débuté en 2011 et s'achève en 2015. Peu d'éléments concernant ce plan sont disponibles mais le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie indique

3 – Magazine *Construire pour demain*, « Réglementation thermique 2020 : quelles normes environnementales dans le bâtiment de demain ? », 2013

4 – http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/changement-climatique/projections-climatiques/les-dernieres-projections-climatiques-pour-la-france

5 – http://www.annales.org/ri/2002/temp-08-02.html

déjà que la mesure phare de la thématique « Urbanisme et cadre bâti » consistera à renforcer l'exigence sur le confort d'été apporté par les bâtiments. Cela implique notamment d'intégrer dans la RT2020 un critère de confort d'été bien défini tenant compte à la fois de l'amplitude et de la durée de la surchauffe.

Simultanément, les orientations données en mai 2015 sur la Nouvelle France Industrielle font apparaître sous la rubrique « ville durable » des priorités concernant l'habitat et le tertiaire[6].

Impact environnemental des matériaux

L'impact environnemental des matériaux s'articule autour des déchets des chantiers de construction et de rénovation en eux-mêmes, et de l'impact environnemental tout au long du cycle de vie d'un bâtiment.

La production des déchets du BTP s'élève à 260 Mt en France, soit 34 % de la production totale de déchets. En France, une directive cadre adoptée en 2008 impose d'atteindre en 2020 la valorisation de 70 % (en masse) des déchets de construction, déconstruction, rénovation, réhabilitation. En 2014, seulement 45 à 50 % de ces déchets serait valorisé[7]. Étant donné les enjeux actuels liés à l'environnement, la gestion de déchets sur les chantiers prend de plus en plus d'importance. Des grands acteurs intègrent déjà dans leur offre une meilleure gestion des déchets. La gestion de cette problématique est avant tout organisationnelle : c'est notamment grâce à une coopération étroite entre le maître d'œuvre et la société de gestion des déchets que l'objectif de valoriser 70 % des déchets de chantier en 2020 pourra être atteint.

L'autre enjeu de l'impact environnemental est lié à l'impact des matériaux tout au long de la vie des bâtiments. Les réglementations sur les bâtiments neufs évoluent vraisemblablement vers la prise en compte des impacts environnementaux au sens large, avec plusieurs critères (énergie, carbone, eau, déchets…) en cycle de vie. Cela se traduit par l'écoconception globale du système constructif et du bâtiment. L'analyse du cycle de vie entier pousse les constructeurs à adopter des matériaux à bas carbone ou à faible énergie grise. On en trouve des exemples dans la forte sensibilité aux matériaux bio-sourcés, ou au développement de bétons « bas carbone ». Les solutions doivent prendre en compte l'intégration dans l'environnement, et notamment les stratégies de basse consommation, liées aux zones climatiques. C'est ainsi que se développent des associations innovantes de matériaux associant les qualités de chacune (ex : bois/béton), des solutions requérant moins de matière, plus facilement réutilisables, émettant moins de polluants dans l'air intérieur.

RÉGLEMENTATION

Le BEPOS décliné en 2020

Le bâtiment Nearly Zero Energy Building (directive européenne EPBD 2010/31/EU) s'est décliné en France sous la forme du BEPOS (Bâtiment à énergie positive) avec une ambition de mise en œuvre dans la réglementation thermique 2020. En Allemagne, il s'agit de la Passiv'Haus et en Suisse du Minergie A.

En France, la réglementation thermique (RT) a été mise en place en 1974. La RT 2012 est en vigueur depuis le 1er janvier 2013 et stipule que les nouvelles constructions doivent être bâties pour consommer moins de 50 kWh/m²/an d'énergie primaire. Aujourd'hui, le groupe de travail « Réglementation Bâtiment Responsable » a pour mission de préparer la RT 2020 qui visera notamment à ce que les bâtiments construits à partir du 1er janvier 2021 aient une consommation d'énergie primaire négative, c'est-à-dire une faible consommation compensée par une production locale d'énergie renouvelable.

La définition du pôle de compétitivité Alsace Energivie, adaptée de celle du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) a été retenue pour la définition du BEPOS. Elle est énoncée comme suit :

6 – http://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/industrie-du-futur_dp.pdf#page=25

7 – TEAM², support de présentation pour la réunion « GT déconstruction », 2014

« Un logement BEPOS est un logement qui consomme peu d'énergie et l'énergie produite sur le site, grâce aux énergies renouvelables, doit être supérieure à celle consommée (tous usages confondus) en moyenne sur l'année. Il doit fournir aux utilisateurs un environnement intérieur sûr, sain et confortable et faciliter des comportements éco-responsables. Enfin pour contribuer à la sobriété énergétique globale, il doit nécessiter « peu d'énergie » pour sa construction, et sa localisation doit aussi nécessiter « peu d'énergie » pour le transport de ses utilisateurs. »

Le BEPOS repose sur le principe d'une maison passive (à faible consommation d'énergie) décrit à la Figure 2, avec une plus forte ambition en considérant que les équipements du bâtiment doivent permettre de produire plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Par rapport à la maison passive, le BEPOS impose notamment la production d'énergie renouvelable pour atteindre un surplus de production d'énergie par rapport à la consommation.

Parmi les équipements que possèdent un BEPOS, on pourra par exemple retrouver une ventilation avec la récupération de chaleur sur l'air vicié, une isolation thermique renforcée, une captation efficace de l'énergie solaire de façon passive, des fenêtres de haute qualité, la limitation des consommations énergétiques des appareils ménagers, la récupération des eaux pluviales.

Afin de mettre en avant le concept du BEPOS avant 2020, l'association Effinergie a créé le label BEPOS-Effinergie 2013 qui est délivré par les organisateurs certificateurs Céquami, Cerqual et Certivéa. Cela permet d'inciter, en avance de phase, les propriétaires des logements ou locaux du tertiaire et à en faire ainsi des ambassadeurs pour faciliter la mise en œuvre de la RT 2020 par la suite.

Figure 2 : Schéma représentant une maison passive (source : Sénova)

La RT 2020 devrait s'appliquer uniquement aux bâtiments neufs. Chaque année, les constructions neuves représentent un peu plus de 1 % du parc total[8].

La réglementation actuelle prévoit deux principaux cas pour la rénovation. Tout d'abord, pour la rénovation très lourde de bâtiments construits après 1948 et dont la superficie est supérieure à 1000 m², le bâtiment rénové doit atteindre les exigences en vigueur sur les performances globales d'un bâtiment neuf. Deuxièmement, pour tous les autres cas de rénovation, l'exigence de performances minimales ne porte que sur l'élément remplacé ou installé.

Ces dispositions ont été complétées par la loi transition énergétique pour la croissance verte qui a été promulguée le 17 août 2015. Les dispositions impactant dès à présent le secteur de la construction sont les suivantes[9] :

- Construction des bâtiments à caractéristiques énergétiques et environnementales renforcées : le plan local d'urbanisme peut imposer aux constructions de couvrir une part de leur consommation d'énergie par la production d'énergie renouvelable (Article 8-I).
- État exemplaire – Économies d'énergie : Mise en place d'actions de sensibilisation à la maîtrise de la consommation d'énergie auprès des utilisateurs des nouvelles constructions de l'État, de ses établissements publics et des collectivités territoriales (Article 8-II).
- Expérimentations et innovations en matière d'économies d'énergies : les collectivités et établissements publics établissant un Plan climat énergie territorial peuvent conclure un partenariat avec les établissements publics à caractère scientifique, culturel et professionnel (universités, grandes écoles,…) à cette fin (Article 8-III).
- Conditions de performance énergétique minimale s'appliquant aux logements sociaux vendus à des personnes physiques : extension aux logements individuels des dispositions actuellement en vigueur pour les logements collectifs, bénéficiant le plus souvent à des accédants issus du parc social (Article 13).
- Maintien des aides aux travaux d'amélioration de la performance énergétique quand il y a obligation de travaux : pour faciliter la réalisation des travaux (Article 14-II).

8 – http://www.logisneuf.com/statistique-immobiliere.html

9 – Source : MEDDE (ministère en charge de l'écologie).

■ Copropriétés – vote à la majorité simple des travaux de rénovation énergétique : dans les bâtiments en copropriété, simplification des opérations d'amélioration de l'efficacité énergétique à l'occasion de travaux affectant les parties communes (Article 14-IV).

■ Simplification de l'application de la règlementation thermique aux nouvelles constructions : les organismes certificateurs spécialisés dans la performance énergétique des bâtiments peuvent délivrer l'attestation de prise en compte de la réglementation thermique à la fin d'un chantier de construction, lorsqu'ils signent une convention à cet effet avec l'État, ce qui simplifie les démarches pour la construction de bâtiments certifiés (Article 15).

■ Mise en place des plateformes territoriales de la rénovation énergétique : définition de leur missions et renforcement de l'accompagnement technique et financier proposé aux particuliers lors de leurs travaux de rénovation énergétique. Cela inclut ainsi le réseau existant des 450 Points Rénovation Info Service qui couvrent l'ensemble du territoire (Article 22).

■ Information des consommateurs sur leurs frais réels de chauffage et facturation selon leur consommation réelle : généralisation de l'obligation d'individualisation des frais de chauffage dans les immeubles pourvus d'une installation collective de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire (Article 26).

■ Soutien aux véhicules à faibles émissions : Les collectivités peuvent prévoir dans les plans locaux d'urbanisme que le nombre de places de stationnement exigé ordinairement soit réduit d'au moins 15 % en contrepartie de la mise à disposition de véhicules électriques en autopartage. Il s'agit d'encourager les promoteurs immobiliers à s'associer avec des opérateurs de location de véhicules propres en libre-service (Article 42).

L'accessibilité des bâtiments à prévoir

Depuis 2005, une réglementation est en place pour transformer le bâti et permettre l'accueil des personnes handicapées dans les lieux publics et les logements collectifs. Une série de dispositions telles que la taille des couloirs, la hauteur des interrupteurs et l'agencement de l'habitat a été décidée et doit être mise en place sur les constructions neuves. Concernant l'existant, seuls les établissements accueillant du public sont concernés. La loi du 11 février 2005 prévoyait la mise aux normes de tous les établissements accueillant du public pour 2015. Or, l'inspection générale des affaires sociales (Igas) a constaté dans un rapport publié le 12 septembre 2012 que la mise aux normes des établissements accueillant du public n'atteignait que 15 % du total de ces bâtiments. Face à ce constat, l'Igas a alerté les pouvoirs publics sur le fait que l'objectif de 100 % ne pourrait pas être atteint pour 2015. La principale cause évoquée pour justifier ce résultat est le contexte économique et budgétaire, peu propice à ces investissements. En 2015, plusieurs propositions ont été faites pour adapter davantage la réglementation aux besoins et la rendre plus réaliste, et toutes ne sont pas encore validées. Ils auront un impact sur la construction et la rénovation d'ici 2020. L'enjeu est principalement de bien calibrer la réglementation pour imposer la construction de logements et de bâtiments tertiaires adaptés aux personnes handicapées mais en limitant les situations où la réglementation serait un frein à la construction.

Le vieillissement de la population est, avec la réalisation de logements plus performants au niveau énergétique, au cœur des préoccupations du marché de l'habitat. Le groupe de travail « Évolutions démographiques et vieillissement » [10] indique également que l'accélération du vieillissement[11] en France connaîtra un premier point haut en 2020, la population des plus de 65 ans passant de 18,4M en 2015 à 20,1M en 2020, les plus de 75 ans étant quant à eux stables à 9,1M. Pour l'habitat, les deux impacts majeurs du vieillissement de la population sont l'augmentation du nombre d'habitats nécessaires et l'adaptation de l'habitat à une population vieillissante.

Pour maîtriser cette transition, la volonté énoncée par le groupe de travail « Évolutions démographiques et vieillissement » est d'orienter les efforts vers l'adaptation du logement personnel (hors maisons de retraite ou autres structures collectives d'accueil) afin que les retraités conservent le plus longtemps possible leur autonomie. En effet, au-delà de l'augmentation des besoins en médicalisation de la fraction la plus âgée des retraités, les besoins en termes d'habitat d'une nouvelle génération, entre la cessation d'activité et la vieillesse (60-75 ans), sont à anticiper. Notamment, une forte cohérence est à construire entre l'aménagement de l'espace public (espaces urbains, transports…), l'espace collectif (bien ou parties communes) et l'espace

10 – Groupe de travail « Évolutions démographiques et vieillissement » de la Fédération européenne du logement social, « L'adaptation de l'habitat à l'évolution démographique : un chantier d'avenir », 2009

11 – http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1089#inter2

privé (logement). Les liens de ces espaces sont également importants avec les commerces de proximité, les lieux et tissus associatifs, les services publics.

Parmi les solutions technologiques envisagées, nous pouvons citer les développements des usages numériques utilisées afin d'apporter confort, sécurité, communication avec l'extérieur du logement, maintenance, suivi. Afin de favoriser l'intégration de ces technologies dans l'habitat des personnes vieillissantes, il faut à la fois améliorer l'acceptabilité de ces technologies chez les sujets cibles et réduire leur coût d'intégration dans l'habitat.

La qualité de l'air intérieur en suspens

Depuis plusieurs années, la qualité de l'air intérieur fait l'objet d'une attention croissante, notamment par l'ANSES. Une des douze actions prioritaires du premier Plan national santé environnement (PNSE 2004-2008), visait à approfondir les connaissances dans ce domaine. Le Grenelle de l'Environnement a abouti à plusieurs propositions concernant la qualité de l'air intérieur reprises dans le deuxième PNSE (2009-2013).

Cela devrait se traduire par la mise en place d'une surveillance de la qualité de l'air intérieur, d'abord pour les établissements recevant du public (surtout pour ceux qui concernent la petite enfance). Une telle démarche initialement légiférée pour 2015 a pris la forme de bonnes pratiques volontaristes.

La diffusion de technologies spécifiques à la qualité de l'air intérieur est largement subordonnée à l'évolution des réglementations, et l'impact à l'horizon 2020 reste incertain.

La maquette numérique en expansion

La directive européenne adoptée en février 2014[12] par le Conseil de l'UE recommande aux États membres l'usage d'outils de modélisation électronique des données du bâtiment dans les projets immobiliers financés par les fonds publics (maquette numérique/Building Information Modelling - BIM).

Le BIM (« *Building Information Modeling* » ou « Bâtiment et Informations Modélisés ») constitue une méthode de travail basée sur la collaboration autour d'une maquette numérique ; cette maquette s'enrichit des apports des différents intervenants sur l'ouvrage, de la conception à la construction, et de la réception à la fin de vie. Elle permet à toutes les parties prenantes de mieux représenter, anticiper et optimiser les choix, tout au long de la vie de l'ouvrage et laisse entrevoir des gains potentiels très significatifs en matière de productivité (réduction des délais, diminution des coûts) et d'amélioration de la qualité des projets (réduction des sinistralités).

Les États membres ont jusqu'en avril 2016 pour transposer la directive dans leur droit national. Ils pourront soit encourager, spécifier ou rendre obligatoire l'utilisation du BIM.

Certains États, membres de l'UE ou non, ont déjà mis en place des législations incitatives ou contraignantes afin que la filière du bâtiment adopte le BIM[13]. En Norvège par exemple, la maquette numérique est obligatoire depuis 2010 pour tous projets conduits par l'agence gouvernementale en charge de la gestion du patrimoine immobilier de l'État. En 2016, 100 % des chantiers à Singapour utiliseront le BIM et le Royaume-Uni rendra obligatoire l'adoption du BIM niveau 2 dans les commandes publiques.

Le BIM est donc un réel enjeu pour accroître la compétitivité de la filière Bâtiment en France et à l'export, pris en compte notamment dans le Plan de Transition Numérique dans le Bâtiment lancé en janvier 2015 par le ministère en charge du logement.

La gestion des déchets à long terme

La directive européenne « déchets » fixe un objectif de valorisation matière de 70 % pour les déchets non dangereux du BTP d'ici à 2020. Plus que technologique, la meilleure gestion des déchets sera liée à des modifications de l'organisation des chantiers et de la formation des opérateurs, artisans et ouvriers.

MARCHÉ

Le marché mondial de la construction en 2020 est estimé à 12 000 Md$ et 15 000 Md$ en 2025 selon les rapports « Global construction 2020 » et « Global construction 2025 » de Global Construction Perspectives et Oxford Economics. En 2025, plus de 60 %

12 – DIRECTIVE 2014/24/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 26 février 2014 sur la passation des marchés publics et abrogeant la directive 2004/18/CE

13 – Plan Bâtiment Durable ; rapport du groupe de travail BIM et gestion du patrimoine « un avatar numérique de l'ouvrage et du patrimoine au service du bâtiment durable : le « Bâtiment et Informations Modélisés » (BIM), tome 1, mars 2014

de l'activité aura lieu dans les pays émergents. A eux seuls, sept pays (Chine, USA, Inde, Indonésie, Russie, Canada et Mexique) représenteront 72 % de la croissance escomptée.

En Europe, après les déclins de 2008-2010 et 2012-2013, on s'attend à une stabilisation du marché liée à la baisse du pouvoir d'achat des ménages et aux forts taux de chômage induisant une faible demande de construction.

L'Allemagne devrait rester le plus grand marché d'Europe de l'Ouest, légèrement devant la France jusqu'en 2025. Malgré cela, le taux de croissance de l'activité du bâtiment devrait y rester parmi les faibles en Europe, en raison d'une baisse sensible de la population (diminution de 2 millions de personnes d'ici 2025, soit -2,5 %) et d'une baisse de la population active (avec des revenus et des besoins en logements différents).

A contrario, le marché le plus croissant d'Europe devrait être le marché du Royaume-Uni. Global Construction Perspectives prévoit une croissance deux fois plus forte que la moyenne européenne, avec un marché qui pourrait atteindre le niveau de l'Allemagne en 2025. Ce dynamisme serait dû aux efforts pour rattraper le manque d'investissement dans le logement, avec un risque de déficit fort au Royaume-Uni, des mesures gouvernementales très incitatives et une meilleure économie portée par des liens internationaux forts, notamment avec les USA.

Figure 3 : Les 15 plus grands marchés de la construction en 2020

En France, la croissance devrait être modérée, la France étant en-dessous de la croissance moyenne d'Europe Occidentale du secteur du bâtiment. Ceci est aussi dû, entre autres, au fait que le secteur français de la construction a été moins touché que les autres pays européens au cours de la crise économique mondiale. Le marché français devrait ainsi représenter 3 % du marché mondial en 2020, soit 294 Md€[14].

Au 1er janvier 2014, la France métropolitaine compte 33,9 millions de logements (INSEE). En 2011, le secteur de la construction (hors travaux publics) en France métropolitaine a réalisé un chiffre d'affaires de 129 Md€[15] et celui des fournisseurs de la construction un chiffre d'affaires de 45 Md€[16].

En France, l'activité des travaux de bâtiment s'est légèrement réduite ces dernières années et a atteint 126 Md€ en 2013, dont 60 % pour le logement. L'activité dans le neuf (logement et hors logement) a représenté 43,7 % de l'activité totale. Selon la FFB (Fédération Française du Bâtiment), la part de la rénovation devrait continuer à croître dans les prochaines années.

Le dynamisme du secteur est fortement appuyé par les incitations fiscales, pour répondre aux objectifs de création de logement. Or la disponibilité des fonds gouvernementaux et locaux à long terme n'est pas assurée.

PRODUCTION

Le secteur de la construction (bâtiments neufs) est en difficulté et notamment le nombre de logements neufs est en baisse depuis 2008 malgré une hausse sur l'année 2011[17]. Le secteur souffre d'une faible visibilité en Europe sur les programmes neufs. La rénovation sera un gros réservoir d'activité dans les prochaines années. D'une part, cela est dû au ralentissement des investissements dans le bâti neuf et aux plus faibles enveloppes disponibles. D'autre part, les enjeux liés au vieillissement de la population et à la réduction de la consommation énergétique des bâtiments renforcent le besoin de rénover l'habitat pour le rendre plus adapté aux situations actuelles et futures[18].

14 – Ce chiffre inclut les données de l'habitat et des travaux publics.

15 – Source : FFB

16 – Source : INSEE

17 – Ademe, « Chiffres clés bâtiment 2013 »

18 – Les Echos : http://www.lesechos.fr/industrie-services/immobilier-btp/0203863757593-la-filiere-btp-en-État-durgence-1054288.php

L'activité du secteur du bâtiment a reculé de 4 ,3 % en volume en 2014 par rapport à 2013[19]. Cette mauvaise activité impacte l'ensemble des acteurs. Par exemple parmi les maîtres d'œuvre, tous les corps de métier sont touchés.

Parmi les fournisseurs de solutions (matériaux, équipements), tous les secteurs n'ont pas la même dynamique. Par exemple, sur les carrières et matériaux de construction (granulats, pierres de construction, ciments, bétons, etc.), l'UNICEM (Union Nationale des Industries de Carrières Et Matériaux de construction) note des importations relativement constantes, mais des exportations en baisse. Au contraire, les fournisseurs d'isolant pour l'extérieur (ITE) ont connu depuis 2012 des croissances supérieures à 10 %.

Les grandes tendances

TECHNOLOGIQUES

L'isolation thermique est l'une des clés pour répondre aux enjeux d'efficacité énergétique des bâtiments. Dans son rapport de 2012 sur les tendances constructives des bâtiments à basse consommation[20], le CERQUAL indique que 55 % des logements collectifs BBC (Bâtiment Basse Consommation) utilisaient l'isolation par l'extérieur en 2011. Ce type d'isolation se développe notamment dans les régions les plus froides. Il permet de traiter efficacement les ponts thermiques. Pour l'habitat individuel, bien que l'isolation par l'extérieur se développe dans les régions froides, c'est encore l'isolation intérieure qui prédomine (utilisée à 50 %).

L'isolation des vitrages est également un fort enjeu puisque les surfaces vitrées peuvent représenter jusqu'à 30 % des pertes thermiques d'un bâtiment. À ce titre, les BEPOS comprennent souvent dans les pays froids l'utilisation de triple vitrage.

Cela fait longtemps que les performances de l'isolation thermique sont au cœur des développements technologiques. C'est notamment un des enjeux qui a permis le développement de la brique, qui a une conductivité thermique bien plus faible que le béton traditionnel (non cellulaire), sans pour autant permettre de se passer d'isolant thermique intérieur ou extérieur. Dans un contexte de foncier très cher et/ou rare, les performances d'isolation poussent à développer pour les rénovations les produits isolants minces en complément des isolants thermiques plus traditionnels, afin de diminuer la surface d'occupation des sols dans les habitations.

À l'horizon 2020, il est surtout intéressant de remarquer qu'au-delà des performances pures, des nouvelles valeurs rentrent dans les attentes, et notamment la valeur verte. Cela se traduit par l'intégration de matériaux renouvelables, ou à faible impact environnemental.

Les principales thématiques de recherche en lien avec le bâtiment qui permettent de répondre aux enjeux du changement climatique sont mentionnées dans la fiche formation bâtiment du PNACC (Plan National d'Adaptation au Changement Climatique). Il s'agit notamment des matériaux à fort albédo, des solutions pour mettre en œuvre une architecture bioclimatique (protéger les bâtiments du soleil, isolation, lutte contre les apports de chaleur interne, ventilation…), des solutions permettant de limiter les phénomènes d'îlots de chaleur urbains.

Les systèmes de chauffage sont également au cœur d'une bonne sobriété énergétique du bâtiment. En habitat collectif, 71 % des logements sont alimentés en énergie par une chaudière collective. D'après le rapport du CERQUAL, cela est à mettre directement en lien avec le label BBC car en 2010, à peine 40 % des logements collectifs étaient alimentés par des chaudières collectives. En effet, l'efficacité énergétique des logements est telle que les chaudières individuelles seraient en sous-utilisation.

On observe également l'utilisation croissante de constructions en bois pour des bâtiments de petite taille ou des péri-structures. D'après France Stratégie, le développement de ces solutions est envisageable sur le territoire français, d'autant que ces matériaux s'adaptent bien à la pré-industrialisation et que les traitements du bois se sont améliorés et permettent aujourd'hui d'avoir des durées de vie plus élevées. Dans le marché de la maison individuelle, la part de la construction bois est d'ailleurs croissante par rapport à l'ensemble des systèmes constructifs[21]. Des solutions

19 – Source : FFB

20 – CERQUAL, « Les tendances constructives dans les opérations BBC Effinergie », 2012

21 – http://aprovalbois.com/sites/default/files/FBF %20Observatoire %20 Construction %20Bois %202013.pdf

telles que l'utilisation de composants ou kits pourraient permettre d'augmenter la productivité de la construction donc de réduire les coûts, ce qui est essentiel pour compenser la hausse des coûts de construction liée à la réglementation notamment.

D'autres éco-matériaux comme le chanvre, la terre cuite ou la paille réapparaissent dans la construction et font l'objet de travaux de développement. D'après France Stratégie, leur utilisation est susceptible de croître mais cela ne sera pas significatif à l'échelle du secteur.

Les technologies de chauffage sont relativement matures, et les efforts portent surtout sur l'intégration de plusieurs sources d'énergie et les liens avec les architectures sobres, comme les architectures bioclimatiques.

Cette intégration peut se faire à l'échelle d'un bâtiment, par exemple sur les bâtiments mélangeant bureaux et habitations qui n'ont pas les même besoins énergétiques au même moment, dans un concept de *micro-grids*, ou à l'échelle de quartiers, notamment avec le développement des éco-quartiers, dans un concept de *smart grids*. Il s'agit alors de mieux consommer en consommant au bon moment, de mutualiser les sources de production d'énergie ou encore de réutiliser les chaleurs dites fatales qui sont autrement perdues.

Les technologies permettant à différentes échelles la conception et la simulation des bâtiments sont donc nécessaires pour aider à sélectionner les meilleures solutions au meilleur coût.

En termes de conception, la maquette numérique (représentation géométrique et sémantique d'un bâtiment permettant de concevoir, simuler et communiquer, appelée aussi BIM – Building Information Model) se généralise et permet notamment une meilleure communication entre les acteurs du projet et une réduction des coûts de conception.

Le BIM influence aussi le reste du cycle de vie du bâtiment. Les logiciels informatiques 3D intégrant le BIM pourraient ainsi servir aussi de supports à la commercialisation, à l'exploitation et à la maintenance du bâtiment, avec la création d'un carnet numérique du bâtiment.

Les techniques d'industrialisation de la construction se développent. Elles doivent permettre de construire plus rapidement à moindre coût. Cela permet aussi d'augmenter les conditions de sécurité et de diminuer le temps de présence sur le chantier en translatant une partie des interventions en usine. Il s'agit par exemple de développer les techniques de préfabrication béton ou bois.

L'internet des objets via la domotique permet notamment d'améliorer la gestion énergétique du bâtiment avec des systèmes de régulation communicants et pilotables à distance. Ce type d'équipements est aujourd'hui majoritairement utilisé dans le tertiaire. Pour le logement, ce type de technologies est davantage relié au confort et à la sécurité, appuyé par une gestion rationnelle des consommations énergétiques.

Pour ces installations, il est nécessaire de prendre en compte l'adaptabilité des solutions numériques : la durée de vie des composants électroniques développés en domotique dépasse rarement la décennie. Il est alors nécessaire de prévoir leur remplacement à différentes échéances de la vie du bâtiment et donc de préfigurer un repérage facile de la localisation des composants dans les bâtiments et afficher les normes techniques à respecter.

Pour améliorer l'efficacité énergétique, la maintenance prédictive se développe. Elle permet de détecter un système qui commence à défaillir et optimise le moment de son renouvellement pour réduire la consommation énergétique supérieure due à un système défaillant tout en prenant en compte le coût de maintenance et d'achat du nouveau matériel.

Plus généralement, des plateformes de solutions énergétiques se développent, portées également par le programme H2020 énergie de l'Union européenne, dont une part majeure est consacrée à l'efficacité énergétique des bâtiments, et dont les appels à projets sont régulièrement communiqués[22].

INDUSTRIELLES

La structuration du secteur de la construction a un caractère local induit par la nature des principaux matériaux de production. En effet, ces derniers étant majoritairement des pondéreux, les sites de production sont situés à proximité des lieux de construction afin de limiter leur transport. Par exemple, le rayonnement

22 – http://www.horizon2020.gouv.fr/cid83117/lettre-information-des-pcn-energie-changement-climatique-ressources.html
http://www.horizon2020.gouv.fr/cid89557/lancement-de-la-plateforme-de-specialisation-intelligente-en-matiere-d-energie.html

d'une cimenterie est de 200 km et le transport du béton et des briques est généralement limité à 30 km.

L'habitat tend vers une industrialisation de plus en plus forte, avec une production aux bonnes tailles de chaque chantier (appuyées par le calepinage numérique et le BIM) en usine pour diminuer le temps de pose, diminuer drastiquement les malfaçons lors de l'installation, mais aussi réduire les déchets produits sur le chantier et favoriser le recyclage.

La construction est également un marché de « production » locale mais le bénéfice en termes d'emplois locaux est atténué du fait du recours de plus en plus fréquent à de la main d'œuvre moins coûteuse issue de pays étrangers (majoritairement d'Europe de l'Est)[23].

Au niveau mondial, de nouveaux acteurs issus des pays émergents font leur apparition. Ces acteurs s'appuient sur un quasi-monopole ou un vaste marché dans leur pays d'origine qui leur permet de monter en compétences. Par exemple, Cemex est en 2015 le 2e acteur sur le marché français du béton derrière Lafarge. Cemex a pris possession de 15 % du marché français en 10 ans[24]. Les acteurs européens sont donc menacés sur leur marché domestique par des entreprises étrangères malgré le fait que le secteur du bâtiment ait une forte dominante locale. Pour faire face aux acteurs des pays émergents sur tous leurs marchés (matures ou émergents), les deux principaux cimentiers mondiaux, Lafarge (France) et Holcim (Suisse) ont décidé de fusionner, ce qui montre la dynamique en cours du paysage industriel.

L'intégration du numérique dans le bâtiment donne lieu à l'arrivée de nouveaux entrants. Un cas emblématique est celui de l'acquisition de Nest par Google. On voit aussi se renforcer des acteurs étrangers qui s'appuient sur une offre multi-métiers forte, comme Siemens ou Bosch.

D'USAGE

Différents types d'usages sont identifiés dans les différents domaines liés à l'habitat.

Le développement des *smart grids*, des éco-quartiers et des *smart cities* influence la conception du bâtiment et modifie ses interactions avec l'extérieur. Notamment dans le cas du BEPOS, le surplus d'énergie produit est intégré au sein du quartier ou de la ville pour en faire un usage local.

Cette conception du bâtiment influe notamment sur la façon dont les acteurs de la construction vont interagir entre eux. Les sciences du bâtiment (acoustique, structure, thermique…), jusqu'à présent sérielles et séparées vont être réunies autour du système bâtiment. De la même façon, les phases de conception, construction et exploitation interagiront.

Les partenariats public-privé ou PPP ont été créés il y a environ 10 ans. Ils ont pour but d'offrir une alternative entre la délégation de service public et l'appel d'offre public. Les contrats de partenariat autorisent une **plus grande souplesse de gestion** pour le secteur public en particulier sur l'investissement initial, tout en assurant qu'il reste en charge de la gestion du service public. Bien que certains dangers du PPP soient décriés, notamment dans un rapport de la commission des lois du Sénat du 16 juillet 2014, les PPP sont encore amenés à se développer, par exemple pour la rénovation énergétique. Ces contrats engendrent une évolution de la conception des bâtiments du point de vue du maître d'ouvrage à une conception plus « industrielle » ou « raisonnée » par le gestionnaire.

Sur ce modèle, on s'attend à un engagement de performance de plus en plus fort par le constructeur, provenant principalement des exigences croissantes de réglementations comme la RT 2020 par exemple.

Cet engagement de performance s'accompagne d'une prise en compte de plus en plus systématique du coût total de possession (TCO – *Total Cost of Ownership*) dans le bâtiment. Le surcoût des bâtiments (ou du loyer du bâtiment) est ainsi compensé par les gains sur les marges dans certaines offres de promoteurs.

La prise en compte du TCO trouve par contre ses limites dans la visibilité sur les prix des énergies conventionnelles. Une baisse du prix des produits pétroliers limite ainsi le retour sur investissement des nouveaux systèmes de chauffage par rapport au fioul ou au gaz.

Concernant les besoins des utilisateurs des logements, la modification des profils familiaux (familles monoparentales, parents divorcés puis remariés…) induit des besoins différents notamment vis-à-vis de la superficie du logement.

23 – http://www.challenges.fr/economie/20131030.CHA6293/ces-salaries-low-cost-venus-d-europe-de-l-est-bulgarie-roumanie-slovaquie.html

24 – La voix du Nord, « Cemex bétonne son implantation dans le Nord-Pas-de-Calais », 2013

L'arrivée de nouvelles générations impacte aussi fortement les usages. On compte notamment l'émergence de la génération Z, née dans le numérique et pour laquelle le partage a toujours existé. Le bâtiment tertiaire évolue déjà vers des bâtiments multi-occupants et multi-usages (*co-working*, espaces collaboratifs), et il y aura aussi certainement des répercussions sur l'habitat.

Le recours à l'analyse du cycle de vie en général est de plus en plus fréquent et le secteur du bâtiment ne fait pas exception à cette tendance. Dans ce cadre notamment, la consommation énergétique du bâtiment en exploitation n'est plus seule à être prise en compte, l'énergie grise du bâtiment l'est aussi. Bien qu'il n'existe pas de définition normalisée de l'énergie grise, un groupe de travail d'Effinergie la définit comme la somme des consommations d'énergie mises en jeu en dehors des consommations d'usage habituelles[25]. Par exemple, cette énergie est mobilisée lors de la fabrication des matériaux de construction, la construction, l'entretien ou la fin de vie du bâtiment. Afin de réaliser les calculs les plus impartiaux possibles et donc de pouvoir comparer plusieurs analyses entre elles, des outils de calcul tels que ELODIE du CSTB ou TEAM Bâtiment développé par Ecobilan sont utilisés.

La position de la France

INDUSTRIELLE

Pour la production de matériaux de construction, les entreprises Saint-Gobain, Lafarge et Vicat se distinguent.

Saint-Gobain est présent dans plus de 64 pays et se décrit comme le leader mondial de l'habitat durable. Les activités du groupe portent notamment sur les matériaux innovants (vitrages, matériaux hautes performances), la production et la distribution de matériaux de construction (plâtres, isolation…). Saint-Gobain a une forte culture d'innovation et figure notamment depuis 4 ans au classement Reuters des cent entreprises les plus innovantes du monde[26]. D'après un classement du magazine Industrie & Technologie[27], Saint-Gobain possède trois centres de recherche qui sont parmi les 100 plus grands centres de France.

Lafarge et Vicat sont deux cimentiers. Lafarge produit du ciment, des granulats, du béton et du plâtre. L'entreprise est un acteur important sur le plan mondial : leader mondial sur le ciment, n°2 mondial sur les granulats et n°4 mondial sur le béton. La société regroupe 64 000 collaborateurs dans 62 pays et fusionne en 2015 avec Holcim (90 000 personnes, siège en Suisse). L'entreprise possède un centre de R&D qui figure parmi les 100 plus grands de France avec 300 employés.

Vicat est positionné sur le ciment, le béton et le granulat. C'est une entreprise mondiale de taille plus modeste que Lafarge. Elle compte 7 700 collaborateurs répartis dans 11 pays.

Pour la gestion énergétique des bâtiments, les entreprises Schneider Electric, Dalkia, Cofely et Idex sont bien positionnées au niveau mondial et/ou français.

Schneider Electric est un spécialiste mondial de l'efficacité énergétique. L'activité du groupe est centrée sur la gestion de l'énergie électrique : distribution, fiabilité, amélioration des performances, solutions domotiques, etc. L'entreprise regroupe plus de 150 000 collaborateurs dans 100 pays. D'après le classement du magazine Industrie & Technologie, Schneider Electric possède notamment le 9e et le 75e plus grand centre de R&D en France avec respectivement 2 000 et 300 employés.

Dalkia (groupe EDF) et Cofely (groupe ENGIE) interviennent dans les services à l'efficacité énergétique, essentiellement dans le domaine des énergies thermiques (chauffage, climatisation) pour le tertiaire ou le gros collectif. Dalkia et Cofely regroupent chacune environ 12 000 collaborateurs. Idex, de taille plus modeste que ses concurrentes françaises (3 600 employés) est spécialisé dans la gestion de la performance énergétique aussi bien au niveau des énergies électriques que thermiques.

Pour la fourniture d'équipements des bâtiments, les entreprises Legrand, Atlantic et Aldes se distinguent.

Legrand propose des équipements et solutions pour l'éclairage, les prises électriques, la domotique, la diffusion sonore, la sécurité, l'aménagement intérieur,

25 – Groupe de travail de l'association Effinergie sur l'énergie grise d'un bâtiment, 2010

26 – Classement Thomson Reuters publié chaque année. Le calcul se base sur quatre critères : le taux de réussite du dépôt de brevet, la portée mondiale du portefeuille de brevets, l'influence du brevet calculée à partir du nombre de citations dans la littérature professionnelle et le volume de brevets.

27 – Industrie & Technologie, « Les 100 premiers centres de R&D de France ». Classement par nombre d'employés.

etc. pour les logements et le tertiaire. La société, cotée au CAC 40, réalise un chiffre d'affaires de plus de 4 Md€ avec plus de 33 000 salariés.

Le groupe Atlantic crée des solutions de confort thermique pour l'habitat, entre autres : eau chaude sanitaire, chauffage résidentiel ou collectif (pompes à chaleur, chaudières, radiateurs), avec les systèmes de gestion énergétique associés. Le groupe réalise 950 M€ de chiffre d'affaires en 2013 et emploie 4400 personnes.

Aldes conçoit, fabrique et commercialise des solutions intégrées pour le bien-être dans les bâtiments. La société intervient dans des domaines tels que la ventilation, le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. L'entreprise est de taille modeste mais couvre un territoire mondial. Elle compte 1 200 employés, est implantée dans 13 pays et exporte dans plus de 60 pays sur tous les continents.

Dans l'ameublement, on peut citer en France, Parisot, Gautier et Demeyere. Ces entreprises sont des ETI et regroupent respectivement 1 800, 500 et 700 salariés.

Dans le secteur de la construction, Bouygues Construction, Vinci, Eiffage et SPIE sont d'importance au niveau mondial et/ou français.

Bouygues et Vinci sont des acteurs de la construction de rang mondial. Bouygues réunit plus de 52 000 collaborateurs et Vinci emploie près de 69 000 personnes. Eiffage et SPIE sont moins développée à l'échelle internationale. SPIE regroupe 37 000 employés et réalise environ 50 % de sa production en France. Eiffage emploie 13 000 personnes et réalise 81 % de son chiffre d'affaires en France.

Unibail-Rodamco est une société de gestion d'immobilier commercial spécialisée dans les centres commerciaux, les bureaux et les centres de Congrès. Unibail-Rodamco est le premier groupe européen de son domaine à être côté en bourse et le troisième mondial. L'entreprise regroupe 1 500 collaborateurs.

Enfin, s'agissant des objets connectés, appelés à prendre un rôle croissant dans l'habitat, de nombreuses start-ups françaises se présentent de façon compétitive au niveau mondial. Leur fédération au sein de la French Tech leur a donné une visibilité croissante[28].

28 – http://www.lafrenchtech.com/

ACADÉMIQUE

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) réunit environ 900 collaborateurs. Son expertise s'étend sur de nombreuses thématiques liées à l'habitat : bâtiment responsable, urbain durable, eau, santé-confort, énergie-environnement, usages-économie. Le CSTB est reconnu au niveau français et mondial comme en témoigne sa contribution à plusieurs études de dimensionnement pour la construction du troisième pont du Bosphore reliant Europe et Asie au niveau de la Turquie.

Le CETIAT est lui le centre technique des industries aérauliques et thermiques. Celui-ci n'intervient pas uniquement pour l'habitat mais intervient régulièrement pour l'habitat, en partenariat avec des sociétés comme ALDES, Atlantic, ELM Leblanc, etc... Ainsi un tiers de ses prestations sont réalisées sur les équipements de CVC (Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'air) pour l'industrie hors process, le tertiaire ou le logement. Il joue de plus un rôle important dans la métrologie et l'étalonnage des systèmes thermiques.

L'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) est un centre de compétences clé pour l'intégration de l'habitat dans son environnement. L'un de ses axes stratégiques est la thématique « Penser et aménager les villes et les territoires durables ».

Le projet Sense-City auquel le CSTB et l'IFSTTAR participent a été labellisé Equipex en 2011. Le projet consiste en l'exploitation d'une « mini-ville » permettant notamment de tester en conditions réelles des micro- et nano-capteurs pour instrumenter et piloter la ville.

L'ITE (Institut pour la Transition Énergétique) Efficacity a pour but de concevoir un modèle de ville durable intégrant sobriété, efficacité énergétique et utilisation d'énergies renouvelables. Parmi les partenaires et les acteurs cités plus haut, on retrouve Vinci Construction.

Le Labex MMCD (Modélisation et expérimentation pour la construction durable) situé en Île-de-France centre ses recherches sur l'étude des matériaux de construction à différentes échelles afin d'améliorer par exemple la durabilité du bâti.

Le Labex Futurs urbains regroupe des équipes de recherche d'Île-de-France sur les thématiques suivantes : intégration de la ville dans son environnement, qualité de vie en ville, conception de villes mondialisées et production matérielle de la ville (construction, rénovation, maintenance…).

Matrice AFOM

ATOUTS

Acteurs présents tout au long de la chaîne de valeur

Bonne complémentarité des acteurs institutionnels, industriels et des entreprises

Reconnaissance mondiale des ingénieurs et architectes français

FAIBLESSES

Conservatisme du secteur, notamment liée à la valeur patrimoniale du logement

Chaîne d'acteurs très fragmentée, très grande majorité d'entreprises de moins de 20 salariés et difficulté à structurer le secteur

Déficience de collaboration entre les différents corps de métier

Filière industrielle des biosourcés en début d'organisation pour le bâtiment

OPPORTUNITÉS

Contexte réglementaire et sociétal propice au développement technologique

Engagements collectifs d'acteurs dans des développements technologiques (notamment le BIM)

Forts enjeux de création et de rénovation de logements en France

Soutiens des éco-constructions par les pouvoirs publics

MENACES

Développement d'acteurs internationaux multi-métiers (Siemens) ou de nouveaux entrants à fort pouvoir mobilisateur (Google avec le rachat de Nest)

Dynamisme des nouvelles technologies fortement liées aux incitations fiscales

Diminution des finances locales

Impact des fluctuations des prix de l'énergie sur la « valeur verte »

SOURCES

Ademe, *Chiffres clés du bâtiment*, 2013

Ademe / FFB, *Mieux gérer les déchets de chantier de bâtiment*, 2013

Centre d'analyse stratégique, *Des technologies compétitives au service du développement durable*, 2012

Cerqual, *Les tendances constructives dans les opérations BBC Effinergie*, 2012

CSTB, *Vers des bâtiments à énergie positive*, 2009

Commission Européenne, *Towards nearly zero energy buildings*, 2012

Groupe de travail « Évolutions démographiques et vieillissement » de la Fédération européenne du logement social, *L'adaptation de l'habitat à l'évolution démographique : un chantier d'avenir*, 2009

Groupe de travail Réglementation Bâtiment Responsable 2020, *Synthèse des travaux de la journée d'étude du 9 juillet 2012 et rapport d'étape*, 2012

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate change 2014 – Summary for policy makers*, 2014

World Green Building Council, Health, wellbeing and productivity in offices, 2014

Diffusion des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) dans le bâtiment, PIPAME, 2009

Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020, PIPAME, 2012

GLOSSAIRE

ACV : Analyse du cycle de vie

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

BEPAS : bâtiment à énergie passive

BEPOS : bâtiment à énergie positive

BTP : bâtiment et travaux publics

CETIAT : Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

FFB : Fédération Française du Bâtiment

IFFSTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

NZEB : Near Zero Energy Building

PNACC : Plan National d'Adaptation au Changement Climatique

PNSE : Plan National Santé Environnement

PPP : partenariats public-privé

RT : réglementation thermique

UNICEM : Union Nationale des Industries de Carrières Et Matériaux de construction

© Fotolia

ÉNERGIE

Définition

L'activité liée au secteur de l'énergie regroupe la prospection de la ressource, son exploitation, son transport, sa transformation secondaire, son stockage, sa distribution et son utilisation.

Dans le vocabulaire de la consommation d'énergie, on distingue l'énergie primaire de l'énergie finale. L'énergie primaire correspond à l'énergie brute, c'est-à-dire non transformée après extraction/production (houille, lignite, pétrole brut, gaz naturel, électricité primaire, cette dernière étant définie comme l'électricité d'origine nucléaire, hydraulique, éolienne, etc.). L'énergie finale correspond à l'énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale (essence à la pompe, électricité, etc.).

Les enjeux relatifs à l'efficacité énergétique sont principalement traités dans les monographies relatives à l'habitat et à la mobilité.

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données massives	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique	Transversale
5	Internet des objets	Transversale
6	Infrastructures de 5e génération	Transversale
8	Procédés relatifs à la chimie verte	Transversale
15	Procédés relatifs à la chimie du pétrole	Transversale
22	Réseaux électriques intelligents	Spécifique
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération	Transversale
24	Carburants de synthèse	Spécifique
25	Technologies de l'hydrogène	Spécifique
41	Technologies de récupération de chaleur à basse température	Spécifique
42	Solaire photovoltaïque	Spécifique
43	Énergies éoliennes	Spécifique
44	Technologies pour l'énergie nucléaire	Spécifique

Les grands enjeux et les stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

International

Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), le secteur mondial de l'approvisionnement en énergie, secteur correspondant à la partie en amont de l'utilisation finale des énergies, est le plus important contributeur de gaz à effet de serre avec 35 % des émissions anthropogéniques totales[1]. Selon le GIEC, les filières liées aux énergies fossiles représentent le plus fort potentiel de réduction des émissions et devront nécessiter des investissements sur leurs structures d'acheminement ainsi sur leur exploitation ; notamment en les substituant par des alternatives faiblement carbonées telles que les biocarburants, le biogaz, ou encore l'hydrogène et le méthane renouvelables.

Si l'on souhaite limiter le réchauffement climatique mondial à 2°C d'ici à 2050, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prévoit dans son scénario tendanciel « 2DS », qui correspond à cette limitation, qu'il sera nécessaire que la demande énergétique mondiale n'augmente que de 25 % tout en ayant une diminution de 50 % du taux d'émission global de gaz à effet de serre (GES). Cela sous-entend une amélioration drastique de l'efficacité énergétique sur l'ensemble de la chaîne énergétique.

France

Avec un mix de production d'électricité à 75 % d'origine nucléaire et à 10 % d'origine hydraulique, la France possède un des taux d'émission de CO_2 par kWh les plus faibles du monde. Au cours de l'année 2012, les émissions de CO_2 par habitant en France ont été de 5,1 t alors que ceux en Allemagne ont été de 9,2 t, aux États-Unis de 16,1 t, en

1 – GIEC : *Contribution du groupe de travail III au cinquième rapport d'évaluation*, Chap.7

Russie de 11,6 t et en Chine de 6,1 t. Les secteurs français qui émettent le plus de GES sont les transports (28 %), l'agriculture (21 %) et l'industrie manufacturière (19 %)[2]. Selon l'AIE, la volonté française de réduire la part du nucléaire à 50 % dans son mix de production d'électricité pourrait nécessiter la mise en place de moyens de production de type centrale à gaz pour maintenir sa capacité de production électrique et devrait ainsi conduire à une augmentation de l'empreinte carbone de la France.

Figure 1 : Évolution des émissions totales de gaz à effet de serre en France par secteur hors UTCF* (année 2011) [*sources : CITEPA/ADEME*]

*Utilisation des Terres, leur Changement d'affection et la Forêt

L'exploitation des hydrocarbures non conventionnels connaît un développement mondial, notamment en Amérique du Nord, mais présente des risques de pollutions environnementales pour les sols et l'air (rejets de CO_2 et de méthane). En application du principe de précaution, la France a interdit la méthode d'extraction par fracture hydraulique, seule technologie qui soit actuellement opérationnelle pour ce type de gisement. De plus, dans le cadre de sa politique de transition énergétique, elle ne prévoit a priori pas dans un futur proche l'exploitation de ce type de ressource fossile. On notera également qu'à l'heure actuelle, les réserves potentiellement présentes dans le sous-sol du territoire national ne peuvent être réellement estimées, le principe de précaution s'appliquant également aux campagnes sismiques et aux forages d'exploration pour les sonder.

2 – Source : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) / Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).

RÉGLEMENTATION

International

Au niveau International, le protocole de Kyoto 2 (décembre 2012) fixe un objectif de 20 % de réduction des émissions de GES sur 2013 – 2020 par rapport à 1990 pour les pays de l'UE (-18 % pour les autres). Lors de la négociation sur le climat en Afrique du Sud de décembre 2011, tous les pays ont pour la première fois accepté de s'inscrire dans un accord international de réduction des émissions de GES, qui devrait être adopté en 2015, pour une entrée en vigueur à partir de 2020. A Doha (Qatar) en 2012, une seconde période d'engagement du Protocole de Kyoto jusqu'en 2020 a été décidée.

Union Européenne

La feuille de route à horizon 2050 adoptée par le Conseil européen a confirmé en février 2011 l'objectif de l'UE de réduire ses émissions de GES de 80 % à 95 % d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990. L'UE pourrait ainsi utiliser 30 % d'énergie en moins en 2050 par rapport aux niveaux de consommation de 2005.

La directive 2012/27/EU sur l'Efficacité Énergétique (DEE) qui remplace et complète la directive « cogénération » de 2004 ainsi que la directive « services énergétiques » de 2006, traite de tous les maillons de la chaîne énergétique : production, transport, distribution, utilisation, information des consommateurs. Elle s'aligne par ailleurs sur l'objectif du paquet énergie-climat de réduire de 20 % la consommation d'énergie d'ici 2020 par rapport aux projections de consommations établies en 2005 pour cette date. La mesure la plus importante du texte prévoit un objectif contraignant de réduction de 1,5 % par an de l'ensemble des ventes d'énergies, hors transports. Des flexibilités seront possibles pour les États membres, mais leur utilisation est limitée à 25 % de l'ambition initiale.

La directive 2009/28/CE sur la promotion des énergies renouvelables prévoit 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie au niveau de l'UE avec des objectifs par pays et 10 % d'énergies renouvelables dans le secteur des transports en 2020. Les biocarburants pris en compte devront répondre à des critères de durabilité (prise en compte du contenu énergétique et carbone des biocarburants, des impacts liés au changement d'affectation des sols, concurrence avec la production alimentaire).

France

En application de la directive européenne 2012/27/EU, la France a remis en avril 2014 son Plan National d'Action en matière d'Efficacité Énergétique (PNAEE 2014) à la Commission Européenne. À travers ce plan d'action, la France prévoit de réduire sa consommation en énergie finale à 131 Mtep d'ici 2020, contre 155 Mtep actuellement (hors transport aérien international) et celle en énergie primaire à 236 Mtep, contre 260 Mtep actuellement (hors transport aérien international).

En application de la directive européenne 2009/28/CE, la France a mis en place un Plan National en faveur des Energies Renouvelables à horizon 2020 : 27 % de consommation finale brute d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables, 10 % de biocarburants dans la consommation d'énergie des transports, 33 % de renouvelables dans la consommation de chauffage (biomasse, notamment) et climatisation et 50 % d'augmentation de la chaleur renouvelable.

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte prévoit la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et la division par quatre des émissions de GES entre 1990 et 2050. Pour cela, il est prévu de réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012 en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030, et la consommation primaire d'énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à la référence 2012. La part des énergies renouvelables devrait être portée à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de la consommation finale brute d'énergie en 2030. La part du nucléaire dans la production d'électricité sera réduite à 50 % à l'horizon 2025 et un objectif de performance énergétique sera créé pour l'ensemble du parc de logements à horizon 2050.

Le mécanisme de capacité, prévu par la loi portant nouvelle organisation du marché de l'électricité (NOME) et instauré par le décret n° 2012-1405 du 14 décembre 2012, devrait contribuer à assurer la sécurité d'approvisionnement du système électrique à long terme. Il vise, entre autre, à donner un espace économique aux outils de gestion de la pointe de consommation, notamment l'effacement.

À la suite de l'accident de Fukushima, l'autorité de sûreté nucléaire française (ASN) a imposé des travaux de sûreté au secteur du nucléaire : diesels d'ultime secours destinés à l'alimentation électrique des matériels de sauvegarde en situation hautement dégradée ; force d'intervention rapide mobilisable sur site sous 24 heures ; création de sources froides complémentaires.

Régional

Au niveau régional, l'article 68 de la loi Grenelle 2 a instauré l'obligation d'établir un Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SRCAE). Depuis juillet 2011, chaque région fixe dans le cadre de son SRCAE des objectifs de réduction des émissions de GES, de maîtrise de la demande en énergie, de réduction et de prévention de la pollution atmosphérique, de valorisation du potentiel d'énergies renouvelables et d'adaptation au changement climatique.

MARCHÉ

Bilan des consommations d'énergie finale

Au niveau mondial, la consommation d'énergie finale était de 8 979 Mtep en 2012[3]. Avec 40,7 %, le pétrole est de loin l'énergie la plus consommée. La consommation des autres énergies se répartit de la façon suivante : 15,2 % pour le gaz naturel, 12,4 % pour le duo biocarburants et déchets, 18,1 % pour l'électricité, 10,1 % pour le charbon et 3 % pour l'ensemble géothermique, solaire et éolien. Avec 39,8 % de la consommation totale d'énergie finale, les membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE) sont les plus gros consommateurs devant la Chine (19,1 %). Il est à noter que la différence de consommation entre ces deux consommateurs a beaucoup évolué en 40 ans, puisqu'en 1972 la part de l'OCDE était de 60,3 % et celle de la Chine de 7,9 %. La crise économique mondiale de 2008 a eu comme conséquence la baisse de la consommation d'énergie au cours de l'année 2009. Néanmoins, dès 2010, la consommation globale a repris sa croissance pour se porter à un niveau supérieur à son maximum de 2008.

3 – Source : AIE.

Figure 2 : Consommation d'énergie finale par énergie en France (Mtep) *[Source : ADEME/MEDDE/SoeS – « Bilan énergétique de la France 2012 » - Juillet 2013]*

En France, la consommation totale d'énergie finale était de 154,4 Mtep en 2012. Elle est répartie entre 41,8 % pour le pétrole, 20,7 % pour le gaz, 24,4 % pour l'électricité, 9,7 % pour les énergies renouvelables et de récupération, et 3,7 % pour le charbon. En 2009, la consommation totale française a baissé de 3,7 %. Depuis 2010 et contrairement à la tendance mondiale, sa consommation totale d'énergie finale est stable et son niveau est à une valeur inférieure de celle datant de son maximum historique de 2008. Néanmoins, les énergies renouvelables et de récupération ont progressé de 11,2 %.

Perspectives générales

La réduction d'émissions de GES passe aussi par la réduction de la consommation énergétique, en particulier s'agissant des plus émettrices. Le scénario « 450 » de l'AIE, qui prévoit une limitation des GES dans l'atmosphère à 450 ppm pour contenir le réchauffement climatique global en dessous de 2°C, implique un investissement mondial d'un millier de milliards de dollars par an d'ici 2035 pour des projets « bas-carbone ». En parallèle, des investissements dans les énergies fossiles sont nécessaires pour maintenir et développer l'accès à l'énergie dans le monde. Néanmoins, ces derniers investissements doivent être limités afin d'atteindre l'objectif de 2°C. Ainsi trois mille milliards de dollars d'investissements prévus dans les énergies fossiles dans un scénario tendanciel pourraient en partie être redirigés vers des technologies bas carbone.

La France s'est fixé comme trajectoire de faire passer de 14 % à 23 % la part des énergies renouvelables dans sa consommation finale brute d'énergie d'ici à 2020. En partant de la situation de 2012, un objectif de consommation finale brute a été fixé pour chaque énergie à horizon 2020 :

- électrique : hydraulique de 3,4 % à 3,6 %, éolien de 0,8 % à 3,2 %, ensemble solaire photovoltaïque, énergies marines, géothermie électrique, électrique biomasse (bois-énergie, biogaz, déchets incinérés, bagasse) de 0,6 % à 1,4 % ;
- thermique : biomasse solide de 6,3 % à 10,2 %, pompes à chaleur de 0,8 % à 1,2 %, ensemble solaire thermique, géothermie et biogaz de 0,2 % à 1,3 % ;
- biocarburants de 1,7 % à 2,4 %.

Il est à noter que ces objectifs, correspondant aux Programmes Pluriannuels d'Investissement (PPI) relatifs à l'électricité, au gaz et à la chaleur, seront remis à plat et intégrés dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE), issue de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. La PPE est en cours de définition et sera soumise à consultation à partir de décembre 2015.

Energies non renouvelables

Nucléaire

À l'international, l'impact de l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi (Japon) a eu deux effets systémiques sur le secteur nucléaire. Le premier fut le renforcement des normes de sûreté sur les centrales dans de nombreux pays, dont la France. Le second est apparu en Allemagne et en Belgique, où ces deux pays ont décidé au lendemain de cette catastrophe d'anticiper la mise à l'arrêt de leur parc de réacteurs. On peut également citer la Suisse qui a abandonné ses projets de développement.

Le nucléaire mondial comporte néanmoins quelques marchés naissants et existants. De nouveaux pays montrent un intérêt pour cette technologie et des centrales sont en construction en Biélorussie et aux Émirats Arabes Unis, d'autres projets sont à des stades avancés en Turquie (choix de la technologie ATMEA, développée conjointement par Areva et MHI) et au Vietnam ; des discussions sont engagées dans des pays tels que la Jordanie, la Pologne ou l'Arabie Saoudite. Concernant les pays possédant déjà un parc

nucléaire, la Corée du Sud vise une capacité de 29 % pour 2035 (41 % initialement planifié) et le Japon a confirmé la participation du nucléaire dans son mix énergétique à un niveau non précisé pour l'heure.

Au Royaume-Uni, dans le cadre de la construction de la centrale nucléaire de Hinkley Point C, la Commission Européenne a donné son accord pour les contrats garantissant le prix de l'énergie produite, autorisant ainsi l'engagement des travaux. Par ailleurs, la Russie et la Chine ont des programmes de développement ambitieux ; aux États-Unis, la construction de quatre nouvelles unités sur deux sites (premier nouveau projet en 30 ans) a été annoncée.

En France, l'objectif d'abaissement de la part du nucléaire à 50 % dans le mix de production d'électricité, rend très peu probable l'émergence de nouveaux projets de construction de centrale à horizon 2020, même si l'enjeu du renouvellement du parc existant va se faire jour. Néanmoins, la perspective de prolongement de l'exploitation de tout ou partie du parc existant, fait apparaître un marché estimé à quelque 50 milliards d'euros d'ici à 2025 pour la seule partie allouée au « grand carénage » des centrales. Ce « grand carénage » consiste en la rénovation, le remplacement de matériels, l'intégration des mesures post-Fukushima et l'amélioration du niveau de sûreté des centrales. Cela implique le remplacement de certains gros composants : générateurs de vapeur, turbines, transformateurs, échangeurs, etc.

Hydrocarbures

Selon les projections de l'OPEP, la production d'hydrocarbures devrait croître en moyenne de 0,7 % par an pour le pétrole et de 2,4 % par an pour le gaz naturel sur la période 2010-2040[4]. À l'horizon 2035-2040, les parts respectives du pétrole et du gaz dans la production mondiale d'énergie primaire devraient se stabiliser autour de 25-27 %. En 2014, la consommation mondiale de pétrole était de 91,1 millions de barils/j, et devrait atteindre 96 millions de barils/j en 2019. La demande est tirée par les besoins énergétiques ainsi que la pétrochimie, notamment dans des pays tels que la Chine ou l'Inde.

Le développement rapide des hydrocarbures non conventionnels en Amérique du Nord a eu plusieurs conséquences. Il a induit une demande accrue d'équipements de forage et d'extraction. Il a également permis un accès à du brut et du gaz naturel bon marché pour l'industrie nord-américaine et une réduction de leurs importations de produits pétroliers (en particulier essence). Il est toutefois aujourd'hui affecté par les bas prix du baril.

Énergies renouvelables

Eolien (onshore et offshore)

Les investissements globaux du secteur de l'éolien dans le monde en 2013 ont été de 59,2 Md €. La capacité mondiale installée et reliée à un réseau, au cours de cette même année, a été de 35 289 MW dont 16 088 MW pour la Chine (45,6 %), 12 031 MW pour l'Europe (34,1 %), et 1 084 MW pour les États-Unis (3,1 %). Depuis 2009, le plus grand marché global pour l'éolien est la Chine[5]. Le GWEC s'attend à ce que le marché global de l'éolien dans le monde ait un taux de croissance annuel entre 6 % et 10 % sur la période 2015-2018. La contribution directe du secteur éolien (terrestre et en mer confondus) au PIB de l'Union Européenne était de 17,6 Md € en 2010 pour 154 150 emplois.

En 2013, la France a installé pour 631 MW de capacité d'éolien. Les principaux fournisseurs d'équipements de son marché, classés par puissance installée, ont été Vestas (39 %), Repower (21 %), Enercon (19 %), Gamesa (9 %), Nordex (9 %) et Siemens (3 %)[6].

Cas de l'éolien offshore

90 % des installations se situent dans les eaux européennes, dont 80 % pour seulement 3 pays : Danemark, Pays-Bas, et Grande-Bretagne. Jusqu'en 2010 et l'installation d'une ferme en Chine, le marché était à 100 % européen. L'investissement global en Europe pour l'éolien offshore a fortement augmenté en 10 ans. De 0,25 Md €, il est estimé entre 4,6 et 6,4 Md € en 2013[7]. La France, afin de remplir son objectif d'installer 6 GW d'éolien offshore, avait lancé un 1er appel à projet (clôturé en avril 2012) pour la construction de fermes dans La Manche ; il devrait permettre la création de 10 000 emplois d'ici à 2018. Il a été remporté par

4 – AIE : *World Energy Outlook*, 2014.

5 – Source : Global Wind Energy Council (GWEC).

6 – Source : France Énergie Eolienne.

7 – Source : European Wind Energy Association (EWEA).

les consortiums EDF Energies Nouvelles/Dong Energy Power/Alstom et Iberdrola/Eole-Res/Areva ; en 2013, un second appel à projets a été remporté par GDF Suez/Areva, pour deux parcs éoliens sur deux sites. La capacité installée sera de 1 GW à l'horizon 2021 – 2023.

Energies marines

Plusieurs usines marémotrices existent à travers le monde : en France depuis 1966 (usine de la Rance), en Corée du Sud depuis 2011, ainsi qu'au Canada et en Chine. Le potentiel français effectivement mobilisable à court terme est actuellement considéré comme très faible pour des raisons environnementales.

En ce qui concerne l'hydrolien, 46 projets de parcs sont planifiés à travers le monde : 5 en France, 15 en Grande Bretagne, 16 aux États-Unis, 4 au Canada, 1 en Nouvelle Zélande, 1 en Inde, 3 en Australie et 1 en Corée du Sud. Les projets les plus avancés sont les fermes pilotes développées par la France et la Grande-Bretagne. À titre d'exemple, au large des côtes normandes françaises, un marché potentiel de 3 000 machines est estimé pour le gisement du Raz Blanchard (domaine maritime français) et son prolongement dans les eaux aurignaises (îles anglo-normandes - domaine maritime anglais).

Photovoltaïque

Le marché mondial global du photovoltaïque (incluant modules, composants des systèmes et installations) a très fortement augmenté ces dernières années et représentait un chiffre d'affaire de 91,6 Md € en 2011. Il pourrait atteindre 130,5 Md € en 2021[8]. En 2013, 55 % des nouvelles installations sont localisées en Asie, principalement en Chine et au Japon. Ce dernier, suite à l'accident de Fukushima Daiichi, a consenti des efforts importants envers le secteur des énergies renouvelables, notamment par l'augmentation significative en deux ans de sa capacité de production en électricité photovoltaïque. Le marché de la production de modules photovoltaïques est dominé par la Chine, qui représente 6 constructeurs parmi les 10 premiers fabricants en 2014 (1er Trina Solar, 2e Yingli Green Energy, 3e Canadian Solar [sinocanadien]). Le nombre d'emplois en France liés à la fabrication des composants, aux études et à l'installation des systèmes a diminué sur la période 2012-2013, à respectivement 16 800 et 10 130 équivalents temps plein (ETP)[9]. Le chiffre d'affaires de la filière française est en baisse depuis 2010, année où il avait atteint 6,4 milliards d'euros, contre 4 milliards d'euros en 2013, soit une baisse de 40 % [10].

Biocarburants

Au niveau mondial, le bioéthanol a représenté en 2010 73 % de la consommation de biocarburants (en teneur énergétique). En 2011, les États-Unis, premiers producteurs mondiaux, ont été contraints d'exporter massivement leur production, en Europe, au Brésil, au Canada et en Asie.

La consommation de la France et de l'Allemagne devrait augmenter rapidement dans les années à venir pour remplir l'objectif de 10 % de biocarburants dans la consommation d'énergies renouvelables des transports de l'UE, la part des biocarburants devant néanmoins être plafonnée à 7 % à l'horizon 2020, selon un projet de directive voté par le Parlement Européen.

Le marché français est estimé à 2,5 Md €. Les emplois créés ou maintenus en France par cette filière étaient de 6 400 emplois directs en 2011[11].

Biogaz

Le marché de la méthanisation se décompose en quatre types d'installations liés à leurs intrants : méthanisation des boues d'épuration urbaines, méthanisation des déchets et effluents industriels, méthanisation de la fraction fermentescible des ordures ménagères et méthanisation d'intrants agricoles. Au niveau européen, le biogaz a représenté 13,4 Mtep en 2013, en augmentation de 11 % par rapport à 2012. L'Allemagne est leader mondial sur le secteur de la méthanisation et représentait en 2013 50 % de la production européenne[12].

Biomasse

La valorisation énergétique de la biomasse regroupe les productions de la chaleur, d'électricité, de biométhane par combustion ou méthanisation (production de biogaz). Elle comprend la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture

8 – Source : EurObserv'ER.

9 – Source : ADEME.

10 – Source : Observ'ER.

11 – Source : ADEME.

12 – Source : EurObserv'ER.

(substances végétales et animales issues de la terre et de la mer inclues), de la sylviculture et des industries connexes, mais également la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers. On distingue deux sous-secteurs :

- La biomasse énergie regroupe les activités de combustion, avec ou sans prétraitement thermique, du bois, des déchets agricoles solides (paille, issues de céréales, etc.) et des sous-produits animaux. Les nouvelles valorisations thermochimiques de la biomasse sont rattachées à ce segment.
- La biomasse gaz comprend la méthanisation, la gazéification et la valorisation du biogaz et du gaz de synthèse.

En Europe, 4 pays représentent 50 % de la production d'énergie issue de la biomasse solide : la France (17 %), l'Allemagne (16 %), la Suède (9 %) et la Finlande (8 %)[13]. 80 % de l'énergie primaire issue de la biomasse produite en Europe est valorisée sous forme de chaleur. Toutefois, en France, il est de 90 %, en Suède de 87 % et en Finlande de 79 % alors qu'au Royaume-Uni et aux Pays-Bas la consommation sous forme électrique et de chaleur sont à parts égales.

Le bois énergie représentait en France environ 60 000 emplois en 2012[14] pour un marché de 2,8 Md € en 2012[15]. En 2013, le biogaz représentait en France plus de 1 640 emplois pour un marché de 410 M €[16]. Sur la période 2013-2020 et au niveau européen, il est attendu sur la filière biomasse des croissances de 31 % pour la production de chaleur et 54 % pour la production d'électricité[17].

PRODUCTION

Bilan de la production d'énergie primaire

Actuellement, la production mondiale d'énergie primaire est largement dominée par le pétrole et le charbon, ainsi que, dans une moindre mesure, par le gaz naturel, ces trois énergies représentant environ 80 % du mix énergétique. La biomasse, première source d'énergie renouvelable, en représente environ 10 %. À l'horizon 2040, selon les tendances actuelles, ce mix énergétique devrait être à peu près réparti en quatre parts égales entre le pétrole, le charbon, le gaz naturel et les autres énergies[18].

La production française d'énergie primaire est largement électrique, avec en 2014 113,7 Mtep produits, soit 82 % de la production totale, et est dominée par le nucléaire. Le pétrole, le charbon et le gaz naturel ne représentent que 1,5 % et sont en baisse constante depuis quatre décennies (arrêt fin 2013 de l'injection sur le réseau de gaz naturel provenant du gisement de Lacq). Le principal changement notable de ces dernières années concerne la forte progression des énergies décarbonées. Après n'avoir eu que peu de développement depuis les années 70, elles ont progressé à partir de 2010 de 53 % pour le trio hydraulique, photovoltaïque et éolien, et de 20 % pour les déchets et les autres énergies renouvelables (production de chaleur et/ou d'électricité).

Figure 3 : Production d'énergie primaire en France (en Mtep, données réelles, non corrigées des variations climatiques) [calculs SoeS, d'après les sources par énergies]

Production de carburants

La capacité mondiale de raffinage a légèrement augmenté en 2012 : + 0,8 %, pour atteindre 4 435 millions de tonnes (Mt) par an. L'Europe occidentale et orientale (y compris la Communauté des États Indépendants) représente 27,5 % de la capacité mondiale de raffinage et est dépassée par la zone Asie/Océanie (29 %) qui est depuis 2011, la première zone mondiale

13 – Source : EurObserv'ER.

14 – Pôle interministériel de Prospective et d'anticipation des mutations économiques : *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020.*

15 – Source : ADEME.

16 – Source : ADEME.

17 – Source : EurObserv'ER.

18 – AIE : *World Energy Outlook 2014.*

de raffinage. Le secteur européen du raffinage reste confronté à une demande de distillats moyens (kérosène, gazole) en constante augmentation et à la gestion corrélative d'un surplus croissant d'essence.

Énergies renouvelables

Eolien Les investissements dans l'éolien terrestre ont repris en 2014, avec 45 GW de nouvelles capacités installées au niveau mondial, dont 20 GW en Chine et 5 GW aux États-Unis. En 2012, la production d'électricité éolienne s'est élevée en France à 14,9 TWh. Après une croissance rapide sur la période 2005 - 2008, elle ralentit un peu depuis 2009. Depuis l'émergence de la filière, la production d'électricité éolienne n'a cessé de progresser en métropole, qui représente plus de 99 % de la production nationale.

Solaire La production de modules photovoltaïques est localisée principalement en Asie, avec 44 % pour la Chine et 17 % pour Taïwan. En 2012, au niveau national, le solaire photovoltaïque a produit 4 390 GWh, dont 91 % en France métropolitaine et 9 % dans les DOM. Entre 2011 et 2012, la production a progressé de plus de 2 000 GWh, soit une augmentation de 88 %. Les installations de 250 kW et plus concentrent 44 % de la puissance solaire photovoltaïque installée en France mais ne représentent que 0,4 % des installations. Les petites installations de moins de 3 kW représentent 87 % des installations mais seulement 18 % de la puissance totale du parc.

Biocarburants Les États-Unis et le Brésil sont les plus grands producteurs et totalisent à eux seuls 80 % de la production d'éthanol dans le monde. Un des grands enjeux des biocarburants concerne le faible rendement de production en comparaison de la quantité de matière utilisée ainsi que la mise en concurrence de cultures agricoles alimentaires. Les biocarburants avancés, où il s'agit d'utiliser l'intégralité du matériau de base, permettraient de pallier ces problèmes.

Biogaz La production européenne d'énergie primaire issue du biogaz a atteint 13,4 Mtep en 2013. Plus des deux tiers des volumes de biogaz sont issus d'unités de méthanisation. Au niveau européen, le biogaz est principalement valorisé sous forme d'électricité, et a permis la production de 53,3 TWh en 2013, en augmentation de 15 % par rapport à 2012.

Biomasse La production de chaleur à usage individuel représente le principal débouché historique de la filière. Le potentiel sylvicole de la France est au 3e rang d'Europe. Un enjeu important se situe au niveau de la gestion et de l'exploitation de la ressource forestière.

Les grandes tendances

D'USAGE

Dans le scénario de référence de l'AIE, la demande mondiale en énergie devrait croître de 37 % à l'horizon 2040. Cette demande est tirée à la fois par la croissance démographique et la croissance économique, mais l'intensité énergétique devrait en moyenne décroître. Cette tendance globale recouvre néanmoins de fortes disparités géographiques : si la demande devrait rester stable dans les pays développés (Europe, Amérique du Nord, Japon, Corée du Sud), les autres zones géographiques, en particulier l'Asie, devraient tirer la demande.

Figure 4 : consommation finale d'énergie, énergétique et non énergétique par secteur (en Mtep) en France
(source : SoeS)

En France, au cours de la période 1973-2012, la part de la consommation en énergie finale de l'industrie (sidérurgie inclue) a fortement diminué (36 % à 21 %) tandis que celle du secteur résidentiel-tertiaire a gagné deux points et demi, en passant de 42,0 % à 44,5 %. Le secteur des transports a progressé significativement de moins de 20 % à environ 32 % et la part de l'agriculture évolue peu sur la période, en s'établissant en dessous de 3 %.

Sur la période 1990 – 2012, dans le secteur résidentiel, les consommations finales d'énergie en électricité et en gaz ont progressé, tandis que celles des énergies renouvelables et de récupération ont diminué. À noter que celle du charbon a complètement disparu. Au niveau du secteur industriel, les consommations finales d'énergie en pétrole et en charbon ont diminué tandis que celle de toutes les autres énergies ont augmenté. Les transports et l'agriculture sont les secteurs où les disparités de consommation finale d'énergie sont les plus marquées : le pétrole est toujours largement majoritaire même s'il décroît légèrement. La consommation finale d'électricité progresse dans l'agriculture tandis que les énergies renouvelables et de récupération font leur apparition dans les transports.

Avec le développement d'un cadre destiné à sécuriser la capacité des réseaux (cf. loi NOME - réglementation), l'activité des opérateurs d'effacement est amenée à se développer. La pratique de l'effacement dans le domaine énergétique consiste à réduire la consommation d'électricité d'un site par rapport à sa consommation normale, sur une base volontaire, en cas de pointe de demande. Cela permet de dégager plusieurs dizaines voire centaines de mégawatts qui contribuent à l'équilibre du réseau. Ce service est proposé par les opérateurs à des clients dont les équipements peuvent avoir une consommation flexible. Les volumes actuels d'effacement restent limités.

INDUSTRIELLES

Les scénarios prospectifs énergétiques abordent assez peu les impacts d'un point de vue strictement industriel. S'agissant de la France, l'hypothèse (implicite) est souvent que l'industrie nationale est en capacité de répondre aux besoins intérieurs du pays, ce qui est loin d'être toujours le cas aujourd'hui. Certaines activités sont par nature non délocalisables (installation et exploitation d'équipements, par exemple), alors que d'autres, en particulier la production industrielle de certains équipements, ne le sont pas.

Les filières industrielles appelées à se développer sont celles pour lesquelles la France possède déjà un avantage comparatif, et/ou dont les perspectives de développement sont importantes, au niveau national et aussi, voire avant tout, à l'international.

Ainsi, la France a investi massivement dans la filière nucléaire, ce qui lui a permis d'acquérir une position de leader au niveau mondial, avec des acteurs présents sur les différents segments de la chaîne de valeur. Ce leadership doit désormais faire face à l'émergence de compétiteurs étrangers tels que la Corée du Sud.

S'agissant des énergies renouvelables, le pays n'a que peu réussi à développer ses propres filières industrielles et doit largement importer. Dans le détail, la situation est néanmoins contrastée ; ainsi, le pays possède un savoir-faire reconnu dans le secteur parapétrolier, qui lui donne un avantage dans l'éolien offshore. L'excellence de la filière hydraulique française est reconnue, et même si le potentiel français est largement exploité, de nombreux marchés à l'export sont prometteurs. Une industrie du solaire photovoltaïque pourrait se développer en France ; actuellement, le marché des cellules et modules est fortement dominé par les fabricants chinois, qui exportent 90 % de leur production. Dans cette filière, la France, dont la recherche est reconnue, peut se positionner sur des segments nouveaux et innovants.

TECHNOLOGIQUES

Nucléaire À la suite de l'accident de Fukushima Daiichi, de nombreuses installations de seconde génération (Gen II) ont été équipées de systèmes d'alimentation d'énergie de secours, de systèmes de refroidissement et d'autres systèmes pour limiter les accidents. Le développement de réacteurs plus petits et modulaires s'est poursuivi et comporte différents niveaux de pré-licence (particulièrement aux USA), mais seulement deux projets ont été lancés (Russie et Argentine). Quelques prototypes avancés de réacteurs embarquant des technologies de 4e génération (Gen IV) sont construits mais leur déploiement au niveau industriel n'est pas attendu à court terme. Plusieurs projets d'enfouissement géologique des déchets nucléaires sont en cours et font des progrès, en France et en Suède. L'étude de faisabilité du site de Yucca Mountain des États-Unis a repris.

Fossiles Les technologies d'exploration et d'extraction continuent d'être améliorées, de façon à accroître leurs performances tout en maintenant les coûts de production à un niveau acceptable. Un des enjeux majeurs concerne le taux de récupération dans les gisements : ainsi, on estime qu'en moyenne, actuellement, seulement 35 % du pétrole présent dans un gisement est effectivement récupéré. La part du gaz naturel dans le mix énergétique mondial étant en croissance continue,

l'ensemble des technologies qui lui sont associées, depuis le transport (par gazoduc ou sous forme de GNL) jusqu'aux usages, notamment pour la production d'électricité (cyclés combinés) font l'objet d'améliorations permanentes. Par ailleurs, s'agissant des hydrocarbures non conventionnels, plusieurs questions restent en suspens, notamment au niveau de l'évaluation des ressources potentielles (cartographie 3D, par exemple) ou des techniques d'exploitation alternatives (réduction des impacts environnementaux).

Biocarburants avancés Les voies « avancées », pour la plupart au stade de recherche et développement, résultent de nouveaux procédés visant à valoriser l'intégralité de la plante (biomasse lignocellulosique) et/ou mobiliser des sources de biomasse autres qu'agricoles. Le problème des technologies existantes réside dans leur coût ainsi que dans leur complexité de mise en œuvre.

Hydrogène L'hydrogène, en tant que vecteur énergétique, peut être produit localement par reformage de gaz ainsi que grâce à des parcs éoliens, voire solaires, via l'électrolyse, et peut être stocké, transporté puis valorisé pour différents usages (alimentation de piles à combustible, stationnaires ou embarquées). Les différentes briques technologiques requises sont disponibles et de premiers déploiements en France de flottes captives (véhicules utilitaires électriques avec prolongateurs d'autonomie à hydrogène et chariots élévateurs électriques à hydrogène sur des plateformes logistiques) semblent prometteurs.

Eolien Les équipements pour l'éolien maritime ont besoin d'être plus robustes et demandent une maintenance accrue en comparaison avec l'éolien terrestre. Afin d'améliorer sa compétitivité sur ce marché, la France a dédié une partie du Programme d'Investissements d'Avenir au Grand Eolien. Il couvre les composants et/ou machines d'envergure adaptés au marché terrestre, insulaire ou au marché de l'éolien en mer. L'objectif affiché est « d'accompagner des innovations ou briques technologiques critiques permettant de consolider la filière renouvelable éolienne tout en poursuivant les objectifs du Grenelle à l'horizon 2020 »[19]. Dans le domaine de l'offshore, la mise au point de l'éolien flottant pourrait permettre d'exploiter un plus grand gisement.

Énergies marines Pour les énergies marines, la France dispose d'un potentiel naturel important (11 millions de km² de zones sous juridiction française), d'un tissu industriel expérimenté dans les domaines de l'exploitation pétrolière offshore, de l'énergie hydraulique et des constructions navales, et de centres de recherche dynamiques. Néanmoins, réaliser des structures pour les exploiter reste un défi. Plusieurs expérimentations sont en cours dans de nombreux pays pour des productions de quelque MW et des efforts important sont consentis pour construire des hydroliennes de 30 m de diamètre. Par ailleurs, d'autres concepts sont en cours de développement, mais ne sont pas encore matures d'un point de vue technologique : énergie houlomotrice, énergie thermique des mers, etc.

Solaire Des progrès importants dans le domaine des couches minces, des multi-jonctions et des cellules de troisième génération de type organique sont à attendre. Les couches minces présentent un potentiel d'amélioration intéressant, mais peuvent à terme poser des problèmes (toxicité du cadmium ou raréfaction de l'indium, par exemple) ; l'utilisation du cuivre, du zinc, de l'étain, du soufre ou du sélénium, matières premières à la fois moins toxiques et relativement abondantes, semble être une alternative intéressante. Une baisse des coûts des cellules multijonctions est anticipée mais leur complexité de fabrication les réservera dans un premier temps aux cellules mobiles (par exemple dans le spatial) où le rendement est un avantage essentiel. A plus long terme, de nouvelles générations de cellules, à base de matériaux organiques ou de pérovskites, pourraient prendre le relais.

Capture et stockage du carbone (CSC) Si quelques progrès ont pu être accomplis en ce qui concerne l'utilisation du CO_2 en lui-même, les moyens de capture et de stockage restent à développer. Fin 2013, quatre grands projets de CSC ont été lancés auxquels s'ajoutent quatre autres projets visant à injecter le CO_2 pour améliorer les rendements d'extraction des puits d'hydrocarbures. De nombreux projets de ce type sont prévus en Amérique du Nord, Australie, Arabie Saoudite, Émirats Arabes et États-Unis. En France, un premier projet a vu le jour à Lacq faisant la démonstration des technologies d'oxycombustion à une taille industrielle et de la faisabilité d'un stockage en milieu déplété, puis en 2014 à Port-Jérôme, un autre projet mettant en œuvre une solution de captage de CO_2 par le froid, unique au monde, permettant de réduire le

19 – Source : DGEC, 2012.

coût du captage et d'augmenter le rendement d'extraction du CO_2, associé à sa valorisation. Des équipementiers français s'intéressent à cette filière du captage.

Smart grid Il s'agit d'un réseau électrique « intelligent » capable d'intégrer plus efficacement les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs en vue de maintenir une fourniture d'électricité efficace, durable, économique et sécurisée. Ce concept repose sur une agrégation de technologies comprenant le réseau de transport et de distribution d'électricité, des compteurs électriques intelligents, et enfin des systèmes de production et de stockage de l'énergie en partie délocalisés.

Efficacité énergétique dans l'industrie L'intensité énergétique de l'industrie est globalement, au niveau mondial, en diminution régulière. Il subsiste toutefois des marges de progrès, et plusieurs leviers permettent de diminuer la consommation énergétique d'un site : renouvellement des équipements de production et changement de procédés, récupération des énergies fatales, mutualisation des utilités entre plusieurs sites, etc. Dans le cas des industries les plus intensives en énergie (cimenteries, sidérurgie, etc.), à plus long terme, le recours au CSC serait un moyen efficace de réduction des émissions de CO_2.

La position de la France

INDUSTRIELLE

Le Commissariat Général au Développement Durable a réalisé une analyse de chaque filière, présentant « de manière indicative et qualitative le positionnement marché des filières vertes françaises face à la concurrence internationale. Pour des filières encore émergentes ou en décollage, cette analyse s'appuie principalement sur les dynamiques à l'œuvre d'un point de vue technologique (R&D, projets démonstrateurs, projets pilotes, applications précommerciales). Les « leaders » du marché sont indicatifs et leur positionnement relatif au sein d'une catégorie donnée (leaders mondiaux ou européen, peloton de tête,) ne présume pas d'un ordre spécifique. »[20].

Selon cette analyse, le positionnement de la France face à la concurrence internationale sur la production d'énergie à partir de sources renouvelables est hétérogène. Elle fait partie des leaders mondiaux sur les énergies marines avec la Grande-Bretagne. Sur la biomasse, elle se situe dans le peloton de tête, derrière l'Allemagne mais devant les États-Unis. L'éolien accuse un retard certain, alors que les leaders sont actuellement l'Allemagne, la Chine, la Grande-Bretagne et les États-Unis. Concernant le solaire, la concurrence internationale, emmenée par la Chine, suivie par les États-Unis et l'Allemagne, est largement en avance. En ce qui concerne les véhicules décarbonés, ainsi que les réseaux énergétiques intelligents, elle se situe dans le peloton de tête. L'hydrogène et les piles à combustible se situent dans la moyenne mondiale. Enfin, pour le captage, le stockage et la valorisation du CO_2, elle fait partie du peloton de tête.

Le journal Industrie et Technologies (IT) a réalisé un classement des 100 premiers centres de recherche et développement en France pour 2014. Neuf centres de recherches liés aux activités de l'énergie y sont recensés. Avec trois centres, Total est l'entreprise la mieux classée. A noter qu'avec son centre de Pau spécialisé dans l'exploration et la production des hydrocarbures, elle possède également le premier centre dans le domaine de l'énergie. EDF possède également 3 centres, aux 21e, 41e et 44e places, ce qui fait d'elle la seconde entreprise la mieux représentée. L'Électropole de Schneider Electric, travaillant entre autres sur la mesure et l'optimisation de l'énergie, se classe 9e. Au 26e rang se trouve le Schlumberger Riboud Product Center dont les activités se portent sur les mesures en temps réel pour le forage et les tests sur la qualité des hydrocarbures. Enfin le centre de Saint Denis d'Engie sur les énergies nouvelles et les infrastructures se classe 57e.

ACADÉMIQUE

L'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE) est la structure qui a pour mission de coordonner la programmation scientifique sur l'énergie des grands établissements de recherche français ainsi que donner une meilleure visibilité à l'international. Fondée le 30 juillet 2009 par le CEA, le CNRS, la CPU, et l'IFPEN, l'ANCRE rassemble tous les organismes de recherche publique français concernés par les problématiques de l'énergie (ANDRA, BRGM, CDEFI, CIRAD, CSTB, IFREMER, IFSTTAR, INERIS, INRA, INRIA, IRD, IRSN, IRSTEA, LNE, ONERA). Neuf groupes

20 – CGDD : *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, 2013.

programmatiques ont été mis en place, dont cinq groupes « sources d'énergie » (énergies issues de la biomasse, énergies fossiles et géothermiques, énergies nucléaires, énergies solaires, énergies marines, éoliennes et hydrauliques), trois groupes « usages » (transports, bâtiments, industrie et agriculture) et un groupe « prospective énergie globale ».

Les Investissements d'Avenir concernant l'énergie s'élèvent à 4,39 milliards d'euros et se répartissent entre les grandes thématiques des énergies décarbonées, des énergies renouvelables et de la chimie verte, des réseaux électriques intelligents, des véhicules du futur et du nucléaire. Les Investissements d'Avenir ont également permis la création d'un nouvel instrument : les Instituts pour la Transition Énergétique (ITE), plates-formes interdisciplinaires dédiées aux énergies décarbonées. Onze projets d'ITE ont été retenus : EFFICACITY (transition énergétique de la ville), France Energies Marines, INEF4 (bâtiment durable), l'Institut Français des Matériaux Agro-Sourcés (IFMAS), l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES2), l'Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF), l'Institut Véhicule Décarboné et Communicant et de sa Mobilité (VeDeCoM), l'Institut National pour le Développement des Ecotechnologies et des Energies décarbonées à Lyon (IDEEL), Paris Saclay Efficacité Énergétique (PS2E), Picardie Innovations Végétales, Enseignements et Recherches Technologiques (PIVERT), et Supergrid (réseaux haute tension).

La dépense publique de la France pour la recherche et le développement sur l'énergie a augmenté d'une centaine de millions d'euros depuis 10 ans, pour atteindre environ 1 Md € par an. Cette augmentation est principalement due aux crédits accordés pour les nouvelles technologies (la moitié des montants alloués) et regroupe les thématiques de l'efficacité énergétique, du stockage et de la transmission d'électricité, des piles à combustibles, des énergies renouvelables (électriques et thermiques), du captage et de la valorisation du CO_2.

Thomson Reuters a établi un classement des 100 innovateurs mondiaux, regroupant aussi bien les acteurs du public que du privé. Trois acteurs français y sont présents : le Centre National de Recherche Scientifique (CNRS), le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) et l'IFP Energies Nouvelles (IFPEN).

Synthèse AFOM

ATOUTS

Présence de plusieurs grands groupes industriels, actifs en R&D et à l'international

Tissu de sous-traitants en génie mécanique et génie électrique

Importance de certaines « ressources » locales : biomasse, ensoleillement, littoral...

Qualité de la recherche académique (notamment : stockage électrochimique, photovoltaïque)

Instruments et projets financés dans le cadre du PIA (dont : AMI ADEME, ITE)

FAIBLESSES

Faible degré de spécialisation technologique

Chaîne de valeur déséquilibrée sur certaines filières (ex : fabrication de cellules photovoltaïques)

Filières d'approvisionnement en biomasse insuffisamment structurées

Complexité de certaines procédures administratives

OPPORTUNITÉS

Chantiers pour le secteur nucléaire à l'international (nouveaux réacteurs, opérations de démantèlement)

Relance des actions en faveur de la lutte contre le réchauffement climatique au niveau international (cf. COP21 à Paris en 2015)

Gains de compétitivité de certaines énergies renouvelables (solaire, éolien)

Nouvelles activités de services liées à l'exploitation des réseaux, rendues possibles par les évolutions du cadre réglementaire et des technologies disponibles

Financements européens en matière de R&D et de démonstration, dont des dispositifs spécifiques à l'énergie (NER 300, KIC InnoEnergy)

MENACES

Volatilité du cours des hydrocarbures

Capacité d'investissement d'acteurs émergents (exemple de la Chine avec le solaire et l'éolien)

Avance technologique et industrielle des pays nords-européens en matière d'éolien offshore

Acceptabilité sociale, conflits d'usage (sols, espaces maritimes)

SOURCES

Académie des sciences (Comité de prospective en énergie)

La recherche scientifique face aux défis de l'énergie – septembre 2012

ADEME

Climat, air et énergie – Edition 2013

AIE

Energy Technology Perpectives – 2014 & 2015

World Energy Outlook 2014

Eurobserv'ER

EWEA

The European offshore wind industry – key trend and statistics 2013

France Énergie Eolienne

Statistiques

GIEC

Contribution du groupe de travail III au Vième rapport.

GWEC

Global Wind Report: annual market update 2013

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie :

Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte : enjeux et perspectives – mars 2013

Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables – mars 2013

Eolien, photovoltaïque : enjeux énergétiques, industriels et sociétaux

OPEP

World Oil Outlook 2014

SoeS

GLOSSAIRE

ADEME : agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

ANCRE : alliance nationale de coordination de la recherche sur l'énergie

ANDRA : agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

AIE : agence internationale de l'énergie

ASN : autorité de sûreté nucléaire

BRGM : bureau de recherches géologiques et minières

CEA : commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CDEFI : conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs

CIRAD : centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CITEPA : centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

CNRS : centre national de la recherche scientifique

CPU : conférence des présidents d'université

CSTB : centre scientifique et technique du bâtiment

DOE : department of energy (États-Unis)

GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

EWEA : European wind energy association

GWEC : global wind energy council

IFPEN : IFP énergies nouvelles

IFREMER : institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

IFSTTAR : institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

INERIS : institut national de l'environnement industriel et des risques

INRA : institut national de recherche agronomique

INRIA : institut national de recherche en informatique et en automatique

IRD : institut de recherche pour le développement

IRSN : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

IRSTEA : institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

LNE : laboratoire national de métrologie et d'essais

MW : méga watt (unité)

OCDE : organisation de coopération et de développement économique

ONERA : office national d'études et de recherches aérospatiales

PIPAME : pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques

PNAEE : plan national d'action en matière d'efficacité énergétique

Tep : tonne équivalent pétrole (unité)

TWh : téra watt heure (unité)

ppm : partie par million (unité)

SoeS : service de l'observation et des statistiques (ministère du développement durable)

SRCAE : schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie

© Fotolia

MOBILITÉ

Définition

La mobilité couvre l'ensemble des modes de déplacement de biens et des personnes. Elle comprend les modes de déplacement classiques comme la route avec l'automobile, les bus, les autocars et les poids-lourds, le ferroviaire avec les trains et tramways, l'aérien, le maritime, les modes doux comme la marche et le vélo. Par ailleurs, on s'intéressera tant aux véhicules et moyens matériels qu'à l'organisation des transports. Ainsi, les champs technologiques vont de la mécanique aux systèmes d'information, en passant par le génie civil, les outils d'optimisation logistique ou la formulation de matériaux.

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / Transversale
1	Matériaux avancés et actifs	Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données massives	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique	Transversale
5	Internet des objets	Transversale
6	Infrastructures de 5ème génération	Transversale
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs	Transversale
8	Procédés relatifs à la chimie verte	Transversale
9	Fabrication additive	Transversale
10	Cobotique et humain augmenté	Transversale
11	Intelligence artificielle	Transversale
12	Robotique autonome	Transversale
14	Technologies immersives	Transversale
15	Procédés relatifs à la chimie du pétrole	Transversale
16	Recyclage des métaux critiques et terres rares	Transversale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel	Transversale
22	Réseaux électriques intelligents	Transversale
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération	Transversale
24	Carburants de synthèse	Transversale
25	Technologies de l'hydrogène	Transversale
45	Technologies pour la propulsion	Spécifique

Les grands enjeux et les stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

Qu'elle soit pour les voyageurs ou les marchandises, la quête d'une mobilité écologique et durable est un enjeu toujours plus important tant pour la réalité de ses impacts que pour l'attente qu'elle suscite dans la société.

Malgré cela, les transports routiers croissent toujours : le trafic routier a progressé en France, entre 1990 et 2012, de 32 % pour les voyageurs et de 18 % pour les marchandises, au détriment d'autres modes moins polluants et moins consommateurs d'énergie tels que le ferroviaire (+9 % entre 1990 et 2012) ou encore le fluvial (+5 % entre 1990 et 2012). La route assure, en 2013, 83 % des déplacements des voyageurs et 88 % des déplacements de marchandises.

Figure 1 : Répartition du transport intérieur de voyageurs et de marchandises par modes (2012)[1]

1 – Rapport ADEME – Stratégie Transports et Mobilité (2014)

Avec 35 % des émissions totales, le transport est le premier secteur émetteur de CO_2 en France avec près de 130 $MtCO_2$[2] en 2011 (+16 % entre 1990 et 2000 et -7 % entre 2000 et 2011) comme le montre la figure 2. L'inversion de cette tendance est due notamment au succès commercial des véhicules diesel, moins émetteurs de CO_2. Les émissions dues aux autres modes de déplacement (aérien, ferroviaire et maritime) sont aujourd'hui anecdotiques comparées au mode routier. Le secteur aérien contribue aujourd'hui à 3,3 % des émissions de gaz à effet de serre mais affiche une croissance considérable de 87 % ces quinze dernières années. L'objectif à horizon 2020[3] est de réduire de 50 % les émissions de CO_2 et de 80 % les émissions d'oxyde d'azote (NOx).

Figure 2 : Évolution des émissions de CO_2 du secteur des transports[4]

L'impact considérable sur la qualité de l'air représente aujourd'hui un enjeu sanitaire en France. Il est estimé que l'exposition aux particules fines ($PM_{2,5}$) réduit l'espérance de vie de 8,2 mois et est à l'origine de 42 000 décès[5] prématurés chaque année. D'une manière générale, les études scientifiques montrent un lien étroit entre pollution de l'air et pathologies respiratoires et cardiovasculaires ; le programme APHEKOM[6] en 2012, conclut à environ 3 000 décès évités par an pour les 12 millions d'habitants de 9 grandes villes, associés au respect des valeurs guides. Notamment les véhicules diesels sont aujourd'hui classés comme « cancérigènes certains » par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

2 – millions de tonnes de CO_2

3 – ACARE – Conseil consultatif pour la recherche aéronautique en Europe.

4 – Source : Direction générale de l'énergie et du climat, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2013)

5 – Rapport IIASA 2005

6 – http://www.aphekom.org

Le secteur européen de la mobilité se mobilise sur cette question environnementale autour des problématiques suivantes[7] :

- Allègement des véhicules terrestres, aériens et maritimes. Les exemples des prototypes Renault Eolab ou encore les récents Airbus A350 et Boeing 787 ;
- Développement des carburants alternatifs ((bio) CNG et LNG, électrique à batterie ou à hydrogène…) ;
- Aérodynamisme et amélioration de la tribologie ;
- Améliorer les rendements des moteurs et systèmes de propulsion et optimiser l'utilisation de l'électronique de puissance afin d'améliorer la production électrique à bord, notamment pour l'aéronautique ;
- Indirectement liée au vecteur de mobilité, une meilleure gestion du trafic qu'il soit aérien ou terrestre ;
- La problématique du bruit est également à prendre en compte dans les enjeux environnementaux, notamment pour les poids lourds et les avions ;
- Le véhicule connecté fait également partie de la réponse aux enjeux environnementaux ;
- Enfin, limiter la mobilité par des évolutions en matière d'urbanisme (rapprochement des zones d'emploi et de résidence) ou d'organisation du travail (télétravail, téléconférences…) est un axe de réflexion.

RÉGLEMENTATION

La réglementation en matière de déplacements et de transports est un moteur essentiel de l'innovation technologique sur les véhicules et les transports ; elle porte sur leurs différentes dimensions :

- **Environnement**

Créée en 2001, la directive CAFE (Clean Air for Europe ou Air pur pour l'Europe) a pour mission d'établir une stratégie intégrée et de lutter contre la pollution atmosphérique. La directive définit des seuils d'émission des polluants dans l'atmosphère, notamment à destination des industriels automobiles.

L'Union européenne a quant à elle instauré des normes pour les émissions des véhicules neufs :

- 130g CO_2/km en 2015 ;
- 95g CO_2/km en 2020.

7 – SRRIA and ERTRAC Roadmaps – H2020 (2014)

C'est en ce sens qu'une procédure mondiale d'homologation des émissions visant une harmonisation mondiale des tests de véhicules (*worldwide harmonized light vehiclés test procedure, WLTP*) a été engagée et dont la mise au point devrait être finalisée au mois d'octobre 2015. Le RDE (Real Driving Emissions) sera également un cadre règlementaire clé pour les tests et certifications des futurs véhicules, entre 2017 et 2020. Enfin, la commission européenne engage en 2015 les premières négociations sur la réduction des émissions de CO_2 après 2020.

La directive européenne 2000/53/CE du 18 Septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage (VHU) instaure des enjeux majeurs d'un point de vue environnemental. La directive fixe des objectifs chiffrés qui devaient être atteints au plus tard le 1er Janvier 2015 à :

- Un taux minimum de réutilisation et de recyclage de 85 % en masse de VHU ;
- Un taux minimum de réutilisation et de valorisation de 95 % en masse de VHU.

La directive européenne REACH pour la gestion des substances chimiques a pour objectif principal d'assurer un niveau élevé de protection de la santé humaine et de l'environnement (métaux lourds, composés organiques volatils, radionucléides, etc.). L'interdiction de certaines substances impacte les procédés et les produits des différents secteurs de la mobilité.

La norme Euro VI, applicable depuis janvier 2014 pour les poids lourds et septembre 2015 pour les véhicules particuliers, exige 5 fois moins de rejets d'oxydes d'azote et 3 fois moins de rejets de particules que la précédente. L'adaptation des véhicules Diesel à cette norme renchérit leur coût d'achat et d'entretien.

La directive AFI (Alternative Fuel Infrastructure) sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs a été publiée au Journal officiel de l'Union Européenne le 28 octobre 2014. Elle oblige les États-membres à se doter d'une stratégie nationale pour mettre en place des infrastructures de carburants alternatifs et ainsi développer la mobilité durable alternative.

Dans le monde maritime, la directive dite « soufre » adoptée fin 2013 impose depuis le 1er janvier 2015 une limitation ambitieuse de la teneur en soufre des combustibles maritimes à 0,1 % (contre 1 % auparavant) dans les zones SECA, incluant la Manche, la Mer Baltique et la Mer du Nord. En dehors de ces zones, l'obligation sera de 0,5 % eu 1er janvier 2020.

Nuisances sonores

L'OMS[8] considère le bruit dans l'environnement comme un problème de santé publique. La règlementation française comprend plusieurs dispositifs de lutte contre les nuisances sonores introduits par la loi du 11 Juillet 1985 relative à l'urbanisme au voisinage des aérodromes, la loi du 31 Décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit et la directive 2002/49/CE relative à l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement.

Sécurité

La règlementation concernant la sécurité électrique des véhicules électriques et hybrides est en passe d'harmonisation via un Règlement Technique Mondial (RTM). L'Europe se base sur la règlementation internationale de Genève (règlementation ECE), les États-Unis divergent sur certains points de l'ECE, alors que la Chine produit des normes et règlements avec des exigences sévères qui freinent de nombreux projets. En outre, la règlementation en cours (R100.01) en Europe concerne la protection contre le contact direct et le contact indirect du véhicule, la résistance d'isolation et la sécurité fonctionnelle. L'Europe, la Chine et le Japon ont voté la R100.02 qui ajoute à R100.01 la sécurité de la batterie et R94, R95 et R12 sur les exigences post crash.[9]

Un règlement européen de 2009 (EC/79/2009) établit des normes européennes pour l'homologation des véhicules à hydrogène. Cette législation vise à assurer le bon fonctionnement du marché européen de ces voitures et à fournir un cadre aux fabricants qui développent déjà des véhicules de ce type. Le règlement permet aussi de promouvoir les voitures à hydrogène dans les villes européennes et de protéger leur environnement.

EuroNCAP, le programme indépendant d'évaluation européen pour l'automobile, prévoit des crashs tests afin de tester la sécurité imposée par la législation. En raison des constantes avancées des constructeurs automobiles en matière de résistance au crash, deux nouvelles épreuves entrent en vigueur en 2015 sur les

8 – Burden of disease from environmental noise, Bureau régional Europe, OMS (2011)

9 – PFA – 11/12/2013

tests en choc frontal et latéral. La conformité à cette certification non-obligatoire est un moteur fort de l'innovation en termes de sécurité active et passive.

La forte expansion du marché des drones civils ces dernières années a contribué à l'accélération des avancées règlementaires. La France a été l'un des premiers pays au monde à avoir développé une règlementation spécifique permettant l'usage des drones civils à des fins industrielles et commerciales. Les différents scénarios de vol et le cadre règlementaire précis établis par la DGAC ont permis de garantir des opérations en toute sécurité, tout en offrant un cadre propice au développement de très nombreux usages. La réglementation a ainsi permis, sur une base simple, d'autoriser l'exploitation d'appareils de faible poids (jusqu'à 25 kg pour la majorité), essentiellement à basse altitude (maximum 150 mètres), sans survol de population, et en-dehors des zones de trafic aérien, pour éviter toute collision avec d'autres aéronefs. La grande majorité des drones civils sont opérés « en vue du pilote ». Cependant, la réglementation française a également permis l'opération de drones légers hors de la vue du télépilote, sur des longues distances. Il s'agissait là d'une première mondiale en matière de réglementation des drones civils. La Commission européenne travaille actuellement sur une harmonisation de la règlementation sur les drones civils et des réflexions sont en cours sur les assurances.

Enfin, l'émergence des véhicules autonomes nécessite un cadre règlementaire strict et clair. De nombreux gouvernements, notamment aux États-Unis où les états autorisent de plus en plus la circulation des véhicules autonomes pour les premières expérimentations en circulation. En France des évolutions du cadre règlementaires sont prévues dans le cadre du plan « Véhicule Autonome » entre 2014 et 2019 en vue des expérimentations et de la mise sur le marché des véhicules.

■ Usages de la mobilité – les VTC

Les plans de déplacements urbains (PDU) consistent à planifier sur une période de 10 ans un projet global en matière d'aménagement du territoire et des déplacements. Selon l'article 1214-1 du Code des Transports, le PDU vise à déterminer « *les principes régissant l'organisation du transport de personnes et de marchandises, la circulation et le stationnement dans le ressort territorial de l'autorité organisatrice de la mobilité* ». À titre d'exemple, les objectifs du PDU en Ile de France vise, entre autres, une réduction de 20 % des GES d'ici 2020, une croissance de 20 % des déplacements en transports collectifs, une croissance de 10 % des déplacements en modes actifs (marche et vélo) et une diminution de 2 % des déplacements en voiture et deux-roues motorisés.

Les VTC (Véhicules de Tourisme avec Chauffeur) sont aujourd'hui au cœur d'un différend les opposant aux taxis pour des questions de règles de concurrence. Fin 2014, les textes réglementaires sur les nouvelles formes de mobilité individuelle évoluent régulièrement et devraient faire l'objet de modifications au fur et à mesure des retours d'expérience[10].

■ Ferroviaire[11]

En France, le cadre législatif et règlementaire des transports est imposé par la Loi d'orientation des transports intérieurs (LOTI) et précise en particulier la répartition du service public du transport ferroviaire entre les différents acteurs du territoire : État, Régions, Départements et Autorités organisatrices des transports publics. La règlementation française résulte de la transposition des directives européennes applicables au transport ferroviaire de voyageurs qui aborde :

- La séparation des rôles de gestionnaires d'infrastructures et d'exploitation des services,
- La répartition des capacités d'infrastructures ferroviaires,
- La sécurité ferroviaire,
- L'ouverture à la concurrence des transports internationaux.

Au vu de la forte dette contractée par les opérateurs ferroviaires (44 Md€), la nouvelle réforme ferroviaire adoptée en 2014 prévoit la réunification de la SNCF et de RFF pour créer des synergies et mutualiser les coûts en prévision de l'ouverture du marché à la concurrence en faisant financer les grands travaux directement par l'État.

D'un point de vue plus opérationnel, le système ERTMS (European Railway Traffic Management System) vise à harmoniser les systèmes de signalisation ferroviaires européens.

---

10 – Étude de cas Allocab (VTC), 2014

11 – Service d'études sur les transports, les routes et les aménagements, MEDDE (2009)

Un accélérateur du déploiement des innovations dans les secteurs de la mobilité est la globalisation des réglementations, permettant un accès large au marché pour les entreprises européennes. À contrario, un frein à l'innovation est parfois la sévérisation des réglementations, qui nécessite alors une forte anticipation de leur mise en œuvre.

MARCHÉ

La croissance de la mobilité est hétérogène entre les différents pays ces prochaines années. Modérée dans les pays développés alors qu'elle sera très importante dans les pays émergents. Les caractéristiques des pays développés par rapport aux pays émergents sont les suivantes[12] :

Pays développés

- Revenus élevés mais croissance ralentie
- Urbanisation développée, à faible croissance
- Population stable et vieillissante
- Motorisation élevée, à peu près stabilisée
- Systèmes contraignants de dépendance automobile

Pays émergents

- Revenus bas mais à forte croissance
- Urbanisation massive, émergence de mégalopoles accompagnées de forte croissance des villes de second rang
- Population jeune, en forte croissance
- Motorisation faible, en forte croissance
- Autres segments de mobilités possibles

Automobile

L'automobile est omniprésente dans la plupart des grandes villes mondiales. Le CAS[13] parle même d'un « modèle de société automobile » avec des variantes où la voiture reste omniprésente (notamment dans les grandes villes américaines). Certaines métropoles comme Paris, Londres, Amsterdam ou encore Hong-Kong sont moins structurées sur ce « modèle de société automobile ». La marche à pied, les transports collectifs et les vélos y occupent une place importante. Enfin, l'urbanisation des pays émergents est un facteur de croissance pour le développement de la mobilité et ses infrastructures.

La Chine reste en tête des ventes automobiles en 2014 et domine le marché de l'automobile depuis maintenant plusieurs années. L'Allemagne conforte sa place de numéro 1 européen. En revanche, la situation géopolitique complexe en Europe de l'Est, notamment depuis que la Russie est soumise à des sanctions internationales, a un impact néfaste sur le marché automobile. Avec une chute de 23 % des ventes en juillet et 26 % en août, les constructeurs locaux ont revu leurs objectifs et leurs stratégies marchés. D'une manière générale, le marché automobile européen présente de fortes différences suivant les pays : niveaux d'équipement hétérogènes, âge du parc, dynamisme des ventes, etc.

Figure 3 : Ventes mondiales d'automobiles (Source : Comité des Constructeurs Français de l'Automobile)

Rail

Le marché mondial représentait 105 Mds€ en 2013. L'industrie ferroviaire est dominée aujourd'hui par le trio Amérique/Asie-Pacifique/Europe et est de plus en plus tirée par les pays émergents qui promeuvent une mobilité durable et écologique comme les pays du Golfe notamment (Qatar, Bahrein, Émirats Arabes Unis, etc.). À titre d'illustration, l'urbanisation croissante a des conséquences positives en termes de besoins d'équipement : on estime que plus de 330 parmi les 500 villes[14] de plus d'un million d'habitants dans le

12 – Rapport CAS – Les nouvelles mobilités (2011)

13 – Commissariat général à la stratégie et à la prospective (ex centre des affaires stratégiques).

14 – Source AIF

monde n'ont pas encore de transports urbains guidés, et pourraient donc franchir le pas dans les prochaines décennies.

Aéronautique

L'année 2014 a été marquée par une nouvelle progression du trafic aérien mondial de passagers supérieure à 5 % et de nouveaux records en termes de commandes et de livraisons pour les grands avionneurs mondiaux (1 490 appareils livrés et 3 680 commandés). La tendance historique du trafic aérien, en croissance de l'ordre de 5 % par an depuis 30 ans, soit un doublement tous les 15 ans, devrait se prolonger à moyen terme en lien avec la croissance économique mondiale. Les avionneurs estiment que 32 000 à 38 000 avions nouveaux seront mis en exploitation à horizon 20 ans, soit pour renouveler les flottes existantes (Amérique du Nord, Europe), soit pour équiper les marchés émergents ou en développement (Asie, Moyen-Orient) où le développement économique appelle de nouveaux besoins de mobilité. Sous ces hypothèses, le marché mondial de la construction aéronautique civile devrait représenter environ 5 000 Md$ en valeur sur les 20 prochaines années.

Les prises de commandes record des dernières années ont porté les carnets de commandes d'Airbus et de Boeing à des niveaux historiques représentant plus de 8 années de production aux cadences actuelles. Afin de continuer à livrer leurs clients dans des délais raisonnables, Airbus et Boeing ont désormais pour priorité la montée en cadence de leur production. Pour son best-seller, l'A320, l'objectif d'Airbus est ainsi d'augmenter la production à 50 appareils par mois contre 42 actuellement d'ici début 2017, avec un point d'étape mi-2016 à 46 appareils par mois.

Naval

La Chine conforte son rang de leader dans la construction navale et son carnet de commande ne fait qu'augmenter. Les commandes exécutées en 2013 s'élèvent à 35 Mt en port lourd (37,8 % du total mondial), les commandes reçues s'élèvent à 46,44 Mt (46,4 % total mondial) et les commandes en cours portent sur 118 Mt (45,4 % du total mondial). L'Europe, quant à elle, conforte ses niches technologiques, construisant principalement des navires spécifiques où les fonctions de travail l'emportent sur celles de transport de marchandises (paquebots, yachts, navires support à l'offshore, etc.). L'Europe élargie à la Turquie et la Russie ne représente que 10 à 12 % du total des navires en commande – soit le 4e rang mondial derrière la Chine, la Corée et le Japon.

Logistique/Fret

La logistique, dont la logistique de transport, est un élément clé de la compétitivité des entreprises. Faciliter les échanges est par ailleurs un facteur clé de l'attractivité industrielle du territoire national, conduisant à des concurrences entre territoires sur les grands aménagements. Le marché du fret est aujourd'hui dominé par le transport routier (83 % des marchandises transportées), y compris sur les longues distances, en raison notamment de la faiblesse du secteur du fret ferroviaire français. Porté par plus de 37 000 entreprises, le transport routier intérieur de marchandises représente en 2013 188 milliards de tonnes.km, contre 100 milliards de tonnes.km sous pavillon étranger.

Du point de vue de la logistique, force est de constater le lien direct entre croissance économique et intensité de l'activité de fret, faisant des zones de forte croissance comme l'Asie du Sud-Est des marchés de croissance incontournables.

Amorçage de la mobilité hydrogène

Le consortium public-privé Mobilité Hydrogène France, fédéré par l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC), a présenté en septembre 2014 une étude sur les bénéfices et les possibilités de diffusion des véhicules électriques à pile à hydrogène, basée sur les demandes réelles et immédiates des premiers marchés que constituent les flottes de véhicules professionnels en environnement urbain. Les résultats de cette étude confortent les perspectives concrètes d'un plan de déploiement sur le territoire national. Le scenario d'ici à 2020 propose 15 à 20 stations, 500-700 véhicules utilitaires légers et quelques dizaines de petits camions, permettant d'épargner 500 M€ entre 2015 et 2030 en terme de santé publique, de générer 700 M€ de chiffre d'affaires et de réduire de 1,2 Mt les émissions de CO_2 par an (10,5 Mt en 2050).

L'originalité de l'approche française réside dans l'utilisation des véhicules électriques existants, dont on améliore l'autonomie par des prolongateurs à base de piles à hydrogène. Cette option permet d'étendre les ventes des véhicules électriques à des usages plus intensifs, comme ceux de la livraison urbaine de colis.

Les publics spécifiques

La Silver Économie[15] est aujourd'hui une opportunité de croissance importante pour la France. Le secteur de la mobilité se voit impacté par ce vieillissement démographique notamment autour de la problématique de perte d'autonomie qui impacte les mobilités domestique et extérieure. On peut alors citer les dispositifs de transports aux personnes à mobilité réduite ou encore à l'assistance à domicile. Le marché français de la Silver Économie représente en 2013 92 Md€ et dépassera les 130 Md€[16] en 2020. L'effet d'âge a un impact considérable sur la mobilité : en vieillissant, la population devient moins mobile et plus sédentaire. L'effet de maturité montre que la population vieillissante est plus réceptive aux nouvelles technologies et est plus axée sur une demande haut de gamme, avec un taux de renouvellement plus faible.

Les Smarts Cities

La forte dynamique autour de la ville intelligente est une opportunité pour la mobilité durable, interopérable (et donc multimodale), particulièrement pour la filière du stationnement automobile qui est aujourd'hui au carrefour de la mobilité. De nombreux services voient le jour afin d'améliorer la qualité de l'expérience de l'usager, allant de l'information voyageur à la billettique. D'une manière plus générale, le Big Data est aujourd'hui un levier avéré pour la mobilité interopérable car elle « connecte » les utilisateurs aux différentes infrastructures existantes.

PRODUCTION

L'Asie conforte sa place de premier producteur automobile mondial, marché aujourd'hui en convalescence pour les acteurs européens en ce premier semestre de 2014. Ce phénomène de délocalisation des industriels de l'automobile est motivé par une optimisation des coûts et par le rapprochement de ses marchés locaux. Depuis 2000, 30 % de la production française a diminué au profit de l'Espagne, de l'Europe centrale et orientale (PECO) et le Maghreb.

Figure 4 : Production mondiale d'automobile (Source : Comité des Constructeurs Français de l'Automobile)

Dans le même ordre d'idées, les grands contrats en aéronautique civile, de défense ou de matériels roulants ferroviaires sont régulièrement assortis d'engagement des industriels en termes de transferts de technologie ou d'une partie de la production, voire des services associés.

L'Usine du futur, chantier phare de la Nouvelle France Industrielle (NFI), porte une approche évolutive des méthodes industrielles. Un exemple marquant est la montée en puissance de l'impression 3D comme outil de production ou de la cobotique, permettant aux chaines de production de gagner en versatilité et en flexibilité.

L'accès à la matière première, notamment certains métaux[17] produits à 97 % en Chine, est un enjeu majeur de taille pour les industriels des transports, que l'on parle d'automobile (les terres rares par exemple sont utilisées pour la conception d'aimants permanents destinés à la conception et la fabrication des moteurs pour véhicules électriques dans l'automobile) ou d'aéronautique (pour les alliages spéciaux).

Les grandes tendances

TECHNOLOGIQUES

Les véhicules décarbonés

Le véhicule 2l/100km, également objet d'un des 34 plans, est la suite logique des avancées technologiques des dernières années. Les règlementations sur l'efficacité énergétique et environnementale, et

15 – Rapport CAS - La Silver Économie, une opportunité de croissance pour la France (2013)

16 – DGE, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

17 – Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobile et aéronautique, PIPAME

notamment les engagements internationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, poussent les constructeurs à réinventer les motorisations et la conception même des véhicules afin de s'y conformer. On peut citer par exemple en réponse à cet enjeu l'allègement des véhicules et l'utilisation de matériaux comme la **fibre de carbone** ou encore les **chaînes de traction hybrides**. La mobilité verte est aujourd'hui un catalyseur de nouvelles alliances et partenariats R&D entre donneurs d'ordre, équipementiers et chercheurs, à l'image de Renault et Bolloré, BMW et Daimler ou encore Nissan et Ford…

Le véhicule électrique est aussi un chantier important. Les nouvelles technologies de motorisations, de stockage et de conversion d'énergie sont au cœur des activités des industriels de l'automobile. Les **moteurs électriques à aimants permanents** par exemple équipent la plupart des véhicules électriques. Compte tenu de la rareté des terres rares nécessaires à la fabrication des aimants du moteur, certains constructeurs optent pour le moteur à **rotor bobiné**. La technologie de batteries **lithium** répond au mieux aux enjeux du véhicule électrique : capacité volumique de stockage chimique de l'énergie, limitation des risques de détérioration. Les BMS (**Battery Management/Monitoring System**) sont aussi un composant critique des systèmes – aussi bien pour les véhicules électriques qu'hybrides – pour prolonger la vie de la batterie en protégeant les cellules et la batterie des défaillances, déclencher les actions nécessaires en cas de détérioration de la batterie ou des cellules et assurer la traçabilité lors de la vie de la batterie. Le déploiement accru des bornes de recharge électrique et des politiques d'incitation sont des moteurs du marché, et objets d'innovations technologiques. L'utilisation **de piles à combustibles (hydrogène)** dans le champ de la mobilité (voitures, mais aussi véhicules industriels) fait également l'objet de développements prometteurs. Toyota a ainsi commercialisé en 2015 un véhicule basé sur cette technologie, la Mirai, et la plupart des constructeurs poursuivent des programmes de R&D sur le domaine.

Le downsizing, qui consiste à diminuer la taille de la cylindrée sans réduire ses performances constitue un réel enjeu économique mais également environnemental pour les constructeurs automobiles. Renault a lancé en 2014 un premier moteur 1,6 l diesel bi-turbo qui délivre une puissance de 160 ch[18] et un couple moteur de 380 N.m[19], dont les performances permettent de diminuer les émissions de CO_2 de près de 25 %.

Enfin, les acteurs des filières du transport se penchent sur la problématique de la seconde vie de la batterie et **son recyclage comme le démantèlement et le traitement des cellules de la batterie endommagée**. Des alternatives au lithium sont également en développement au cas où la ressource viendrait à manquer comme les batteries au **magnésium** ou autour des **enzymes de la biomasse** par exemple.

Mobilité urbaine

Concept datant de 2005, on retrouve de plus en plus (57 %) de projets **Bus à Haut Niveau de Service** dans le troisième appel à projets de transports collectifs porté par le Ministère en charge de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE). À cheval entre le bus en site propre et le tramway, ce bus amélioré circule sur voie propre (TCSP) et garantit donc une circulation fluide et des temps d'attentes réduits. L'intégration des technologies et services télématiques comme l'information voyageurs ou encore la billettique sont aujourd'hui gages de confort et d'innovation. Le BHNS serait une solution idéale pour les petites agglomérations où le tramway ne peut être déployé.

Le véhicule autonome et communicant

Le véhicule autonome et communicant, qui fait partie des 34 plans de la NFI, est aujourd'hui un moteur de l'innovation dans la filière automobile avec une commercialisation des premiers modèles annoncée pour 2020 par les acteurs français (Renault Next Two par exemple) et internationaux. Outre les technologies d'assistance à la conduite (ADAS) telles que l'assistance au stationnement, la multiplication des capteurs (caméras, radars) et les technologies de **télématique et services connectés** (GPS connectés, téléphonie, multimédia), l'innovation se focalise sur l'autonomisation des véhicules : autonomie de la prise de décision, actionneurs, capteurs… dans une problématique d'optimisation de coût, de sécurité, d'interaction entre mobiles, mais aussi avec les usagers (piétons, conducteurs…). À l'exemple du véhicule de Google, la voiture

18 – Chevaux

19 – Newton.mètre

est aujourd'hui capable de s'insérer et de circuler en toute sécurité sur la voie publique.

Rail

Le TGV du futur vise une augmentation du nombre de places de 25 %, et 50 % d'économies d'énergie de traction. Il est une vitrine des enjeux technologiques rencontrés par le rail. Une meilleure résistance des voies/rails permet par exemple d'augmenter la vitesse des trains et de répondre aux problématiques liées à la tribologie, aux vibrations et de nuisances sonores. Des aciers plus résistants à la fissuration et à l'usure ont pu être mis au point par des recherches, comme les **aciers bainitiques** (testés par Eurotunnel) dont la microstructure fine permettent de retarder l'apparition de fissures ou les **aciers perlitiques**, dont la formulation enrichie en chrome permet une forte résistance à l'usure.

Depuis ses débuts en 1981 avec le TGV SE, suivi par le TGV Atlantique en 1989, la Très Grande Vitesse est toujours un sujet sur lequel les entreprises travaillent et cherchent à innover. L'**AGV (Automotrice Grande Vitesse)** répartit la motorisation sur l'ensemble de la rame, apportant gain de place et de consommation énergétique. La technologie AGV offre la modularité du matériel roulant et assure la réussite du carry-over qui est aujourd'hui un facteur essentiel de rentabilité et de gain de temps de développement.

Le confort de l'usager est également un enjeu considérable de la mobilité et particulièrement de la filière ferroviaire. Le domaine des équipements ferroviaires embarqués donnent naissance à des produits plus performants et constamment adaptés aux besoins des passagers et exploitants. Cela passe par des améliorations d'ordre esthétique - design, revêtement anti tag… - ou pratique - accès WIFI, espaces vélos, portes à larges ouvertures ou encore la climatisation, qui doit également prendre en compte l'efficacité énergétique du train.

Enfin, une **signalisation** et un **contrôle commande** bien conçus et robustes garantissent une circulation des trains en toute sécurité en permettant le dialogue entre les trains et l'infrastructure. L'enjeu principal de la signalisation est celui de l'**interopérabilité** et de l'harmonisation. La norme actuelle en Europe est **ERTMS** (*European Rail Trafic Management System*) qui se repose sur une brique GSMR (téléphonie mobile) et ETCS (*European Train Control System*), permettant au train de passer d'un réseau à un autre sans interruption. Les technologies d'aide à la conduite, exploitation et la maintenance (**SACEM**), les pilotages intégralement automatisés sont de plus en plus répandus dans nos trains et métros.

Intermodalité et mobilité 2.0, l'informatique au service de la mobilité

Il s'agit ici du développement de solutions informatiques qui harmonisent les données afin d'en faciliter l'accès pour adapter nos déplacements de demain. L'**information multimodale** est un critère indispensable aujourd'hui car elle donne la possibilité de planifier des itinéraires optimaux « minute par minute » tout en combinant plusieurs modes de transports qui s'appuient sur des infrastructures différentes les unes des autres.

Logistique

Trois grands axes de développement technologique sont portés par la logistique :

- Les technologies pour la traçabilité et le suivi des marchandises : RFI, NFC, etc. ;
- Les systèmes pour l'optimisation de la chaîne logistique, permettant notamment de limiter les pertes de temps liées aux ruptures de charge et de couvrir de manière efficace le dernier kilomètre et l'approvisionnement juste à temps.
- La limitation des émissions polluantes comme sonores des groupes froids lors du transport réfrigéré en zone urbaine est également une piste d'amélioration significative tant environnementale qu'économique suivie par de grands transporteurs tels que STEF, STAF

Aérien

L'avion à propulsion électrique ou hybride est aussi pris en compte dans les 34 plans initiaux de la NFI. Bien que le secteur aérien soit responsable de seulement 3 % des émissions mondiales de GES, il existe une réelle volonté des pouvoir publics de converger vers des systèmes de propulsion aéronautiques plus respectueux de l'environnement. À ce titre, plusieurs entreprises misent sur le potentiel des avions électriques, à l'instar d'Airbus Group avec son projet E-Fan d'avion-école biplace à propulsion 100 % électrique, qui vise une production en série pour le marché de la formation initiale des pilotes. D'autres projets sont également en cours de

développement, mais avec une visée plus sportive qu'industrielle, notamment le projet d'avion solaire Solar Impulse 2 ou encore le projet Eraole d'avion hybride biocarburant et photovoltaïque porté l'association Océan Vital. À plus court terme, l'électrification des systèmes de traction pour déplacer les avions au sol (*pushback*, roulage) offre un important potentiel d'économie de carburant, estimé entre 4 % et 8 % selon les solutions développées. Le motoriste Safran a ainsi investi avec son partenaire Honeywell dans le développement d'une solution de roulage électrique (*green taxiing*) qui permet d'utiliser l'énergie électrique fournie par le groupe auxiliaire de puissance (APU) plutôt que de solliciter les moteurs principaux grâce à des actionneurs intégrés aux roues du train d'atterrissage principal. La solution alternative consiste à électrifier les traditionnels tracteurs d'avions, à l'instar du TaxiBot et du TBL à propulsion hybride développés respectivement par le groupe français TLD et le groupe suédois Kalmar Motor, tous deux testés en conditions réelles depuis début 2015 dans le cadre du projet « E-Port an » sur l'électromobilité à l'aéroport de Francfort.

Le JTI européen Cleansky, structurant la recherche européenne en aéronautique, s'appuie sur les objectifs de la feuille de route ACARE 2020 :

- Réduire la consommation de carburant de 50 % par passager.kilomètre ;
- Réduire les émissions de CO_2 de 50 % par passager. kilomètre ;
- Réduire les émissions de NOx de 80 % ;
- Réduire les nuisances sonores de 50 % ;
- Réduire l'impact environnemental de la production, la maintenance et la seconde vie (recyclage) des aéronefs.
- Cleansky identifie deux types de systèmes pour atteindre ces objectifs :
- MAE - Management of Aircraft Energy (Gestion énergétique de l'aéronef) qui comprend notamment les architectures 100 % électriques et une meilleure gestion thermique des moteurs.

Figure 5 : Modélisation d'un système de gestion énergétique (Source : Cleansky)

- MTM - Management of Aircraft Trajectory and Mission (Gestion de la trajectoire des aéronefs) qui comprend le trafic aérien mais également les opérations au sol.

Figure 6 : Modélisation de la trajectoire optimale d'un aéronef (Source : Cleansky)

- En 2013, le niveau d'avancement des membres de Cleansky sur ces problématiques environnementales est le suivant[20] :

Clean Sky concept aircraft	Noise area (take-off)	CO_2	NO_x
Low Sweep Bizjet (innovative Empennage)	-68%	-30%	-26%
High Sweep Bizjet	-10%	-19%	-26%
TP 90 (Regional Turbo-prop)	-71%	-30%	-34%
GTF 130 (Regional geared Turbo-fan	-76%	-20%	-34%
Short-medium range /CROR engine	-36%	-28%	N/A
Long Range /3 shaft Advanced Turbo-fan	-27%	-18%	-17%
Single Engine Light	-47%	-30%	-75%
Twin Engine Light	-49%	-26%	-74%
Twin Engine Heavy	NA	-22%	-47%

Figure 7 : Problématiques et avancement actuels des acteurs de Cleansky (2013)[21]

20 – Source : Cleansky (2013)

21 – Source : Cleansky

Les technologies autour de la sûreté et de la sécurité sont aussi essentielles pour la mobilité aérienne. Alors que l'impact de l'erreur humaine est significativement réduit grâce aux avancées de design, des formations et des technologies d'aide à la décision, il est nécessaire d'être capable de prédire les éventuelles défaillances. C'est pourquoi les systèmes avancés à bord de monitoring permettent de plus en plus la prédiction et la résolution de défaillances techniques et opérationnelles liées qui peuvent être intrinsèques ou d'origine extérieure. La sécurisation des données de navigation, des données de vol, de la communication air-sol est constamment renforcée contre les cybers attaques.

Maritime

Le navire écologique est un des 34 plans de la NFI, dans leur version de 2013. Les acteurs de la filière française ont engagé plus de 250 projets de R&D collaborative ce qui représente plus de 800 M€ d'investissements depuis 2006[1].

Les acteurs de la filière visent un objectif de réduction de 50 % des impacts environnementaux et de la consommation de carburant des navires, ainsi que d'amélioration de la sûreté de fonctionnement et de la sécurité des passagers, équipages et cargaisons. La concrétisation de ces ambitions passera en particulier par l'intégration des nouvelles technologies de l'information sur les navires.

L'utilisation du gaz naturel liquéfié (GNL) comme carburant marin, de l'énergie électrique et de la production vélique auxiliaire, le traitement des émissions, la récupération d'énergie et le navire éco-intelligent sont les défis de la filière navale d'aujourd'hui.

Principales actions	Pilote	Calendrier	Finalités / livrables
I. Relever le défi énergétique : GNL, énergie électrique et propulsion vélique			
Développer conjointement l'offre industrielle française et l'utilisation du GNL comme carburant marin			
Développer un navire ravitailleur GNL à membranes	GTT	Mise en service en 2017	Prototype
Accompagner les armateurs dans leurs projets d'investissement dans des ferries propres	Ministères	Appel à projets ouvert jusqu'à fin 2015	Flottes rénovées
Accompagner le déploiement des infrastructures portuaires dédiées à l'utilisation du GNL	Ministères	Lancement d'un appel à projets fin 2014	Stations d'approvisionnement en GNL
Aboutir à des navires intégrant une électrification optimale			
Développer un navire de pêche à propulsion hydrogène	DCNS	Mise en service en 2018	Prototype
Utiliser la force du vent par le vélique			
Développer et industrialiser la propulsion auxiliaire des navires par kits	Beyond the Sea	2015 à 2019	Offre de kits
Développer un prototype paquebot à propulsion hybride vélique-électrique	STX France	Mise en service en 2018	Prototype
II. Développer une passerelle intelligente			
Développer une passerelle maritime intelligente	Sagem	2015 à 2018	Offre de passerelle intégrée complète et équipements
III. Tendre vers le navire éco-efficient			
Développer et intégrer sur navire des équipements de traitement des rejets à bord	DCNS STX France	2014 à 2020	Offre de système complet de traitement
IV. Renforcer les fonds propres et les capacités export			
Renforcer les fonds propres et les capacités export des PME et ETI de la filière navale française	GICAN	à partir 2014	Solutions de financement des navires et équipements

Figure 8 : Synthèse des actions du plan «navires écologiques»[23]

22 – CORICAN – comité de pilotage « navires écologiques » (2014)

23 – Source : CORICAN – Recherche et innovation navale

INDUSTRIELLES

Automobile

Des constructeurs aux équipementiers, les acteurs de l'automobile **consolident leur stratégie internationale** et investissent de plus en plus en **Asie et en Europe de l'Est**. La Chine ou la Russie (dont les marchés automobile connaissent en 2015 un ralentissement, voir un fort recul en ce qui concerne la Russie) sont devenus des secteurs d'investissement massifs de l'industrie automobile européenne. Ces actions ont pour but principal d'améliorer l'accès à des marchés aujourd'hui difficilement accessibles pour les acteurs « non-locaux », de **renforcer des synergies et des process** afin de relancer la productivité et **d'améliorer la rentabilité de production et de concevoir de nouveaux produits**.

Le développement de la mobilité au gaz naturel et notamment au biométhane, que ce soit **CNG** ou **LNG**, est une tendance marquée. On prévoit 65 millions de véhicules au GNV dans le monde d'ici à 2020[24], soit 9 % du marché. En France, les poids lourds au GNV devraient constituer 10 % de la flotte des nouvelles immatriculations d'ici 2020 et 40 % en 2030, le GNV équipant également respectivement 2 et 6 % de la flotte des véhicules particuliers et des véhicules utilitaires légers en 2030[25]. De grands constructeurs proposent des modèles de motorisations au gaz naturel, comme IVECO ou Scania, qui construisent ces modèles en France.

Aéronautique

Les États-Unis et l'Europe sont les deux marchés historiques majeurs de l'aéronautique mondiale avec Boeing et Airbus. Cependant, l'industrie aéronautique progresse plus fortement en Asie, notamment avec l'augmentation constante du trafic commercial asiatique, qui sera le principal moteur de l'industrie aéronautique dans les années à venir. Le salon du Bourget 2015 a ainsi vu une plus forte exposition des constructeurs, équipementiers et visiteurs venus de Chine, Inde, Corée du Sud et Asie du Sud-est. En particulier, la Chine poursuit ses efforts pour le développement et la certification d'avions de ligne régionaux et commerciaux, avec l'ambition de remettre en question le duopole Airbus-Boeing. Le constructeur aéronautique chinois COMAC achève actuellement l'assemblage du premier prototype de son monocouloir C919 dont l'entrée en service est prévue en 2018. Mais la concurrence se renforce également d'autres régions du monde, notamment au Canada avec Bombardier et au Brésil avec Embraer qui cherchent à monter en gamme avec des projets de monocouloirs.

Ferroviaire

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'industrie ferroviaire est dominante en Amérique, Europe et en Asie. Alors que les acteurs européens ont la main mise sur les infrastructures ferroviaires, ils arrivent en second rang derrière la Chine et le Canada dans les 6 premiers acteurs mondiaux s'agissant des matériels roulants.

Infrastructures ferroviaires

	Entreprise	CA 2012 (M€)	Pays
1	Voestalpine-Bahnsysteme	1 447	Autriche
2	Vossloh AG	1 243	Allemagne
3	Evraz Group	1 473 (consolidé)	Russie
4	Arcelor Mittal Steel	1 000	Europe/Inde
5	Steel Authority of India	912	Inde

Matériel roulant

Sur le matériel roulant, Alstom Transport se démarque comme le leader français du secteur. L'Allemagne et l'Espagne figurent également comme leaders mondiaux du matériel roulant.

	Entreprise	CA 2012 (M€)	Pays
1	CSR Corporation Ltd	10 700	Chine
2	Bombardier Transport	8 100	Canada
3	CNR Changchun Railway Vehicles	7 100	Chine
4	Siemens Mobility	5 970	Allemagne
5	GE Transportation	5 600	États-Unis
6	**Alstom Transport**	**5 200**	**France**
7	CAF	1 720	Espagne
8	Ansaldo Breda	591	Inde

24 – NGVA Europe et *Study Group 5.3* de l'International Gas Union

25 – MEDEF avec CCFA, UFIP, CFBP, UFE, AFGNV et AFG

Naval

La Chine est sans conteste le plus grand pays de construction navale au monde avec une part de marché de 41 %, suivi par la Corée et le Japon. L'Europe possède aujourd'hui un rôle mineur dans la construction navale avec seulement 2 % de part de marché au monde. Les fabricants européens se sont plus spécialisés dans l'ingénierie et la fabrication de navires de croisières, de yachts de luxe, de ferries, etc. Les fabricants asiatiques eux suivent la tendance de la fabrication de navires de transport de marchandises de très grosse taille, pouvant transporter entre 19 000 et 22 000 conteneurs standards.

L'Usine 4.0 (ou Industrie 4.0)

L'ensemble des secteurs industriels se positionne par rapport à l'évolution des méthodes de production. Les filières automobile et aéronautique sont à la pointe de la réflexion et de la mise en œuvre des nouveaux concepts, afin de répondre à des enjeux de montée en cadence, de personnalisation accrue et de compétitivité de l'industrie.

L'Usine 4.0 appuie la conception d'une production entièrement intégrée d'un point de vue numérique. Elle repose sur 5 grands piliers :

- La numérisation des toutes les opérations, dans un souci d'optimisation de l'action, de contrôle qualité au fil de l'eau, de traçabilité accrue et d'intégration poussée dans le système d'information de l'entreprise ;
- La modélisation et la simulation comme outils de conception, de validation numérique, voire de certification numérique avant déploiement réel ;
- La flexibilité : la reconfiguration ou le redéploiement des personnels et des outils en réponse à la variation des demandes ;
- La logistique pour sécuriser au meilleur coût les approvisionnements ;
- L'optimisation des consommations de ressources.

D'USAGE

La mobilité partagée

L'usage de la voiture **personnelle** diminue et laisse place de plus en plus à la mobilité partagée. L'usager est de plus en plus demandeur d'un service, et est moins enclin à posséder son propre véhicule personnel. L'autopartage, le covoiturage, la location entre particuliers ou encore les VTC sont des tendances d'usage de plus en plus répandues dans le paysage urbain, notamment en s'appuyant sur l'essor du numérique et l'intervention des pouvoirs publics.

Figure 9 : Évolution de la part modale de la voiture en France en 2001 et 2011[26]

L'autopartage est aujourd'hui un marché avéré de la mobilité partagée en France et dans le monde. Il permet aux usagers abonnés de louer de façon ponctuelle un véhicule en libre-service. L'exemple de la BlueCar de Bolloré dans Paris (Autolib) est une preuve significative de ce phénomène, objet de verrous majeurs sur le véhicule, le système d'information et l'organisation globale du système.

Les vélos en libre-service sont quant à eux totalement intégrés dans le paysage urbain et acceptés des usagers. Leur instauration il y a quelques années a entraîné une forte hausse des déplacements quotidiens à vélo, notamment dans les grandes villes, victimes de congestion du trafic.

Les VTC (Véhicule de Tourisme avec Chauffeur) ont connu un boom important ces dernières années, notamment avec Uber, mettant en question le monopole de taxis et posant de fait des questions réglementaires importantes.

La position de la France

INDUSTRIELLE

Automobile

L'industrie automobile française est aujourd'hui dominée par PSA Peugeot Citroën et Renault-Nissan avec des chiffres d'affaires respectifs en 2013 de 55 Md€ (36,5 Md€ pour la division automobile) et 96 Md€

26 – Source : SOeS, commissariat des comptes des transports (2012)

(41 Md€ pour Renault seul). Renault, avec des investissements à hauteur de 1,7 Md€ en 2013, figure à la 60ème place du classement des entreprises qui investissent le plus en R&D et PSA, qui est le plus grand déposant de brevets français, à la 54ème avec 2,4 Md€ investis en 2013. En 2014, PSA, qui emploie 10 600 ingénieurs et chercheurs et Renault, qui en emploie 9 600, se penchent sur les problématiques liées à l'architecture embarquée, les chaînes de traction et les matériaux.

Du côté des équipementiers, Faurecia se penche sur l'efficacité énergétique par l'allègement grâce à l'utilisation de matériaux composites et l'amélioration des performances environnementales. L'équipementier, réalise un CA en 2013 de 18 Md€ et a investi 917 millions d'euros dans la R&D, mobilisant 1 360 employés (Faurecia figure en 2013 parmi les 100 premiers innovateurs au niveau mondial).

Michelin, numéro 1 mondial du pneumatique avec un CA en 2013 de 20 Md€ se penche sur la R&D autour des pneumatiques à hauteur de 1,9 Md€. L'équipementier officialise en 2014 la création d'un laboratoire européen des usages routiers qui permettra de collecter des informations issues des usages de 2800 automobilistes. Il a également investi dans la PME Symbio FCell qui équipe les Kangoo ZE de Renault de prolongateur d'autonomie à hydrogène.

Valeo, avec un CA 2013 de 12,1 Md€, concentre ses recherches autour de 4 problématiques : le confort et l'aide à la conduite (18,4 % du CA), les systèmes de propulsion (27,8 % du CA), les systèmes thermiques (27,8 % du CA) et les systèmes de visibilité (26 % du CA) et a investi 650 millions d'euros dans la R&D avec 1100 ingénieurs et chercheurs. L'équipementier figure parmi les 100 innovateurs en 2013.

Enfin, Plastic Omnium consacre 5 % de son CA sur la R&D autour des problématiques liées à l'allègement des véhicules, de l'amélioration de l'aérodynamisme, du développement des systèmes de dépollution pour les moteurs diesel et le développement d'équipements pour VHR/VE.

En 2013, les équipementiers représentent un chiffre d'affaires de 41,3 Mds$, et un excédent commercial pour la France de 2 Mds$. Il est à noter que les équipementiers français ne dépendent plus, pour leur croissance, des marchés avec les constructeurs nationaux.

Aérien

La France est le seul pays européen présent sur l'ensemble de la chaîne de valeur aéronautique et maîtrisant l'ensemble des compétences nécessaires à la production d'un aéronef. L'industrie aéronautique française est présente sur tous les segments de marché (avions de transport, avions d'affaires, hélicoptères, moteurs, systèmes) et y occupe souvent une place de leader.

Le chiffre d'affaires de l'industrie aéronautique française en 2014 est en progression de 3 % et atteint 51 Md€[27] dont 33 Md€ à l'exportation (+6 %). Le secteur civil représente quant à lui 77 % du chiffre d'affaires de la filière et 84 % des prises de commandes totales reçues en 2014 dont le niveau égale celui de 2013 à 73 Md€. L'implication des PME et équipementiers français progresse également avec un chiffre d'affaires de 16,5 Md€ (+6 %) et 16,8 Md€ de commandes (+5 %). L'industrie aéronautique française emploie par ailleurs plus de 350 000 salariés sur l'ensemble de la filière, concentrés à 80 % dans cinq régions (Ile-de-France, Midi-Pyrénées, Aquitaine, PACA, Pays de la Loire), et possédant pour la plupart un haut niveau de qualification. Avec plus de 80 % de son chiffre d'affaires exporté et un excédent commercial de plus de 20 G€ en 2014, elle représente la première industrie exportatrice française.

La filière nationale est structurée autour d'un nombre restreint de grands constructeurs ensembliers (Airbus, Airbus Helicopters, Dassault Aviation), de motoristes (Snecma et Turbomeca du groupe Safran), d'équipementiers fournisseurs de sous-ensembles complets (Safran, Zodiac Aerospace, Thales…) et de grands sous-traitants de rang 1 (Stelia, Daher, Latécoère), qui font travailler un tissu de sous-traitants et prestataires estimé à plus de 3 000 entreprises, principalement des PME.

Airbus, avec 2 200 ingénieurs et chercheurs, concentre ses recherches sur les technologies optiques, avioniques, logicielles et les systèmes de vol. Dassault Aviation compte 1 100 ingénieurs et chercheurs sur la mécanique et les matériaux. Enfin Safran, qui figure dans le Top 100 des innovateurs mondiaux de Thomson Reuters de 2013 et 2014 est le deuxième déposant français de brevets au classement INPI 2013 et plus de

27 – Données GIFAS, 2014

20 % de son effectif travaille dans la R&D (1,8 Md€ investis en 2013). Ses recherches se concentrent sur les moteurs à architectures classiques et novatrices, l'utilisation des matériaux composites et le recours accru à l'énergie électrique.

Ferroviaire

En France, si les filières de l'infrastructure et de la signalisation présentent des résultats en hausse (respectivement +3 % et +6 %), en particulier pour les équipements (+31 % en 2014), le matériel roulant et l'industrie des équipementiers affichent des résultats à la baisse. S'il est à noter une légère baisse du CA entre 2013 et 2014 (4,01 Mds d'€, 2,84 Md€ sur le marché intérieur et 1,17 Md€ à l'export), il faut également prendre en compte que le marché intérieur du matériel roulant continue de baisser (-12 % en 2014 contre -16 % en 2013).

Le constructeur Alstom consacre 360 chercheurs dans la R&D autour des tramways et trains. Thales, qui figure dans le Top 100 des innovateurs mondiaux de Thomson Reuters de 2013, concentre ses recherches sur la sécurisation du réseau de transports urbains et la signalisation.

Naval

La filière navale française se situe au 6e rang mondial, 2e rang européen et représente 10 Md€ de CA. DCNS et STX France sont les acteurs majeurs de l'industrie navale en France, autour desquels gravitent des équipementiers et sous-traitants, ainsi que des bureaux d'étude et d'ingénierie dynamiques.

DCNS est leader européen du naval militaire. L'exemple de la création de sa nouvelle entité dans le nucléaire civil et les énergies marines est la preuve de sa capacité et de son besoin de se diversifier.

STX France, filiale à 66 % de STX Europe et à 34 % de l'État français, est un constructeur de navires à forte valeur ajoutée. L'entreprise, dont le chiffre d'affaires atteint 450 millions d'euros en 2013, intervient sur de nombreux secteurs de l'industrie maritime comme la construction de navires pour cargaison, voyageurs, l'ingénierie, la sécurité et l'environnement. Cet acteur se diversifie aujourd'hui également vers les grands éléments mécano-soudés pour les énergies marines renouvelables.

Mobilité

La France compte quelques-uns des acteurs majeurs au niveau mondial chez les opérateurs de mobilité.

Transdev est un opérateur de transport français, présent à l'international dans plus de 20 pays, qui affiche un chiffre d'affaires de 6,6 milliards d'euros en 2014. Transdev concentre son effort autour de la multimodalité des transports et leur accessibilité vers une mobilité durable : Bus à Haut Niveau de Service (BHNS), autopartage, Transport à la Demande (TAD), etc. Le groupe a récemment remporté un contrat d'exploitation de Mittlesaschen (Allemagne, 5,6 millions de trains kilomètres par an) pour une durée de 14,5 ans.

Keolis, filiale à 70 % de la SNCF, est un opérateur de transport présent dans 13 pays et affiche un chiffre d'affaire de 5,6 milliards d'euros en 2014 dont 47 % à l'international. Le groupe tient une expertise forte des transports multimodaux et des services voyageurs associés, notamment en étant le premier transporteur de personnes à mobilité réduite en France. Le groupe s'est notamment illustré en 2013 en remportant un contrat de gestion d'une partie des bus de Las Vegas aux États-Unis (200 bus, 30 millions de passagers par an).

Filiale de la RATP, RATP Dev assure l'exploitation et la maintenance des réseaux de transports multimodaux (métro, bus, tramway, rail et leurs services) urbains et périurbains en France et dans 14 pays au monde. Le groupe contribue fortement à la hausse du chiffre d'affaires global du groupe. RATP Dev remporte de nombreux contrats d'exploitation comme celui de la première ligne de tramway à Washington aux États-Unis ou l'exploitation du futur réseau de bus de Riyad en Arabie Saoudite.

Le groupe Air France-KLM est le premier réseau long-courrier d'Europe dont les activités couvrent le transport aérien de passagers, de fret et la maintenance aéronautique. Son chiffre d'affaire s'élève à 25,4 milliards d'euros. Le groupe travaille en collaboration avec des fournisseurs de technologies autour de nouvelles applications, produits et services, comme Thales avec qui le groupe a co-développé une application de vol *Electronic Flight Bag* pour l'assistance numérique dédiée aux pilotes.

ADP (détenu à 50 % par l'État) est le principal opérateur français de plateformes aéroportuaires dont les aéroports d'Orly et de Roissy Charles-de-Gaulle, et est le premier opérateur du secteur en Europe (5ème mondial). Ses activités sont les services aéroportuaires, commerces en zones de transit, l'immobilier, et

l'ingénierie aéroportuaire (conception et gestion d'aéroports, services de télécommunications aéroportuaires, etc.). Son chiffre d'affaires s'élève à 2,79 milliards d'euros en 2014.

ACADÉMIQUE

IFSTTAR (1 150 agents)

Acteur majeur de la recherche européenne, l'institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux axe ses recherches et son expertise sur les mobilités et infrastructures, les risques et environnement et les territoires, notamment autour de grands projets comme Sens-city, Railenium, VeDeCom ou la route de 5ème génération.

IFP Énergies Nouvelles (345 chercheurs)

L'IFPEN regroupe 345 chercheurs autour des innovations technologiques dans les domaines des systèmes de motorisation et de propulsion, des filières énergétiques et les procédés de thermique industrielle avec captage de CO_2.

ONERA (2 018 salariés dont 230 doctorants et post-doctorants)

L'ONERA est aujourd'hui le premier acteur français de la recherche aéronautique, spatiale et de défense avec 25 % de l'effort de recherche national autour de quatre branches scientifiques : mécanique des fluides et énergétique, matériaux et structures, traitement de l'information et systèmes et la physique.

CETIM (925 agents)

Le CETIM, à la croisée de la recherche et de l'industrie est le centre technique de la mécanique français, notamment au service des filières des transports sur des problématiques d'actualité comme l'utilisation des matériaux composites dans l'automobile ou l'aéronautique.

CEA LIST (710 collaborateurs, dont 508 permanents et 160 doctorants et post-doctorants)

Le CEA est un institut de recherche publique spécialisé dans la conception des systèmes numériques dans les domaines du manufacturing avancé, systèmes embarqués et de l'intelligence ambiante notamment au service des transports et de la mobilité. Les projets R&D sont principalement : le développement de calculateurs et d'architectures intrinsèquement sûrs pour les systèmes embarqués, la fiabilisation de la conception des applicatifs ou encore le développement d'interfaces homme-machine tactiles et haptiques à retour d'efforts et systèmes d'aide à la conduite.

CEA LITEN (1 015 collaborateurs dont 283 sur le transport électrique)

Le laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux est un des principaux centres européens de recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie. Les activités du LITEN sont centrées sur les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et les matériaux hautes performances pour l'énergie. Le LITEN travaille sur des projets liés aux technologies pour les transports et ses recherches portent sur : la production d'hydrogène, le stockage de l'hydrogène, les piles à combustibles PEMFC[28] et SOFC[29], l'économie de l'hydrogène, les batteries et la gestion de l'énergie.

Chaires industrielles

Les chaires industrielles matérialisent le lien étroit entre l'industrie et la recherche académique. Dernière en date à la rédaction de cet ouvrage, la chaire sur les systèmes d'éclairage embarqués pour l'automobile associe l'ESTACA, l'Institut d'Optique Graduate School, Strate-École de Design, PSA Peugeot Citroën, Valeo et Automotive Lighting Rear Lamps.

IRT Jules Verne

L'IRT cible ses recherches sur les technologies avancées de production composites, métalliques et structures hybrides et s'intéresse aux questions de conception, d'intégration, de procédés de fabrication de matériaux innovants, de structures complexes et d'usine du futur. Le cœur de la stratégie de l'IRT porte sur quatre filières : aéronautique, construction navale, énergie et transports terrestres.

IRT Railenium

L'institut de recherche Railenium vise trois grands marchés ferroviaires : les liaisons intercités et la grande vitesse, les liaisons de proximité et périurbaines, le transport ferroviaire de marchandise autour de trois enjeux : l'amélioration des performances du réseau ferroviaire, la maîtrise des coûts d'utilisation et de développement du réseau et l'impact écologique en

28 – Proton Exchange Membrane Fuel Cell

29 – Solid Oxide Fuel Cell

diminuant l'empreinte écologique et les consommations d'énergie.

IRT SystemX

L'IRT se concentre sur l'ingénierie numérique et les systèmes du futur notamment au cœur de la filière transport, autour de la thématique du transport multimodale et interopérable.

IRT Saint-Exupéry

L'IRT, associé au pôle de compétitivité AerospaceValley, concentre son action sur les technologies pour l'industrie aéronautique autour des systèmes embarqués, de l'avion plus électrique et des matériaux haute performance.

ITE VeDeCoM

VeDeCoM est un institut de recherche partenariale publique-privée et de formation dédié à la mobilité individuelle décarbonée et durable. Ses ambitions sont d'être une référence européenne dans le domaine des véhicules électrifiés, les véhicules autonomes et connectés, des infrastructures et services de mobilité et énergies partagées.

IRT M2P

L'IRT a pour mission de développer la recherche et les technologies autour des matériaux (aciers, métaux non ferreux, matériaux de construction, polymères, composites, …), la métallurgie et les procédés.

CISIT

Le Campus International pour la Sécurité et l'Intermodalité dans les Transports structure régionalement la recherche académique en Nord-Pas de Calais sur les transports terrestres et l'aéronautique autour de la multimodalité, l'interopérabilité, les véhicules propres et la mobilité intelligente.

Instituts Carnot

De nombreux instituts Carnot s'impliquent dans les transports, et méritent d'être cités. Parmi eux, et de manière redondante avec certains acteurs déjà cités : IFPEN TE, Ingénierie@Lyon, CEA LIST, ARTS, MINES, ESP, CETIM, Énergies du Futur, TSN, ONERA, INRIA…

D'autres organismes de recherche sont impliqués dans les travaux sur les transports :

- Mines ParisTech,
- Telecom ParisTech,
- LASMEA,
- LAAS,
- LAMIH,
- CORIA,
- Etc.

Ainsi que les centres de ressources technologiques : Centre d'Études et de Recherche en Aérothermie et Moteurs (CERTAM), CRITT M2A, Valutec…

PÔLES DE COMPÉTITIVITÉ

Sur le transport routier :

- Mov'eo,
- I-Trans,
- ID4Car,
- LUTB,
- Véhicule du Futur ;

Sur le Rail :

- I-trans ;

Sur l'aéronautique :

- Aerospace Valley,
- Astech,
- Pegase,

Sur le maritime

- Pôle Mer Bretagne Atlantique,
- Pôle Mer Méditerranée ;

Sur la logistique :

- Novalog ;

Transversaux :

- System@tic,
- EMC2,
- Materalia,
- Matikem,
- Viaméca,
- Cap Digital,
- Advancity,
- …

De nombreux pôles, non cités ici, interviennent sur le domaine de la mobilité…

Matrice AFOM

ATOUTS

Acteurs industriels d'envergure mondiale chez les donneurs d'ordre, les opérateurs et les équipementiers et sous-traitants

Forte présence de l'accompagnement à travers les pôles de compétitivité

Forte mobilisation de la recherche publique autour de la mobilité et développement des relations industrielles (IRT, ITE, Instituts Carnot)

Développement de la co-innovation

FAIBLESSES

Secteur de la logistique de transport peu consolidé et peu fédéré, et très lié à des considérations d'aménagement

Faiblesse du fret ferroviaire français

Prise en compte des start-ups par les grands groupes encore insuffisante (mais s'améliorant fortement)

OPPORTUNITÉS

Développement des nouvelles mobilités (nouveaux services, véhicules électriques, etc.)

Enjeux des transports et de la mobilité fortement identifiés dans les travaux de la NFI

Accroissement de la demande de mobilité dans le monde, particulièrement dans les zones de forte croissance (Asie notamment)

MENACES

Arrivée attendue de nouveaux entrants venant du monde du numérique sur des produits ou des modèles économiques en rupture

Faiblesse des investissements industriels en France (non spécifique à la mobilité), notamment dans les PME

GLOSSAIRE

BHNS : Bus à Haut Niveau de Service

BMS : Battery Management/ Monitoring System

CAFE : Clean Air For Europe

CGSP : Commissariat Général à la Stratégie et la Prospective

CRITT : Centres Régionaux d'Innovation et de Transfert de Technologie

ECTRI : European Conference of Transport Research Institutes

ERTMS : European Railway Traffic Management System

ETCS : European Train Control System

GES : Gaz à Effet de Serre

GSM-R : Global System for Mobile communication - Railway

JTI : Joint Technology Initiative

LOTI : Loi d'Orientation des Transports Intérieurs

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

MEIN : Ministère de l'Économie, de l'Industrie, et du Numérique

NFI : Nouvelle France Industrielle

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PECO : Pays de l'Europe Centrale et Orientale

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell

PDU : Plan de Déplacements Urbains

REACH : Registration, Evaluation, Authorization & Restriction of Chemicals

RTM : Règlement Technique Mondial

SACEM : Système d'aide à la conduite, à l'exploitation et à la maintenance

SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

SRA : Strategic Research Agenda

TCSP : Transport en Commun sur Site Propre

VE : Véhicule Électrique

VHR : Véhicule Hybride Rechargeable

VHU : Véhicule Hors d'Usage

VTC : Véhicule de Tourisme avec Chauffeur

BIBLIOGRAPHIE & SOURCES

ADEME. *Stratégie Transport & Mobilité 2014-2017*. (2013)

ADEME. *Les systèmes de mobilité pour les biens et les personnes*. (2011)

CAS. *Les nouvelles mobilités : adapter l'automobile aux modes de vie de demain*. (2010)

CAS. *Les nouvelles mobilités.* (2011)

ECTRI. *Transport challenge in Horizon 2020*. (2013)

MEDDE. *Compte des transports.* (2013)

PIPAME. *Enjeux et perspectives des métaux stratégiques pour les filières automobile et aéronautique.* (2013)

PIPAME. *Étude sur la location de biens et services innovants.* (2013)

SRA. *Strategic Rail Research and Innovation Agenda.* (2014)

SRA. *European Road Transport Research Advisory Council: H2020 Implementation plan*. (2014)

CleanSky. *Challenges under H2020*.

GIFAS. *Rapport annuel 2013/2014.* (2014)

MINEFI. *34 plans de reconquêtes pour une nouvelle France industrielle*. (2013)

CORICAN. *Recherche et innovation navale : Comité de pilotage « navires écologiques.* (2014)

Thomson Reuters. *Top 100 global innovators*. (2014)

© Fotolia

NUMÉRIQUE

Définition

Par domaine du numérique, on entend **l'ensemble des moyens techniques** (matériels, logiciels et services) permettant de collecter, générer, diffuser, partager, stocker, organiser, traiter et analyser des données de types et formats variés, unitairement ou en masse[1].

Le numérique recouvre ainsi l'ensemble des marchés basés sur les technologies (matérielles et logicielles) et services numériques, soit[2] :

- Les composants électroniques ;
- Les équipements de télécommunications : équipements de réseaux publics ou privés (équipements de cœur de réseaux : routage, transport, plateformes, etc. ou équipements d'accès fixe ou mobile) et les logiciels et services associés ;
- Les services de télécommunications : téléphonie fixe et mobile, transmission de données et d'images ;
- Les équipements informatiques : les PC et périphériques, les *smartphones*, tablettes, serveurs, *datacenters*, etc. ;
- Les services informatiques et les logiciels ;
- L'électronique grand public et les objets connectés ;
- Les services et applications d'Internet : les réseaux sociaux, l'e-commerce, les applications mobiles et internet, le *Cloud Computing,* le *Big Data.*[3]

Par définition, ces technologies sont transverses et ont des impacts sur l'ensemble des secteurs de l'économie (santé, énergie, environnement, éducation..). Nous ne chercherons pas ici à couvrir l'intégralité d'un sujet aussi vaste, mais plutôt à mettre en exergue ses grands enjeux et les tendances sous-jacentes.

1 – Cette définition a été proposée lors de l'atelier de travail du 31 mars 2015, avec les experts du groupe « Télécommunication » mobilisés dans le cadre de cette étude.

2 – IDATE, *DigiWorld Yearbook*, 2014

3 – Les contenus audiovisuels sont exclus du contour de cette étude.

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / Transversale
1	Matériaux avancés et actifs	Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique	Transversale
5	Internet des Objets	Transversale
6	Infrastructures de 5ème génération	Transversale
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs	Transversale
10	Cobotique et humain augmenté	Transversale
11	Intelligence Artificielle	Transversale
12	Robotique autonome	Transversale
13	Communications sécurisées	Transversale
14	Technologies immersives	Transversale
19	Analyse comportementale	Transversale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel	Transversale
21	Supercalculateurs	Transversale
46	Nanoélectronique	Spécifique

Les grands enjeux et les stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

Le domaine du numérique fait face à de nombreuses évolutions impactant tous les segments de marché qui le constituent, et plus largement, tous les secteurs de l'économie.

L'Internet des objets (IoT)

Montres connectées, lampes connectées, serrures connectées, chaussures connectées, les objets connectés se multiplient et envahissent tous les aspects de notre quotidien. En 2020, **80 milliards d'objets**[4] seront connectés dans le monde contre 15 milliards en 2014[5]. Considéré comme la **troisième révolution de l'Internet**, faisant suite à l'ère du web social, l'Internet des objets crée des passerelles entre le monde de l'Internet et le monde réel, en connectant les objets et les informations qui les concernent. Ainsi, notre manière même d'interagir avec notre environnement, urbain ou domestique, pourrait s'en trouver modifiée, de même que beaucoup de nos processus de décisions. Le **potentiel disruptif de l'IoT** pourrait donc s'avérer au moins aussi important que celui de l'internet classique né en 1989. Ce potentiel disruptif recouvre la transformation du paysage industriel mondial, les opportunités de croissance pour les segments de marché du domaine du numérique, et les impacts potentiels sur tous les secteurs de l'économie :

- L'essor de l'internet des objets **transformera considérablement et en très peu de temps le paysage industriel mondial et affectera l'ensemble de la chaîne de valeur et des facteurs de production** : travail, capital, énergie et information. L'impact économique se fera ressentir en priorité sur la manière dont les produits sont fabriqués. En conciliant les phases initiales de la conception technique, les processus de production en usine et l'organisation

4 – IDATE, *The Internet of Things Market*, 2013

5 – Le marché des Objets connectés est étudiée de manière plus approfondie dans la fiche Technologie Clé « Objets connectés ».

du service après-vente, les fabricants pourront réduire les erreurs, gagner en flexibilité dans leur manière de gérer les modifications techniques tardives, réduire les processus en cours et, enfin, accélérer l'introduction de nouveaux produits supposément rentables. Par ailleurs, les produits intelligents et connectés récupèrent des données en temps réel qui permettent d'optimiser leur gestion et leur maintenance.

■ L'IoT constitue également un **fort potentiel pour le B2B** puisque la majorité des objets connectés sont situées au sein des usines et des entreprises. Les applications dans ces structures peuvent aller de l'analyse de la chaîne de production (ex. : maintenance prédictive) à la machinerie robotique. Il est donc essentiel pour les acteurs du B2B de pouvoir accéder à des données concernant les habitudes de consommation de leurs clients, les besoins de maintenance en temps réel, etc. Cela permettrait d'adapter les solutions et de gagner en efficacité.

■ L'IoT offre des **opportunités de croissance pour de nombreux segments de marché du numérique**. La hausse du nombre d'objets connectés tirera la demande pour les composants électroniques, les sociétés de services informatiques seront mises à contribution d'une part pour concevoir les applications de pilotage de ces *devices* sur tablette ou sur *smartphone* et d'autre part pour intégrer les SI avec les outils de traitement *Big Data* des grands acteurs du *Cloud* public ; en générant d'importants volumes de données, l'IoT contribuera également à la croissance du marché du *Big Data* et du C*loud*.

■ Enfin, il génère des **innovations et de nouveaux usages dans tous les secteurs de l'économie** : domotique, e-santé, smart city, mobilité, sécurité, etc.[6]

De nombreuses opportunités seront à saisir pour les PME et entreprises françaises, comme en témoignent les initiatives qui se mettent en place au niveau européen. *L'Alliance for Internet of Things Innovation* (AIOTI) lance ainsi un appel à expression d'intérêt qui vise directement les PME et *start-ups*. De nombreux appels à projets ont également été lancés par le programme Horizon 2020.

6 – Les nouveaux usages seront abordés de manière plus détaillée dans la partie 4.3.2.

Le *Big Data* ou valorisation et intelligence des données massives

Le *Big Data* constitue sans nul doute le **deuxième enjeu majeur à horizon 2020**. Objets connectés, emails et réseaux sociaux vont générer un flot croissant de données non structurées et hétérogènes d'une valeur très forte pour les entreprises. Ces données personnelles comme des entreprises sont aujourd'hui une **ressource pour la société numérique que l'on peut comparer aux matières premières pour l'industrie traditionnelle**. Détenir ces données et être capable de les analyser sera demain un **critère de puissance mondiale** et **un enjeu essentiel de la souveraineté numérique**. Capturer les données est donc stratégique pour la société, pour l'économie mais aussi pour la sécurité des entreprises et des organisations et les libertés individuelles[7].

Si la plupart des acteurs économiques ont un intérêt à valoriser les données personnelles grâce aux technologies du *Big Data*, seule une poignée d'entre eux contrôle néanmoins l'essentiel des données échangées et stockées en ligne, à l'image des grandes plateformes du GAFA (Google, Apple, Facebook et Amazon). Alors que les États-Unis dominent plus des deux tiers des plus grandes sociétés de la toile, l'Asie et tout particulièrement la Chine est très active, et l'Europe demeure en retrait[8].

L'exploitation des données des entreprises est un autre enjeu particulièrement important, puisque **le *Big Data* devrait révolutionner le monde de l'entreprise**. Demain, les technologies d'analyse et de prédictions appliquées aux données massives permettront, et ce sont des exemples parmi d'autres, de créer de nouveaux produits plus efficients, de mieux anticiper les évolutions de marchés, de réduire les erreurs d'approvisionnement, de réaliser des simulations numériques pour la conception, etc.

Ce positionnement européen par rapport à la compétition internationale doit être amélioré au regard des enjeux particulièrement stratégiques du *Big Data*. En effet **la maîtrise des données est clé pour la souveraineté numérique européenne**, d'autant plus

7 – INRIA, *Plan stratégique horizon 2020*, 2012

8 – « L'empire numérique américain, on le perçoit mieux avec des chiffres », Slate.fr, 26/10/2014

que le Big Data soulève des inquiétudes liées à la protection des données personnelles, organisationnelles, et professionnelles, au respect des personnes et à leur vie privée. C'est aussi dans ce but que la Commission européenne cherche à mettre en place un marché unique numérique, qui figure parmi ses dix axes de travail prioritaires[9]. Il doit permettre de supprimer les obstacles et menaces afin d'exploiter pleinement les opportunités offertes par les technologies numériques, identifiées comme des moteurs de la croissance de l'industrie et de l'emploi en Europe.

Le Cloud

Directement lié au *Big Data*, le *Cloud computing* ou nuage informatique est un **service qui permet la fourniture de données à caractère évolutif et qui sont le plus souvent accessibles à la demande sur internet**. Trois grandes catégories des données du *Cloud computing* peuvent être établies : les données de type IaaS (Infrastructure as a Service), PaaS (Platform as a Service) et SaaS (Software as a Service).

Le *Cloud computing* est un enjeu technologique majeur puisqu'il permet de répondre aux besoins des entreprises: rentabilité, flexibilité, simplicité et possibilité pour les utilisateurs finaux de convertir une partie de leurs dépenses d'investissements en dépenses d'exploitation. En permettant aux entreprises d'améliorer leurs performances, le *cloud* représente non seulement un enjeu stratégique mais également un enjeu de compétitivité économique.

Le *Cloud computing* est pourtant encore en phase d'apprentissage et la généralisation de son utilisation par les entreprises françaises est susceptible d'être freinée à l'horizon 2020 par plusieurs facteurs[10], au sommet desquels se trouve **la sécurité des données**[11]. Les acteurs du marché doivent apporter des réponses concernant la localisation des données, la sécurité et plus globalement remplir un rôle d'accompagnement, notamment sur les parties de leur système d'information à transférer dans le *Cloud*.

L'accès au très haut débit

Le développement de l'accès au très haut débit est une tendance forte qui accompagnera l'explosion de l'Internet des objets et du *Big Data*. En France, le nombre d'abonnés au très haut débit croît de façon soutenue depuis 2010. Cette croissance est fortement liée au **Plan France Très Haut débit**, lancé au printemps 2013, visant à généraliser le déploiement du très haut débit sur l'intégralité du territoire d'ici

Source : ARCEP

9 – *Stratégie pour un marché unique numérique en Europe*, Communication de la Commission Européenne, Mai 2015.

10 – Par ordre décroissant d'importance pour les entreprises, ces facteurs sont : la sécurité, le fait que le *cloud* ne soit pas adapté aux métiers, les gains non démontrés, la transition problématique, la performance, l'opacité contrats & coûts.

11 – Données du *PAC CloudIndex*, juin 2014

2022 grâce à la mobilisation d'un investissement de **20 milliards d'euros** en dix ans, partagé entre l'Etat, les collectivités territoriales et les opérateurs privés.

L'accès au très haut débit fixe (fibre optique) et mobile (4G) aujourd'hui, et à l'ultra haut débit mobile demain (5G) est **indispensable pour faire face à l'augmentation considérable des besoins en débit** et à l'apparition d'usages et besoins innovants que la 4G a du mal à intégrer.

L'arrivée de l'ultra haut débit par une infrastructure de cinquième génération doit en outre permettre de **répondre aux besoins de nouveaux usages clients** tels que l'Internet des Objets et le *Machine to Machine* (M2M).

Pour les entreprises, l'accès au très haut débit constitue également un enjeu fort : la fluidité et la rapidité des transferts améliorera la productivité, facilitera le travail des salariés à domicile et accélèrera le recours au *Cloud computing*, ensemble de services devenus incontournables aujourd'hui pour les PME[12].

La transformation numérique des entreprises

La transformation numérique des entreprises constitue **un enjeu économique comme sociétal particulièrement important pour la France à l'horizon 2020.** Cette transformation est **multidimensionnelle** et comprend tant la dématérialisation des processus internes/externes, la remise en question des organisations, des métiers et des habitudes de travail et le développement de produits de plus en plus intelligents et connectés. Tous les secteurs de l'entreprise seront impactés, des outils de production au marketing.

Les étapes les plus basiques de la transformation numérique sont déjà très largement intégrées par les entreprises françaises : 99 % d'entre elles disposent d'un accès internet, 65 % ont un site web et elles mobilisent massivement les emails pour leurs communications internes et externes[13]. La dématérialisation des documents et des processus est un autre usage répandu. Ce procédé, qui permet d'optimiser l'organisation de l'entreprise, devrait être complétement généralisé à l'ensemble des secteurs de l'économie à l'horizon 2020.

Ce sont des usages beaucoup plus avancés qui transformeront en profondeur les habitudes de travail et le fonctionnement de l'entreprise. La **digitalisation de la gestion des processus**, à travers des outils de gestion intégrée (ERP), requiert en effet une intégration totale au sein de l'entreprise. Il en va de même pour la **digitalisation de la production** (outils de type CAO, DAO, PAO et commande numérique) qui transforme les usages de la production industrielle par l'optimisation de l'utilisation des matériaux et le pilotage à distance des machines-outils. **Le développement de ces outils digitaux, aujourd'hui peu intégrés dans les entreprises françaises** (33 % utilisent des ERP), **constitue une opportunité clé à l'horizon 2020**.

Autre aspect de la transformation numérique des entreprises, le **marketing digital qui modifie en profondeur les interactions de l'entreprise.** Des outils digitaux comme les réseaux sociaux, *l'e-mailing*, le trafic de sites web et les *newsletters* sont ainsi déjà largement mobilisés pour les relations de type B2C et B2B. Le e-commerce est également en plein essor même si en France un décalage est observé entre l'usage fait par les consommateurs et l'offre des entreprises[14]. Les outils digitaux de la gestion de la relation client (GRC / CRM) permettent de traiter directement avec le client en lui offrant un service personnalisé. Leur utilisation par les entreprises françaises est relativement faible (27 % en 2013). **À l'horizon 2020, ce sont les évolutions de la *data* sociale et les comportements mobiles qui devraient constituer les plus fortes opportunités de développement**. La *data* sociale ouvre en effet des possibilités d'analyse des interactions C2C via les réseaux sociaux afin de mieux cibler les offres publicitaires.

L'intégration des technologies numériques au sein même des produits des entreprises est une autre dimension importante de la transformation numérique. Les technologies d'analyse et de prédictions appliquées aux données massives permettront par exemple de créer de nouveaux produits, toujours plus intelligents et connectés.

12 – Les enjeux des infrastructures de 5ème génération sont étudiés de manière plus approfondie dans la fiche Technologie Clé « Infrastructures de 5ème génération »

13 – *Du rattrapage à la transformation, L'aventure numérique, une chance pour la France*, Étude de Roland Berger Strategy Consultants en collaboration avec Capdigital, Septembre 2014.

14 – En 2013, 11 % des entreprises françaises vendent en ligne alors que 59 % des particuliers achètent en ligne. Commission européenne, *Digital Agenda Scoreboard 2014* - France

Les pratiques dans l'entreprise devraient en outre connaître une profonde transformation dans les années à venir, que certains analystes qualifient de « quatrième révolution industrielle »[15]. Le développement « d'industries intelligentes » est ainsi porté par des applications qui semblent illimitées. Parmi ce grand nombre d'applications possibles, les technologies de la modélisation numérique permettront par exemple de mieux anticiper les évolutions de marchés et de réaliser des simulations pour la conception de nouveaux produits. La mise en place de capteurs dans les usines renforcera également les possibilités du *data analytics* et la compréhension des besoins en temps réel. Ces besoins comprennent tant la production (anticipation des erreurs dans les chaînes d'approvisionnement, maintenance préventive, etc.) que la consommation (transformation profonde du marketing en permettant aux magasins d'ajuster leur prix, stocks, et produits en fonction de la demande).

La transformation numérique des entreprises est donc un enjeu essentiel, en partie amorcé mais qui reste à concrétiser, offrant des opportunités pour les entreprises positionnées sur le secteur. **Les grands groupes sont ceux qui intègrent le plus facilement la digitalisation et en 2020 l'enjeu de la transformation numérique portera principalement au niveau national sur les PME et les ETI**. Celles-ci peuvent s'appuyer sur les entreprises de services du numérique (ESN) et les fournisseurs de solutions techniques à l'instar des fournisseurs de capteurs.

Enfin, il est intéressant de noter que des **entreprises deviennent elle-même acteurs de la transformation en se transformant,** à l'image de La Poste qui a développé des outils numériques en interne mais également des outils au service des entreprises et des e-commerçants.

L'intelligence Artificielle (IA)

L'intelligence artificielle a pour objectif la construction d'entités douées d'intelligence. Le développement de nouvelles technologies a permis de renouveler les recherches et le développement de l'IA, grâce notamment à l'amélioration des outils de calcul puissants (supercalculateurs) et à l'accès aux données massives du *Big Data*.

Les systèmes d'IA deviennent en effet capables d'analyser ces données et d'en tirer des conclusions, ce qui annonce le **déploiement de l'analyse prédictive, utile à la prise de décision dans de nombreux domaines**. **Cet aspect constitue un enjeu majeur à l'horizon 2020**.

Si les applications principales de l'IA sont en effet aujourd'hui en santé, dans la traduction automatique, la reconnaissance faciale, les jeux vidéo ou l'automobile, le développement de ces technologies intelligentes ouvre des perspectives dans **l'anticipation de phénomènes stratégiques en politique, en économie comme en sécurité**. La prédiction et la gestion de situations de crise (climatiques, technologiques, etc.) pourra également être améliorée grâce au système d'IA.

L'engouement actuel de nombreux acteurs à l'échelle internationale pour ces technologies témoigne de son intérêt pour demain. La NSA, l'Union Européenne (*Humain Brain Project*), ou des entreprises comme Facebook ou Microsoft sont ainsi impliquées dans des programmes de développement technologiques appliqués à l'Intelligence Artificielle.

RÉGLEMENTATION

Le domaine du numérique est par ailleurs confronté à des défis réglementaires de taille concernant la protection de la vie privée et des données personnelles, la sécurité des données, l'accès et la propriété des données ainsi que la réglementation en faveur de l'offre légale sur Internet et la lutte contre le piratage.

Dans un contexte d'extension des connexions, des réseaux sociaux et de l'usage commercial des données, **la protection de la vie privée et des données personnelles** devient un enjeu réglementaire majeur. En France, le traitement de données à caractère personnel est régi par les dispositions de la loi « Informatique et Libertés » du 6 janvier 1978. Cette loi définit une donnée personnelle comme « toute donnée permettant d'identifier directement ou indirectement une personne physique » et énonce les principes relatifs à la protection des données personnelles. Le principe de « finalité » exige notamment que tout traitement automatisé de données personnelles réponde à des finalités bien identifiées et préalablement explicitées auprès des personnes concernées. Un tel principe s'avère particulièrement difficile du fait de la sérendipité dans la finalité de traitement des données massives. L'Union européenne travaille depuis 2012 sur un

15 – FIRIP, *Quelle France numérique pour 2020 ?*, avril 2014

projet de règlement européen unifiant le droit de tous les États en la matière. L'objectif principal de ce règlement est de fournir aux entreprises un cadre européen harmonisé, en renforçant les règles de protection sur les données personnelles tout en offrant aux responsables de traitement des outils plus souples de mise en conformité[16]. La stratégie numérique du gouvernement adoptée en juin 2015 comporte un volet important dédié au renforcement de la confiance et de la protection des citoyens dans leur vie numérique. Le projet de loi numérique que prépare le gouvernement vise également à inscrire de nouvelles règles de protection des données : portabilité, protection des données des mineurs, renforcement des pouvoirs de contrôle de la CNIL, etc.

En lien avec le développement du « *Cloud* » et des accès à distance, **l'accès et la propriété des données** sont aujourd'hui règlementés de manières fortement différentes selon les pays.

L'harmonisation des législations nationales pour **développer l'offre légale de contenus culturels sur Internet et lutter contre le piratage** est un autre enjeu réglementaire fort. Les chartes entre les marques et les sites de vente en ligne pour lutter contre la vente sur Internet de produits contrefaisants est un exemple d'élément sur lequel les législations doivent s'accorder afin de mieux protéger la propriété intellectuelle.

Suite à la décision récente de la *Federal Communications Commission* (FCC) américaine, visant à garantir l'égalité de traitement de tous les flux de données sur Internet, **la neutralité des réseaux** devient un autre enjeu règlementaire d'importance du domaine du numérique. Ce principe exclut toute discrimination à l'égard de la source, de la destination ou du contenu de l'information transmise sur le réseau sans toutefois interdire les mesures indispensables à la gestion du trafic acheminé sur les réseaux numériques.

Le changement des normes de l'audiovisuel (formats, interfaces…) a un effet structurant sur le marché, en donnant un avantage concurrentiel aux acteurs qui sont déjà en conformité avec ces normes.

Par ailleurs, les **préoccupations éthiques** sur la coévolution entre l'homme et les « machines » (robotique, objets connectés, implants…), ainsi que sur l'essor de l'intelligence artificielle, pourraient susciter la mise en place d'un cadre réglementaire spécifique.

MARCHÉ

Production et stockage des données

Les marchés de l'Internet des Objets (i), du *Big Data* (ii) et *du Cloud* (iii) vont connaître une **croissance particulièrement importante à l'horizon 2020**. Celle-ci entraînera une augmentation des capacités des serveurs et *datacenters* (iv) pour le stockage des données.

L'Internet des objets

Le marché naissant des objets connectés a de **très belles perspectives de croissance à l'horizon 2020.** L'offre de nouveaux produits connectés touchera en effet tous les secteurs du quotidien (la maison, l'équipement de la personne, la santé, la voiture, la sécurité, etc.) et le nombre d'objets connectés 2020 devrait atteindre **80 milliards**[17] pour un marché estimé à **1700 milliards de dollars** (**1525 milliards d'euros**[18]**) à horizon 2020** hors *smartphone*s, tablettes et ordinateurs.

Un grand nombre d'acteurs ont un rôle à jouer dans le développement de ces nouveaux objets, des fabricants de semi-conducteurs et de cartes à puce aux fournisseurs de capteurs en passant par les équipementiers de réseaux voire les opérateurs télécoms. L'entreprise française Sigfox a ainsi développé un réseau bas débit sur toute la France, suffisant pour transmettre les données des objets connectés à un coût beaucoup moins élevé.

Pour plus de détails, se référer à la fiche dédiée à l'internet des objets.

Sous la pression de l'essor de l'Internet des objets et des nouveaux arrivants sur le marché, **les marchés traditionnels devront également se réinventer** puisque, équipés de puces ou de capteurs, tous les objets sont susceptibles d'être connectés et de produire des données valorisables. Des constructeurs automobiles travaillent ainsi par exemple au développement de voitures communicantes, au même titre que des constructeurs électroménagers qui en font des objets connectés.

16 – Commissariat général à la stratégie et la prospective, Marie-Pierre Hamel et David Marguerit, *Analyse des Big Data Quels usages, quels défis ?* », novembre 2013

17 – IDATE, *The Internet of Things Market*, 2013

18 – International Data Corp, *Worldwide and Regional Internet of Things (IoT) 2014–2020 Forecast: A Virtuous Circle of Proven Value and Demand,* mai 2014

Big Data

Le *Big Data*, enjeu majeur du numérique en 2020 connaitra une **envolée de croissance les prochaines années.** Le chiffre d'affaires du marché du *Big Data* (hors services) devrait croître de **40 % par an** pour atteindre **44,4 milliards d'euros en 2018**[19]. L'IDC estime le marché du *Big Data* en France à seulement 387 millions d'euros en 2013 mais prévoit un taux de croissance de **40 % par an** (logiciel et services)[20]. Le plan dédié de la Nouvelle France Industrielle estime pour sa part que le marché en France devrait atteindre **9 milliards d'euros en 2020**[21]. Le développement du *Big Data* impactera tous les secteurs (producteurs de données) de l'économie. De nombreux projets se développent dans des secteurs tels que la santé, la mobilité, la ville, l'aéronautique etc. Ce marché, à fort potentiel, doit néanmoins lever le verrou de la sécurité et de l'intégration à grande échelle par les entreprises pour se déployer pleinement.

Le marché mondial du *Big Data* est **largement dominé par les Américains**, leaders sur toute la chaîne de valeur : en amont, avec la création de l'infrastructure Hadoop et MapReduce par Google, IBM, Cloudera et Oracle sur la création de plateformes Hadoop, en aval sur les technologies d'Analytics avec HP par exemple. La France dispose d'acteurs forts sur ce marché – Atos, Orange, Criteo par exemple – mais accuse encore un retard qu'il convient de rattraper pour acquérir une position de leadership au niveau mondial.

Cloud

Le *cloud computing* constitue une technologie dont le développement aura des impacts sur les marchés des TIC, à l'instar du marché des équipements et services informatiques et des logiciels. **Les prévisions de marché à horizon 2020 sont très encourageantes.** Le marché mondial du *Cloud computing* devrait passer de 40,7 milliards de dollars en 2011 à 241 milliards de dollars en 2020[22].

En France, la part des dépenses *Cloud* dans les dépenses informatiques globales devrait passer de 4 % en 2010 à 20 % à horizon 2020[23].

Fortement concurrencés par les leaders américains du *cloud* public (Amazon, Microsoft, IBM Software Group Google et SalesForce), les acteurs français doivent proposer des services aux PME répondant à leurs attentes en termes de sécurité. La société française OVH, leader européen du *cloud* développe ainsi en complément de ses offres des solutions réseaux et sécurité. Des initiatives publiques doivent également permettre de généraliser l'utilisation du cloud par les entreprises en renforçant la sécurité, comme le label « *Secured Cloud* » du plan « *Cloud Computing* » de la Nouvelle France industrielle. Il doit permettre d'auditer et certifier la sécurité des prestataires de Cloud.

Serveurs et *datacenters*

Le marché des serveurs est en croissance modérée et régulière depuis 2011. Néanmoins, si plus de serveurs sont livrés par les constructeurs, **les revenus, eux, ont enregistré une croissance relativement faible** sur l'année 2014**. Le premier trimestre de l'année 2015 est pourtant encourageant** avec un chiffre d'affaires des ventes de serveur en hausse de 17,9 % par rapport au dernier trimestre de 2014, hausse dominée par la demande de produits *hyperscale*[24]. La tendance concerne également les serveurs *blade*, très utilisés pour la virtualisation et le *cloud*, dont la croissance s'est chiffrée à 7 % de 2013 à 2014. Les principaux acteurs de ce marché sont HP, totalisant une part de marché de 42,2 % au deuxième trimestre 2014, suivi par IBM, Dell, Oracle et Fujitsu[25].

Le **marché mondial des centres de données devrait connaître une forte croissance à l'horizon 2020,** estimée à 10,66 %[26] sur la période 2014-2019. Les principaux segments qui le constituent devraient également connaître des croissances importantes :

- la croissance du segment des services de *datacenters* est estimée à 15,80 %[27] entre 2014 et 2019, le mar-

19 – Estimations du cabinet Transparency Market Research, janvier 2014

20 – «Le marché du *Big Data*, nouveau graal de l'informatique», LeFigaro.fr, Tech & Web, 02/04/2014

21 – Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du numérique, *Les 34 plans de la nouvelle France industrielle*, Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du numérique, 2013

22 – Forrester, *Sizing the Cloud*, avril 2011

23 – Cabinet Pierre Audoin Consultants(PAC), *Cloud France 2011 : le marché des services informatiques dans le nuage*, 2011

24 – Données de *Gartner. Inc*

25 – Données de *l'IDC.*

26 – Global Data Center Market 2015-2019, Technavio, Septembre 2015.

27 – Global Service Market for Data Center Market 2014-2019, PR Newswire,

ché passant de près de 27 milliards d'euros à 56 milliards d'euros. Ce segment est dominé par des grands groupes américains (Emerson Network Power, Cisco, IBM Corp, HP) ainsi que par le groupe français Schneider Electric.

- le segment des équipements de *datacenters* devrait quant à lui enregistrer une croissance de 10,93 %[28]. sur la même période
- la croissance du segment de la sécurité des centres de données est estimée à 12 % [29]entre 2015 et 2019.

Le marché américain devrait continuer de dominer le marché mondial au cours des prochaines années, suivi du marché européen et d'Asie-Pacifique[30].

Selon le cabinet d'étude Gartner, le **marché des centres de données** (*datacenters*) pourrait par ailleurs connaitre des bouleversements significatifs dans les prochaines années. On distingue 4 principaux facteurs:

- des modifications concurrentielles liées à **l'essor de technologies** qui constituent de véritables ruptures, tels que le Software Defined, les processeurs basse-consommation et les infrastructures convergées évolutives.
- **la domination des grands fournisseurs de Cloud,** comme Amazon, Google, IBM et Microsoft. Cette forte présence peut conduire à terme à un effacement progressif des MSP (fournisseurs de services managés) traditionnels. Ce retrait aura une incidence sur le prix des infrastructures pour les *datacenters*.
- **La concurrence internationale** : Gartner prévoit que la Chine va augmenter fortement sa présence sur le marché des infrastructures des *datacenters*, avec une part de marché qui devrait progresser de 2 points à la fin 2017.
- **Les enjeux de souveraineté nationale**, qui pousseraient les clients à changer de fournisseurs pour privilégier des productions et des capacités de stockage locales et contrôlables.

Février 2015

28 – Global Data Center Construction Market 2015-2019, Market Watch, Avril 2015

29 – Data Center Security: Global Market Research Report 2015-2019, Technavio, Septembre 2015

30 – Global Data Center Market Overview and Forecasts, 2014-2020, DCD Intelligence, Avril 2015

Traitement et utilisation des données

Le traitement et l'utilisation des données impliquent une diversité d'acteurs et de technologies, depuis les composants électroniques et les équipements informatiques, jusqu'au logiciel et aux services informatiques.

Composants électroniques

La micro et la nanoélectronique **constituent un marché majeur et très attractif qui concerne tous les secteurs de l'économie**.

Evalué à **347 milliards d'euros en 2015** par l'organisation en charge des statistiques mondiales sur le marché des semi-conducteurs, le marché des composants électroniques devrait continuer de croître à **3 %** par an en moyenne pour atteindre **500 milliards d'euros en 2025**[31]**.** Largement portée par la demande soutenue de semi-conducteurs pour les smartphones et pour l'automobile en 2015, l'explosion prévue de l'Internet des objets (IoT) offre des perspectives de croissance plus qu'optimistes pour les acteurs du marché à horizon 2020 et au-delà. Ainsi, le marché des semi-conducteurs pour l'IoT devrait-il représenter près de **45 milliards de dollars en 2020**, contre seulement 10 milliards en 2014[32].

L'Europe et la France ont cependant **encore du retard à rattraper** sur le marché de la production de composants électroniques, largement dominé par les trois géants américains et asiatiques Intel, TSMC et Samsung. STMicroelectronics, Infineon et NXP représentent des acteurs européens importants mais détiennent des parts de marché bien inférieures à leurs concurrents : 2 % pour STMicroelectronics contre 10 % pour Samsung et 15 % pour Intel[33].

Le franco-américain Alcatel-Lucent se place en quatrième avec 7 % de part de marché devant le géant chinois ZTE, qui détient 4 % du marché mondial.

Supercalculateurs

Le stockage et l'exploitation de données toujours plus massives nécessitent des machines capables de réaliser des calculs dans des temps record, **les supercalculateurs ou superordinateurs**. **Ces machines devraient connaître des ruptures majeures dans les années à**

31 – Données de l'*IRT NanoElec.*

32 – Estimation de la société d'études Gartner, 2015

33 – *Ibis*

venir avec la construction de systèmes dotés d'un très grand nombre de processeurs. Un supercalculateur de 150 pétaflops est annoncé pour 2016 et les constructeurs travaillent pour 2020 à atteindre l'exaflop. Porté par ces avancées technologiques, l**e marché mondial du calcul intensif ou *High Performance Computing* (HPC) devrait ainsi connaître une croissance moyenne annuelle importante** de 8,3 % à l'horizon 2020 et atteindre 39 milliards d'euros[34]. La croissance est également stimulée par la diversification de la demande. Initialement utilisées en recherche, les technologies du calcul intensif ou *High Performance Computing* **continueront en effet de se répandre dans les secteurs des services et de l'industrie**, en priorité dans des grands groupes comme Airbus, Total ou la Société Générale qui les utilisent pour des modélisations et des simulations. Les supercalculateurs sont en outre de plus en plus utilisés par les gouvernements qui voient des opportunités en matière de défense. Les financements publics doivent permettre de **démocratiser l'accès à ces super machines pour les PME dans les prochaines années**. La Commission européenne a en ce sens prévu de doubler les investissements consacrés au HPC d'ici à 2020. Ce marché est enfin dominé par les constructeurs américains avec en tête de file IBM, HP et Dell. La France est pourtant en bonne position avec l'entreprise Bull qui figure parmi *les leaders* mondiaux du marché et qui est l'unique constructeur européen.

Équipements informatiques

Le marché des équipements informatiques comprend à la fois les PC, tablettes, et *smartphones* et d'autre part, les serveurs de stockage. Face au succès des tablettes et des *smartphones*, les ventes de PC diminuent et sont en décroissance de -0,2 %, avec 308,1 millions d'unités vendues en 2014.[35]. **Le marché du PC doit se repositionner face au besoin accru de mobilité des utilisateurs**. Intel a par exemple créé le concept d'ultraportable, le *netbook*. De même, Microsoft a développé un PC mettant l'accent sur une interface utilisateur adaptée au contrôle tactile, démontrant une volonté de s'adapter à cette nouvelle tendance. **Sans un repositionnement, le marché du PC risque de disparaître au profit des tablettes et des *smartphones*.**

Services informatiques et logiciels

Si le *cloud* est un puissant *driver* de l'industrie des serveurs, il représente également une vraie rupture pour l'industrie du logiciel. Le *cloud* entraînera en effet une **refonte complète des chaînes de valeur** et **imposera de nouveaux partenariats ou compétitions entre des acteurs** venant d'horizon très divers[36].

Certains domaines très prometteurs comme le *Big Data* ou l'Internet des objets (IoT) contribuent également fortement à la création de nouveaux éditeurs et à leur développement. Avec le *cloud*, ces éditeurs pourront répondre très rapidement et sans investissement initial lourd à la croissance rapide de la demande. **La valeur ajoutée des produits industriels ou grand public devrait ainsi reposer de plus en plus sur le logiciel**. Les industriels devront donc investir fortement et chercher à conforter leurs parts de marchés à travers la propriété intellectuelle « matérialisée » dans du logiciel.

Le **domaine de la *cyber*-sécurité est également très prometteur** puisqu'il doit permettre de lever de nombreux verrous, technologiques comme économiques. Le manque de sécurité des données est en effet une problématique récurrente des technologies du numérique. Le marché mondial des logiciels de *cyber*-sécurité devrait ainsi connaître une forte croissance à l'horizon 2020. Estimé à 96 milliards d'euros en 2015, il atteindra 153 milliards d'euros en 2020 sur la base d'une croissance annuelle moyenne de 9,8 %[37]. (*La fiche « Communications sécurisées » détaille cet aspect)*.

Les leaders historiques du logiciel (Microsoft, Oracle, IBM Software,…) sont par ailleurs **de plus en plus concurrencés par les géants de l'Internet que sont Google, Amazon et Facebook** qui bénéficient à la fois de la puissance financière et de capacités d'hébergement gigantesques. Face à ces derniers, ils multiplient les acquisitions de start-up, dont la plupart dans le *Cloud*/et le Saas. Cette course à la capture des start-up innovantes rend plus difficile des percées indépendantes comme *Salesforce.com*, seul acteur du Saas ayant réussi à dépasser le milliard de dollars.

34 – *Worldwide High Performance Computing (HPC) Market Forecast 2015-2020*, Market Research Media, Février 2014.

35 – Données de *Gartner.*

36 – Institut G9+, *Livre Blanc, 2020 : où vont les industries françaises du numérique ?*, 2014

37 – Markets & Markets, Cyber security market by solution – Global forecast to 2020, juin 2015.

C'est ainsi que les éditeurs leaders ont pu préserver leur propre modèle basé sur la vente de licence et évoluer à leur rythme vers le SaaS. Les éditeurs français comme leurs concurrents doivent **relever le défi du SaaS et en tirer le meilleur parti dans le cadre de la recomposition du secteur que cela entraînera**. Conscients de cette opportunité, une dizaine de start-up « pur SaaS « et/ou « pur Open Source », réalisant plusieurs dizaines de millions d'euros, ont émergé en France et pourraient devenir de nouveaux Business Objects ou Dassault Systems.

Le développement du SaaS et du *Cloud* induit par ailleurs des **opportunités pour les acteurs proposant des services de conseil et d'accompagnement. Sur ce segment les acteurs français sont bien positionnés avec la présence de leaders mondiaux comme par exemple Atos, Capgemini et Sopra-Steria.** Ainsi, la mise en place de modèles de type *cloud* génère des projets de transformation au sein des entreprises clientes que les ESN peuvent accompagner : appui à la diffusion du *Big Data* dans les différentes unités support, accompagnement vers le passage à la mobilité dans l'entreprise (intégration des terminaux, harmonisation et synchronisation des applications, etc.), conseil en *cyber*-sécurité à l'heure où cet enjeu devient majeur dans les entreprises, mise en place de solutions CRM personnalisées sont autant de chantier en cours et à venir pour les entreprises du secteurs.

Applications mobiles et internet

Avec l'augmentation du nombre de *smartphones* et de tablettes, le développement de l'Internet des objets et le très haut (4G) et ultra haut (5G) débit mobile, **les applications mobiles continueront de croître de façon exponentielle**. Elles représentent aujourd'hui **88 % de l'activité sur les *smartphones*** et 82 % sur les tablettes[38]. Dans les cinq grands pays d'Europe de l'Ouest (Allemagne, France, Royaume-Uni, Italie et Espagne), 102 milliards d'applications ont été téléchargées en 2013, dont 9,2 milliards sont payantes[39]. Ce chiffre devrait bondir à **269 milliards en 2017, pour 15 milliards payantes**. De nouveaux usages apparaissent sans cesse : payer ses impôts sur son mobile, effectuer ses transactions bancaires ou encore surveiller ses constantes de santé.

Source: FEVAD, Mc Kinsey & Company

Deux acteurs américains – Apple et Google dominent ce marché. Microsoft et Facebook proposent également des plateformes de développement, respectivement Windows Phone et Facebook Messenger. Les entreprises françaises, **absentes sur le marché des plateformes de développement**, pourraient tirer profit du dynamisme des téléchargements pour se tourner de plus en plus vers l'Internet mobile tant les possibilités d'applications sont vastes, et les opportunités de croissance nombreuses.

e-Commerce

Autre marché du numérique, le e-commerce (ou vente en ligne) est un secteur attractif et extrêmement dynamique. Il devrait connaître une **croissance forte d'ici à 2020, pour atteindre 90 milliards d'euros en France[40]. Les principaux moteurs de cette croissance seront la multiplication des points d'accès à Internet** (*smartphones*, tablettes, PC, etc.), **l'augmentation du nombre d'internautes,** et le **développement de l'offre en ligne**[41]. Cette croissance sera néanmoins différente en fonction des catégories de produits. Si les pionniers du secteur tels que le multimédia, l'électroménager ou les biens culturels devraient peu à peu être moins porteurs, l'optique et la santé (grâce à l'évolution des législations), tout comme la bijouterie-horlogerie, le bricolage-jardinage, les articles de sport, d'habillement et d'alimentation connaîtront une forte croissance. Le marché de

38 – Comscore, *The US Mobile App Report,* 2014

39 – Boston Consulting Group, *The Mobile Internet Economy in Europe*, 2014

40 – Xerfi-Precepta, Delphine David, *L'e-commerce en France à l'horizon 2020*, 2014

41 – *Ibid.*

l'équipement de la personne et de la maison devrait lui maintenir son dynamisme**. Ce marché, loin d'arriver à un stade de maturité, devrait connaître des transformations à horizon 2020**. Quatre grandes tendances laissent imaginer ce à quoi ressemblera le futur marché de l'e-commerce[42] :

- **La migration vers les mobiles**. Les dépenses sur mobile devraient atteindre 7 milliards d'euros en France en 2015 contre 3,7 milliards en 2014[43]. Cette migration s'accentuera d'ici 2020.

- **L'essor du multicanal et du *web-to-store* :** les vendeurs physiques développeront de plus en plus de sites de vente en ligne. Du côté des consommateurs, une tendance démontre qu'ils utilisent les sites de vente en ligne, moteurs de recherche et comparateurs de prix pour visualiser les produits avant d'aller les acheter sur internet. 33 % des Français achètent par ailleurs leurs produits en ligne pour les retirer ensuite directement dans les points de vente. Le *web-to-store* reflète le besoin, pour les marques, de créer une synergie entre leur site Internet et leurs différents points de vente dans une logique multicanale.

- **Les technologies du *Big Data*** constituent un véritable gisement d'opportunités pour les marques et les enseignes françaises. Alors qu'aujourd'hui 97 % des visiteurs d'un site de e-commerce le quittent sans avoir acheté, la collecte et le traitement des données massives peuvent en effet permettre aux entreprises de mieux connaître le parcours d'achat de leurs clients et, grâce aux techniques d'analyse prédictive, de développer des offres ciblées et personnalisées. Les acteurs industriels français – start-up et PME – doivent ainsi se positionner sur les technologies du *Big Data* pour accompagner l'essor de l'e-commerce : web-sémantique, analyse prédictive, à l'instar d'Amazon, leader incontesté du web sémantique.

- Enfin, **les réseaux sociaux** impacteront de plus en plus le processus d'achat. Ils peuvent, en effet, être un portail d'accès ou un lien direct avec les marques et les enseignes. Pour ces derniers, l'optimisation de leur présence sur les réseaux sociaux devient donc impérative.

42 – McKinsey & Company-FEVAD, *Réinventer le parcours client multicanal pour booster la rentabilité,* juin 2013

43 – Centre for Retail Research, *RetailMeNot,* janvier 2015

Réseaux sociaux

Phénomène mondial, les réseaux sociaux[44] sont devenus un **moyen de communication incontournable entre les individus mais également pour les entreprises et des administrations**. Réseaux sociaux généralistes, professionnels, « de partage », de « rencontres » sont autant de réseaux pour autant d'usages : partager des informations (musique, photos, vidéos etc.), se créer un réseau professionnel, discuter sur des sujets précis etc.

Les chiffres clés des réseaux sociaux témoignent de l'ampleur de ce phénomène. Sur les 3,025 milliards d'internautes à travers le monde, **2,060 milliards sont actifs sur les réseaux sociaux**, soit **68 % des internautes et 28 % de la population mondiale.**[45] L'écosystème des réseaux sociaux, aujourd'hui très vaste, est dominé par **Facebook** avec 1,35 milliards d'utilisateurs actifs mensuels en 2015 dont 28 millions en France, **Twitter**, avec 284 millions d'utilisateurs actifs mensuels dont 2,3 millions en France, et 320 000 nouveaux comptes chaque minute, et enfin Google+. D'autres réseaux, tels que Linkedin ou Viadéo en France, Youtube, Instagram, Snapshat rassemblent des millions voire des milliards d'utilisateurs. **Les réseaux sociaux devraient continuer à montrer en puissance à horizon 2020 pour atteindre 2,8 milliards d'utilisateurs**[46]**.**

Si les réseaux sociaux permettent de partager, d'échanger ou de créer un réseau professionnel, ils constituent aussi un moyen de communication et de promotion au service des entreprises. En majorité gratuite pour les particuliers, l'utilisation des réseaux sociaux à des fins publicitaires est payante pour les entreprises permettant ainsi de générer d'importants revenus. A noter que le chiffre d'affaires en 2014 de Facebook s'élevait à 8,615 milliards de dollars contre 7,872 milliards en 2013.

Selon une étude de l'INSEE, en 2013, en France, 20 % des sociétés d'au moins 10 personnes disposent d'un profil, d'un compte ou d'une licence d'utilisateur pour

44 – Un réseau social est un outil numérique dont l'usage est de mettre en relation des personnes via internet afin de faciliter la communication entre elle, et dont l'aboutissement est la constitution d'une communauté que l'on rejoint ou que l'on constitue autour de soi via sa marque ou sa profession.

45 – Agence *We are Social, Digital, Social & Mobile in 2015,* 2014

46 – UDECAM, *Quel sera le paysage média en 2020 ?,* 2012

accéder à un ou plusieurs médias sociaux[47]. **Avec la croissance continue du nombre d'utilisateurs, les réseaux sociaux continueront de représenter en 2020 un enjeu pour les PME**. Ces dernières doivent renforcer leur présence sur ce canal de communication pour se développer.

En permettant de collecter des données sur les préférences des clients, **les réseaux sociaux participent également au phénomène du *Big Data*.** En effet, une fois les données collectées, les technologies du *Big Data* les analysent pour mieux comprendre les besoins des clients ou encore réaliser du reciblage publicitaire (Critéo). Prenant conscience de la valeur de marché des données, de grands groupes prennent des participations dans les réseaux sociaux. C'est le cas du japonais Rakuten qui a pris des participations dans Pinterest par exemple.

Communication et transfert des données

Face à la croissance rapide voire exponentielle de certains marchés du numérique à l'horizon 2020, **l'ensemble de la chaine de valeur des TIC est forcée d'innover et de s'adapter** : i) investissements des opérateurs télécoms dans des infrastructures de 5ème génération, ii) développement des services télécoms.

Les équipements de télécommunications

Le marché des équipements et logiciels réseaux croit à un rythme de **3 % de 2012 à 2013** à 183 milliards de dollars, notamment grâce à la bonne tenue de l'Asie-Pacifique (+6 %) et de l'Amérique du Nord (+4,5 %)[48]. **La croissance devrait se maintenir les prochaines années** avec un chiffre d'affaires cumulé de 1000 milliards de dollars d'ici 2018 grâce au déploiement généralisé des infrastructures de 4ème génération et de la fibre. **Les investissements massifs en R&D dans les infrastructures de 5ème génération devraient également soutenir une forte demande en équipements et dynamiser la croissance à horizon 2020.**

Le marché se caractérise par ailleurs par une **concentration forte** entre cinq principaux acteurs, représentant 50 % du marché mondial : Cisco, Huawei, Ericsson, Alcatel-Lucent et ZTE. Sur le segment de l'accès mobile, les cinq premiers équipementiers en 2014 sont, dans l'ordre, Ericsson, Huawei, Nokia, Alcatel-Lucent et ZTE qui totalisent près de 90 % du marché.

Les services télécoms

Les services télécoms concernent tous les services qui consistent, en tout ou en partie en la transmission et l'acheminement de signaux sur le réseau public de télécommunications[49]. Il s'agit notamment des services de téléphonie fixe et mobile, services internet, de messagerie instantanée, de transmission de contenu multimédia (MMS) et de courrier électronique[50].

Depuis 2009, le marché mondial des services télécoms a retrouvé le chemin de la croissance. Selon l'IDATE, les revenus mondiaux des services télécoms devraient passer de 1 186 milliards d'euros en 2013 à 1 341 milliards d'euros en 2018, soit une progression annuelle moyenne de 2,5 %. Néanmoins, une analyse plus fine du marché met à jour des **disparités importantes au niveau régional.** Entre 2010 et 2016, les pays émergents continuent de tirer la croissance mondiale, tandis que l'Amérique du Nord connait une croissance plus faible et l'Europe un recul important. Des disparités apparaissent également entre services de téléphonie fixe et mobile/internet. En effet, si la téléphonie fixe

47 – INSEE, *L'usage d'Internet par les sociétés en 2013 : un recours minoritaire aux médias sociaux,* 2013

48 – Données Infonetics Research, 2015

49 – Article 1 de la directive 2004/18/CE du Parlement européen et du Conseil, du 31 mars 2004, relative à la coordination des procédures de passation des marchés publics de travaux, de fournitures et de services)

50 – Liste non exhaustive. Voir *op. cit* pour avoir accès à une liste plus détaillée des services télécoms

semble être en déclin durable, les services de téléphonie mobiles et les services internet connaissent quant à eux une croissance modérée :

- **Les revenus des services mobiles progresseront de 17 % entre 2013 et 2018** (+3 % par an en moyenne), pour atteindre 826 milliards d'euros en 2018 ;
- **Les revenus associés à la transmission de données et à Internet progresseront plus fortement (+24 % entre 2013 et 2018**, soit +4 % par an en moyenne), pour atteindre 338 milliards d'euros en 2018 ;
- **Le chiffre d'affaires de la téléphonie fixe continuera de décliner sensiblement** (-15 % entre 2013 et 2018, soit un recul de 3 % par an en moyenne), pour s'établir à 177 milliards d'euros en 2018.

Le **déclin de la téléphonie fixe** s'explique par des effets de substitution de la téléphonie fixe à la téléphonie mobile, mais également de transfert vers l'internet et ses applications de *VoIP*[51] (Skype, Facebook Call) et de messagerie instantanée (Facebook, Google Hangout etc.). Le déploiement des services fixes de haut et très haut débit continuent par ailleurs à progresser et à tirer la croissance dans les pays avancés.

En France, les revenus des services fixes et mobiles sont en déclin mais parviendraient à se stabiliser grâce à une accélération du déploiement de la fibre et du très haut débit[52]. Cette baisse des revenus est notamment due à une pression continue sur les prix exacerbée par l'arrivée des services « over-the-top » (OTT) et leurs poids grandissant dans les flux de télécommunications[53] ainsi que par la concurrence des GAFAM (Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft). Ces derniers se déploient et gagnent du terrain dans le domaine des services en offrant applications internet, appareils et plateformes de services permettant aux consommateurs de combiner leurs activités en ligne et de gérer de manière uniforme mails, téléphone, contacts etc.[54]

Pour faire face à cette pression grandissante, les industriels français doivent mettre en place des stratégies:

- **Investir dans des infrastructures réseaux à forte valeur ajoutée** : aujourd'hui, la fibre pour stabiliser voire augmenter le prix de ses services, et demain les infrastructures de 5ème génération (ultra très haut débit) ;
- **Développer leurs propres services OTT** afin de récupérer une partie de la valeur ajoutée captée par leur concurrent OTT (exemple de l'application LiBon d'Orange) ;
- **Créer des partenariats avec des acteurs OTT.**

Les grandes tendances

TECHNOLOGIQUES

L'Internet des objets

Le monde de demain connectera l'homme à la machine, grâce à des **capteurs de plus en plus nombreux**. Le **développement de la nanoélectronique** *More than Moore* permettra de créer des systèmes de plus en plus petits, rapides, performants et consommant moins d'énergie. Cette technologie, considérée par le programme européen Horizon 2020[55] comme une **technologie générique au sein de la catégorie plus vaste des nanotechnologies,** modifiera profondément le numérique d'ici 2020.

51 – *Voice over Internet Protocol*

52 – ARCEP, *Observatoire des marchés des communications électroniques en France*, 2014

53 – EY, *Industrie des télécommunications: tendances et défis,* mai 2014

54 – Roland Berger, *Telco 2020 : Un nouveau modèle industriel pour les opérateurs télécoms dans l'économie du numérique,* 2012

55 – Commission Européenne, *High Level Expert Group, on Key Enabling Technologies*, juin 2011

Demain, ce sont des capteurs connectés **invisibles** qui feront partie de notre quotidien. L'Université de Californie à San Diego (UCSD) développe par exemple des timbres épidermiques dotés de capteurs mesurant le niveau de glucose sans prélèvement sanguin[56]. La communication entre objets (***Machine to Machine***) sera facilitée par le développement de réseaux bas débit, à bas coût et faible consommation d'énergie. Les start-up françaises Cycleo et SigFox proposent des technologies abouties reconnues au niveau mondial, respectivement les **technologies *Long Range* et *Ultra Narrow Band***. SigFox en particulier propose une technologie de réseau très bas débit qui lui permet de se positionner sur le secteur très convoité des objets connectés. En déployant un réseau mondial de télécommunications à faible coût et consommant peu d'énergie, l'entreprise a ainsi réalisé d'impressionnantes levées de fonds auprès d'acteurs importants (Samsung, le Fonds Ambition Numérique, géré par Bpifrance pour le compte de l'État dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir, etc.).

Enfin, la **question de l'interopérabilité** des objets se pose. Les objets connectés sur le marché aujourd'hui (bracelets connectés par exemple) ont un usage unique et ne sont souvent pas en mesure de communiquer avec d'autres objets connectés[57]. Des initiatives Open source sont lancées afin de proposer aux développeurs des *frameworks* techniques robustes et ouverts permettant d'accueillir différents protocoles de communication et d'aboutir à un langage universel. Ainsi, **lever le verrou de l'interopérabilité représente le défi essentiel pour l'Internet des objets d'ici 2020**. La Nouvelle France Industrielle répond à ce fort enjeu technologique en dédiant une des neuf solutions industrielles aux objets intelligents.

Pour plus de détails sur ces éléments, consulter la fiche Internet des Objets.

La valorisation des données massives

La quantité de plus en plus importante de données générées nécessite d'utiliser des technologies pour gérer le stockage, l'identification, l'analyse et la modélisation, simulation et visualisation de ces données.

- Les technologies **d'analyse sémantique** permettront de distinguer les données brutes extraites du monde numérique et les connaissances qui en sont issues. **L'analyse prédictive**, appliquée au *Big Data*, permettra d'anticiper des tendances et des évènements. Elle ouvre ainsi un champ d'opportunités immense dans le domaine de la santé (médecine prédictive) et du marketing (marketing prédictif).

- L'exploitation du *Big Data* nécessitera des **capacités de calcul de plus en plus importantes[58]. L'utilisation du calcul intensif** par les entreprises se généralisera, favorisée par de faibles coûts d'accès à la puissance de calcul grâce au modèle locatif du *cloud.* Plus généralement, le *cloud* favorisera l'intégration de stratégies *Big Data* dans les entreprises – grands groupes, PME et TPE - grâce aux faibles coûts de stockage et de serveurs. Ainsi, le développement de la modélisation et de la simulation numériques, essentielle pour gérer les données en masse, est-il conditionné aux performances de ces technologies matérielles et logicielles.

Selon le plan stratégique de l'INRIA à horizon 2020, le stockage, l'échange, l'analyse et la manipulation de ces données soulèvent d'autres **défis technologiques majeurs** auxquels la recherche doit répondre, à savoir :

- **L'identification des données pertinentes** dans les espaces de stockage. Repérer les données pertinentes requiert souvent de faire un compromis entre vitesse de traitement et pertinence des données.

- **L'intégrité des données**. Des réflexions sont en cours sur les critères de mesure de la qualité des données afin de limiter le risque de calcul à partir de données erronées.

- **L'analyse des données**. Les algorithmes d'analyse sémantique et prédictive ont d'importantes marges d'amélioration d'ici 2020.

- **La sécurisation du *cloud*** est indispensable pour rassurer les entreprises quant à l'utilisation du *Big Data*. Le recours au *cloud* public offre de nombreux avantages mais est freiné par les risques liés à la protection des données personnelles. **La *cyber*-sécurité, corolaire du *Big Data*, se développera rapidement d'ici 2020** pour sécuriser le *cloud*. Aux États-Unis, les dépenses en *cyber*-sécurité atteindront 63,5 milliards en

56 – Institut G9+, *Breakthrough: Electronic circuits that are integrated with your skin*, 2011

57 – « Sécurité et interopérabilité les enjeux de demain pour les objets connectés », Journaldunet.fr, 13/04/2015

58 – CNRS, *Livre blanc du calcul intensif*, 2012

2017. Des acteurs de la recherche français, tel que le CEA List, sont déjà bien avancés dans ce domaine (ex. : technologie inédite de cryptocalcul homomorphe).

Conscient de ces forts enjeux technologiques, l'État français a dédié une des neuf solutions industrielles du programme intitulé La Nouvelle France Industrielle à l'économie des données.

L'accès au très haut débit et à l'ultra haut débit

Avec l'Internet des objets et le *Big Data*, les flux de données augmentent, ce qui soulève plusieurs **défis technologiques importants liés aux infrastructures réseaux.** Ils concernent :

- **L'augmentation des débits** : Les futurs réseaux devront soutenir en 2020 des volumes de trafic mobile mille fois plus élevés qu'actuellement, alors que le spectre des fréquences utilisables aujourd'hui est limité[59]. Pour **éviter le « *capacity crunch* »[60],** de nouvelles infrastructures réseaux verront le jour. La création d'infrastructures de 5ème génération, encore au stade de recherche et développement permettra de fournir un débit plus fiable et fluide[61].

- **La création d'infrastructures flexibles et adaptables :** les infrastructures de 5ème génération doivent en effet pouvoir intégrer de futures innovations des usages et services, dans des délais toujours plus restreints.

- **La réduction des coûts liés à l'exploitation des réseaux** est un autre défi, dans le but de favoriser le développement de l'Internet des objets notamment.

- **La réduction de la consommation énergétique** est enfin essentielle afin de réduire l'impact environnemental de l'économie numérique, qui est croissant avec son développement. Les réseaux de communication qui consomment le plus de bande passante seront ainsi les premiers visés par la 5G.

(*La fiche « Infrastructures de 5ème génération » détaille plus précisément ces aspects*).

Ces infrastructures s'appuieront en outre demain sur les **satellites à orbite basse, les ballons** et les **drones** pour fournir un accès à internet à toutes les régions du monde et ce à faible coût. En France, Thales Alenia Space a investi dans la R&D pour la construction de satellites à orbite basse fournissant des services internet haut débit et permettant une couverture maximale à faible coût. Le plan de lancement de la constellation de satellites est prévu pour 2019-2020.[62] Parallèlement, Google, à travers l'acquisition du fabriquant de drone Titan Aerospace, s'est donné l'objectif de fournir l'accès à Internet *via* des drones aux pays les moins connectés mais également aux États-Unis.

L'Intelligence Artificielle (IA)

Les technologies mobilisées par l'Intelligence artificielle sont plurielles et complexes, du fait notamment qu'elles cherchent de plus en plus à **intégrer des paramètres issus d'autres disciplines** telles que la psychologie, les neurosciences, les sciences cognitives, la linguistique et l'économie.

La nécessité de **concevoir des systèmes auto-adaptatifs capables de faire face à toutes les situations** est un défi technologique majeur pour le développement de l'IA. Cette faculté d'apprentissage automatique (***Deep Intelligence learning***) peut être rendue possible grâce à un ensemble de données représentatif des situations possibles et des données captées en temps réel lors du fonctionnement.

Les systèmes intelligents de demain se doivent en effet d'être non seulement capables de raisonner dans le temps et dans l'espace mais également de pouvoir **intégrer des aspects plus complexes de raisonnement tels que les grandeurs scalaires et symboliques.**

INDUSTRIELLES

L'essor des technologies du numérique entraîne en premier lieu un **bouleversement important de la chaîne de valeurs.** Les acteurs traditionnels des télécommunications, comme par exemple les opérateurs télécoms, voient leur environnement radicalement modifié par l'arrivée de nouveaux acteurs qui se positionnent sur le marché des infrastructures réseaux. La chaîne de valeur évolue ainsi vers un écosystème de plus en plus large et ouvert au sein duquel les rôles

59 – « Interview de François RANCY réélu au poste de Directeur du Bureau des radiocommunications de l'UIT », Agence Nationale des fréquences, 24/04/2014

60 – Situation où les infrastructures ne parviendront plus à véhiculer des données de plus en plus importantes. Pour certains scientifiques britanniques, ce manque de capacité signera la mort d'Internet. Ils estiment qu'il surviendra dès 2023. The Royal Society, London, "Meeting : Communication networks beyond the capacity crunch", mai 2015

61 – Voir fiche « Infrastructures de 5ème génération ».

62 – « Bourget : déluge de satellites pour le web », Libération.fr, 15/06/2015

entre les opérateurs de télécoms, les fournisseurs de contenu, les fabricants de terminaux, et les fournisseurs de services OTT tendent à être partagés.[63]

Les acteurs traditionnels des télécommunications font également face à une **concurrence de plus en plus forte de la part des géants de l'Internet, les GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft)**. En effet, la valeur créée est de plus en plus captée par les constructeurs de terminaux et les acteurs Internet, au détriment des opérateurs télécoms[64]. À titre d'exemple, Facebook et Apple proposent un service *over-the-top* (Facebook Call et Facetime) et Google souhaite lancer en 2015 une offre de service OTT qui viendra concurrencer celles des opérateurs de téléphonie.

Les GAFAM se positionnent également sur le marché de la fourniture réseau, traditionnellement occupé par les équipementiers réseaux. C'est le cas de Google qui a investi dans des drones et des satellites pour fournir un accès au très haut débit à bas coût dans les pays les moins avancés mais également aux États-Unis. Sur le marché des équipements informatiques, les infrastructures et services *cloud* proposés par Microsoft, Amazon et bien d'autres acteurs de l'Internet viennent aujourd'hui concurrencer et transformer l'industrie du serveur et du logiciel.

Le paysage du numérique évolue et les acteurs traditionnels des télécommunications doivent composer avec les acteurs de l'Internet en adaptant leur offre (baisse des prix, diversification des services etc.) afin de rester compétitif.

D'USAGE

Avec le développement des technologies du numérique, de nombreuses applications ont été développées, créant de nouveaux usages et impactant toutes les dimensions de notre quotidien. De manière non exhaustive, nous pouvons citer les principales tendances :

■ **(Se) mesurer (*quantified-self*)** : balances connectées, bracelets et tensiomètres automatisés sont autant de coaches numériques qui font partie d'une mouvance nommée « *quantified-self* ». L'auto-mesure de la distance parcourue, des aliments ingurgités, du rythme cardiaque est devenu un usage courant des objets connectés, en vogue.

Source : Arthur D. Little, *Economie des Télécoms*, 2014

■ **Se soigner :** la **e-santé** est également une application des objets connectés dont les enjeux industriels sont immenses. Elle **transformera radicalement les pratiques médicales** : la multiplication des capteurs permettra aux patients d'obtenir des informations en temps réel sur leur état de santé. Ces données, couplées à des technologies d'analyse prédictive, pourront demain réduire les risques de crise cardiaque, hypoglycémie, crise d'épilepsie et plus encore[65]. Plus particulièrement, avec une durée de vie en progression continue, le maintien à domicile des personnes âgées constitue le pilier des applications des objets connectés dans le cadre de l'e-santé. Limitation des coûts, sécurité du senior vivant seul à son domicile, et prolongation de sa durée d'autonomie font partie des enjeux majeurs du XXIème siècle. La France soutient le développement d'une filière **Silver Economie** visant à fédérer les industriels autour de solutions technologiques nouvelles pour anticiper la transition démographique[66] et soutenir l'autonomie des personnes âgés de demain.

➢ *Pour plus de détails sur la e-santé, se référer aux paragraphes dédiés de la monographie « Santé et bien-être ».*

■ **Vivre à son domicile (contrôle à distance, loisirs, adaptation, etc.)** : la **domotique** intègre de plus en plus d'objets connectés pour transformer le domicile en maison intelligente. En 2015, 30 % des Français

63 – Données d'*Orange*.

64 – Arthur D. Little, *Économie des Télécoms,* novembre 2014

65 – CNIL, *Le corps, nouvel objet connecté du quantified-self à la m-santé : les nouveaux territoires de la mise en données du monde*, Cahiers IP - Innovation & Prospective, Mai 2014

66 – En France, les personnes âgées de 60 ans ou plus sont aujourd'hui 15 millions. En 2030, elles seront 20 millions. Site du Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et des droits des femmes, Dossier Silver Economie

déclarent posséder un objet connecté dans leur maison (TV connectée, électroménager, alarme etc.)[67].

■ **Se déplacer** : les technologies du numérique génèrent de nouveaux usages en termes de mobilité, par exemple avec le développement de la voiture connectée.

■ **Consommer autrement : la consommation collaborative**. Le développement des technologies de la communication et de l'information ainsi que du e-commerce ont fortement contribué et contribueront de manière encore plus importante à l'horizon 2020 à faire évoluer la relation consommateurs-entreprises. La consommation collaborative, qui rassemble les pratiques visant à échanger et à partager des biens entre particuliers ainsi qu'à limiter les intermédiaires entre producteur et consommateur [1], se développe ainsi principalement grâce à des services en ligne, tels que *Bla bla Car*, de *Particulier à Particulier*, etc.

■ **Vivre et « piloter » la ville (*smart city*),** et notamment, à travers l'intégration de technologies numériques dans toutes les fonctions urbaines : régulation dynamiques des réseaux entre eux (transport, énergie, eau), boutiques virtuelles, éclairage intelligents, trottoirs connectés etc.

■ **S'éduquer et se former :** Avec l'accès au très haut débit fixe et mobile, les usages concernant les loisirs, jusqu'alors limités par les capacités du réseau, pourront se généraliser[68]: regarder des événements sportifs, accéder à des films et séries à la demande, sur plusieurs écrans à domicile. Se cultiver : Bien d'autres usages sont appelés à se développer avec la fibre, comme l'éducation en ligne (les MOOC) qui permet des formations ouvertes à distance.

La position de la France

INDUSTRIELLE

Offre technologique

La France dispose **d'acteurs de rang mondial** sur l'offre technologique. À titre d'exemples, sur le segment des composants électroniques, STMicroElectronics se situe au 9ème rang mondial (2014), Alcatel-Lucent est le 4ème acteur mondial du segment des équipements de télécommunications, Orange fait partie des cinq premiers leaders mondiaux de la téléphonie fixe et mobile

Les positions de leadership sont cependant majoritairement occupées par les acteurs américains et asiatiques tels que par exemple Samsung et Intel sur le marché des composants électroniques, Cisco et Ericsson sur le marché des équipements.

Dans le cadre de la **Nouvelle France Industrielle,** le gouvernement a en outre mis en œuvre différents programmes pour soutenir le développement industriel, à travers notamment les solutions Économie des données, Confiance Numérique et Objets intelligents. La matrice Industrie du futur est un autre exemple de politique menée envers l'industrie.

Solutions de digitalisation de l'industrie.

Les entreprises de services du numérique sont également très bien positionnées à l'échelle mondiale avec Capgemini qui se situe au 13ème rang mondial dans les services numériques[69], Criteo qui est leader du reciblage publicitaire dans le *Big Data*, OVH qui est le *leader* européen du Cloud et se positionne au troisième rang mondial et Dassault Système qui est enfin le leader mondial de la 3D et qui figure parmi les dix premiers éditeurs mondiaux de logiciels.

Comme pour le secteur de l'offre technologique, la France dispose de grands groupes classés dans les premiers au niveau mondial pour les solutions de digitalisation de l'industrie mais **les positions de leadership restent majoritairement occupées par les acteurs américains et asiatiques** tels que par exemple Amazon sur le marché du cloud, Facebook sur le marché des réseaux sociaux, Microsoft et IBM sur le marché du logiciel.

Les entreprises françaises du numérique ont généré environ 110 milliards d'euros en 2014, soit une valeur supérieure à l'agriculture ou les services financiers par exemple. Le numérique représentent plus de **5,5 % du PIB français**, une performance dans la moyenne européenne et égale à celle de l'Allemagne[70]. Malgré la place importante accordée au numérique dans le PIB de la France et la présence d'un écosystème d'indus-

67 – Hakisa.com, *De la domotique à la maison intelligente* (infographie)

68 – FIRIP, *Quelle France numérique pour 2020 ?*, avril 2014

69 – Selon le Top100 réalisé par la revue *Software Magazine.*

70 – McKinsey, *Accélérer la mutation numérique des entreprises : un gisement de croissance et de compétitivité pour la France,* septembre 2014

triels riche, les entreprises françaises ont encore du **retard dans l'adaptation au numérique**. Trois facteurs permettent d'expliquer ce retard :

- Le numérique bouleverse les organisations traditionnelles : il implique de changer l'organisation, le management et les usages ;
- Les entreprises ont un déficit de compétences numériques : elles ont du mal à trouver les talents nécessaires à cette mutation ;
- Les dirigeants d'entreprises ne s'approprient pas assez les enjeux et manquent de leadership pour entraîner les salariés dans cette révolution culturelle.

Alors que cette adaptation représente un gisement d'opportunités et de croissance pour les entreprises, **les entreprises françaises doivent aujourd'hui réussir leur transition vers le numérique pour rester compétitives**.

ACADÉMIQUE ET ÉCOSYSTÈME DE L'INNOVATION

La richesse et le dynamisme de l'écosystème d'acteurs de la recherche et de l'innovation est **une force majeure de la France**. Le domaine du numérique est structuré autour de onze pôles de compétitivité dont Systematic, Cap Digital, Image & Réseaux, Elopsys, Minalogic, SCS et TES. Ces pôles de compétitivité soutiennent financièrement et accompagnent la transition de la France vers le numérique. Parallèlement, les pouvoirs publics ont fait du numérique une priorité. Dans le cadre du premier volet des Investissements d'Avenir, l'État a fléché 4,25 Mds€ spécifiquement pour le secteur numérique (Fonds pour la Société Numérique), en complément de financements préexistants, à l'image du FUI. De nombreuses initiatives voient le jour pour encourager la transition de la société vers le numérique et faire de la France un leader mondial. On peut citer à titre d'exemple la création de la **Cité des objets connectés et de l'Agence des Systèmes d'Information Partagés de santé (ASIP), le Plan France Très Haut Débit, le programme hôpital numérique et le Plan École numérique.**

D'autre part, afin de développer les acteurs français du numérique et de renforcer sa visibilité au niveau mondial, l'État a décidé de créer le label « French Tech ». Elle a vocation à représenter l'ensemble de l'écosystème des *startups* françaises, d'être un soutien à l'innovation et de renforcer la lisibilité des actions publiques à l'égard des *startups*. Fin 2014, neuf écosystèmes ont reçu le label Métropole French Tech, et quatre autres l'ont reçu en juin 2015[71]. Pour soutenir cette démarche, un fonds d'investissement de 200 millions d'euros géré par Bpifrance sera amené à investir dans des accélérateurs de start-up privés à partir de 2015.

La France est le premier pays d'Europe représenté au *Consumer Electronics Show (CES)* avec 160 start-up françaises présentes, dont 10 primées (Parrot, Netatmo, Withings, Lima Technology, Emiota, My Fox, Technicolor, Voxtok, Giroptic, Cityzen Sciences). La France affiche un écosystème de PME et start-up dense, couvrant les nouveaux marchés de l'Internet, et en premier lieu, les objets connectés.

La France dispose, enfin, de nombreuses structures de recherche dédiées à l'innovation dans le domaine du numérique : le CEA, l'INRIA et le CNRS, les IRT SystemX, Nanoelec, B-com et Saint Exupéry font avancer la recherche dans ce domaine, sur tous les sujets qui le composent : *analytics*, *cloud*, objets connectés, réseaux très haut débit, systèmes embarqués, etc. Onze laboratoires ont été labellisés Laboratoires d'excellence (Labex), et la France dispose également de sept programmes d'équipements d'excellence (Equipex).

71 – Aix-Marseille, Bordeaux, Grenoble, Lille, Lyon, Montpellier, Nantes, Rennes, Toulouse, Brest, Côte d'Azur, Lorraine, Normandie.

Analyse AFOM

ATOUTS

Présence de plusieurs grands groupes industriels et de services, leaders mondiaux et actifs en R&D et à l'international

Tissu de start-up et PME numériques autour de la French Tech et forte dynamique entrepreneuriale

Existence d'un écosystème spécialisé en IoT et systèmes embarqués

Existence d'un tissu d'entreprises et de compétences fortes dans le domaine des infrastructures (traitement du signal, optique, logiciel, codage, etc.)

Savoir-faire des start-up françaises dans l'innovation d'usages

Garantie d'éthique et de responsabilité juridique par rapport à d'autres États

Qualité reconnue de la recherche académique (Télécom ParisTech, CEA, etc.), en particulier de l'école française de mathématiques.

Instruments et projets financés dans le cadre du PIA : FSN (ex. : concours d'innovation numérique, grands enjeux numériques, challenges numériques…), IRT, Labex et Equipex) et solutions industrielles de la Nouvelle France Industrielle

Projets européens et clusters Eureka mobilisant les acteurs français (ITEA 3, Celtic-Plus, ECSEL…)

FAIBLESSES

Faible capacité d'investissement et manque de capitaux pour développer des actions d'échelle

Faible maîtrise des composants et de la production des terminaux

Pas de système d'exploitation « Made in France »

Pas de plateforme majeure d'intermédiation et de collecte des données

Transfert à développer/accélérer entre académiques et industriels

Fragmentation du marché européen (infrastructures)

OPPORTUNITÉS

Les grandes tendances technologiques, industrielles et d'usage : confiance numérique, objets intelligents, valorisation des données massives (analyse, certification des données, modélisation et visualisation), dans les domaines de la ville durable, de l'énergie, de la Santé notamment

Appels à propositions d'Horizon 2020

L'Usine du futur et la digitalisation des entreprises (avec de nombreux leaders sectoriels : Airbus, Veolia, Valeo, etc.) dans un contexte où les PME françaises sont en retard.

MENACES

« Trous » dans la chaîne de valeur et risque de dépendance technologique (souveraineté)

Monopole de fait des GAFA et risque d'abus de position dominante

Vulnérabilité à l'intelligence économique (transferts de données)

Montée de la compétition internationale, notamment avec les États-Unis, le Japon, l'Allemagne et de plus en plus avec la Chine (équipements réseaux)

Peu d'entreprises positionnées sur certains sujets clés (notamment l'intelligence artificielle)

Acceptabilité sociale de la co-évolution homme-machine

SOURCES

ARCEP, *Observatoire des marchés des communications électroniques en France*, 2014

Boston Consulting Group, *The Mobile Internet Economy in Europe*, 2014

Cap Digital et Roland Berger, *L'aventure numérique, une chance pour la France*, 2014

CNIL, *Le corps, nouvel objet connecté du quantified-self à la m-santé : les nouveaux territoires de la mise en données du monde*, Cahiers IP - Innovation & Prospective, mai 2014

CNRS, *Livre blanc du calcul intensif,* 2012

Commission Européenne, *High Level Expert Group, on Key Enabling Technologies*, juin 2011

Commission « Innovation 2030 », *Un principe et sept ambitions pour l'innovation*, 2013

Comscore, *The US Mobile App Report,* 2014

Deloitte, *Technology, Media and Telecommunications Predictions*, 2014

EIT ICT Labs, *Strategic Innovation Agenda*, 2014

EY, *(Big) data : où en sont les entreprises françaises ?*, 2014

EY, *Industrie des télécommunications: tendances et défis,* mai 2014

FIRIP, *Quelle France numérique pour 2020 ?,* avril 2014

IDATE, *L'évolution des solutions de distribution des contenus vidéo*, 2012

IDATE, *DigiWorld Yearbook*, 2014

INRIA, *Plan stratégique horizon 2020*, 2012

Institut G9+, *Breakthrough: Electronic circuits that are integrated with your skin*, 2011

Institut G9+, *Livre Blanc, 2020 : où vont les industries françaises du numérique ?,* 2014

Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique, *Les 34 plans de la nouvelle France industrielle*, 2013

Observatoire du numérique, *Chiffres clés*, 2014

Roland Berger, *Telco 2020 : Un nouveau modèle industriel pour les opérateurs télécoms dans l'économie du numérique,* 2012

Fédération E-commerce et Vente à Distance (FEVAD), *Chiffres clés*, 2014

Fédération Française des Télécoms et Arthur D. Little, *Économie des Télécoms*, 2014

Systematic, *Plan stratégique 2013 -2018*, 2013

Union Internationale des Télécommunications, *ICT Facts and Figures*, 2014

« Sécurité et interopérabilité les enjeux de demain pour les objets connectés », Journaldunet.fr, 13/04/2015

«Le marché du *Big Data*, nouveau graal de l'informatique», LeFigaro.fr, Tech & Web, 02/04/2014

Données de l'*IRT NanoElec*

Données de *GFK*

Données de l'*IDC*

Données de *Gartner*

Site de la Commission Européenne

Site de la FEVAD

Site de l'observatoire du numérique

Site de la Direction générale des entreprises

GLOSSAIRE

5G : Infrastructures de cinquième génération pour la téléphonie mobile

Big Data : Les données massives désignent des ensembles de données qui deviennent tellement volumineux qu'ils en deviennent difficiles à travailler avec des outils classiques de gestion de base de données ou de gestion de l'information

CRM : Customer Relationship Management : gestion de la relation client

Cloud : Le cloud computing, ou informatique en nuage, est l'exploitation de la puissance de calcul ou de stockage de serveurs informatiques distants par l'intermédiaire d'un réseau, généralement Internet

E-commerce : Commerce électronique

ERP : Enterprise Resource Planning : progiciel de gestion intégré

French Tech : French Tech est le nom collectif pour tous les acteurs de l'écosystème de startups français, en particulier du numérique

GAFA : Google, Apple, Facebook, Amazon

IoT : Internet of Things : l'Internet des objets représente les échanges d'informations et de données provenant de dispositifs présents dans le monde réel vers le réseau Internet et inversement

MOOC : Massive Open Online Course : formation en ligne ouverte à tous

OTT : Over-The-Top content : Service de livraison de contenu audio, vidéo et d'autres médias sur Internet par contournement, c'est à dire sans la participation d'un opérateur de réseau traditionnel

SaaS : Software as a Service : Logiciel en tant que service. C'est un modèle d'exploitation commerciale des logiciels dans lequel ceux-ci sont installés sur des serveurs distants plutôt que sur la machine de l'utilisateur.

UIT : Union internationale des télécommunications

THD - UHD : Très Haut Débit – Ultra Haut Débit

TIC : Technologies de l'information et de la communication

VOD : Video on demand : vidéo à la demande. On parle aussi de Vidéo à la demande avec abonnement

SVoD : Subscription Video on Demand

© Fotolia

LOISIRS ET CULTURE

Définition

Le domaine des loisirs et de la culture regroupe un spectre large de secteurs basé principalement sur une économie de service et/ou une économie de contenu. Il regroupe :

- le tourisme c'est-à-dire la promotion des territoires, les offres de services liés au tourisme comme l'hôtellerie, ainsi que les supports touristiques (guides, service de réservation…) ;
- les activités liées au patrimoine, aux musées et monuments (supports de visites mais aussi restauration et conservation) ;
- les espaces de loisirs (parcs d'attraction, animaliers…) ;
- la production de contenus qu'elle soit audiovisuelle (cinéma, télévision, radio, web), multimédia (web, jeux vidéo), ou encore la production textuelle et l'édition dans le cadre des loisirs et de l'éducation ;
- le sport en termes d'équipements collectifs et personnels ;
- les biens de consommation liés aux loisirs comme les jouets et la robotique personnelle et de loisirs.

Technologies clés du domaine

N°	Intitulé	Spécifique / Transversale
1	Matériaux avancés et actifs	Transversale
2	Capteurs	Transversale
3	Valorisation et intelligence des données massives	Transversale
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique	Transversale
5	Internet des objets	Transversale
6	Infrastructures de 5ème génération	Transversale
9	Fabrication additive	Transversale
10	Cobotique et humain augmenté	Transversale
11	Intelligence artificielle	Transversale
12	Robotique autonome	Transversale
13	Communications sécurisées	Transversale
14	Technologies immersives	Transversale
19	Analyse comportementale	Transversale
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences	Spécifique

Les grands enjeux et les stratégies françaises

ENVIRONNEMENT

L'impact de l'environnement sur le secteur concerne principalement **le tourisme** : le changement climatique va modifier les pratiques. Les impacts majeurs risquent de se produire à très long terme (hausse de 2 à 4° C des températures d'ici à 2050) mais, dès 2020, des changements plus locaux sont à prévoir[1]. Certains espaces balnéaires sont soumis au risque de l'augmentation du niveau de la mer et d'érosion mais, selon les estimations de l'ONERC, les impacts significatifs ne devraient être ressentis qu'à partir de 2035. D'ici à 2020, les conséquences perceptibles devraient concerner en premier lieu les espaces français de sport d'hiver. Le WWF évalue la diminution globale des neiges à 30 % par rapport à 1990. Un manteau neigeux amoindri induit un raccourcissement des périodes d'accessibilité des pistes et modifie la pratique des sports alpins.

Les zones touristiques les plus touchées par le changement climatique sont les DROM – COM : de par leur situation insulaire, le risque de submersion marine est important à long terme. Plus encore, le nombre croissant d'évènements climatiques extrêmes et de crises sanitaires fait chuter l'attractivité touristique de ces régions.

A contrario, la hausse des températures, l'adoucissement du climat et l'allongement des périodes d'ensoleillement peuvent permettre à certains territoires de gagner en attractivité et d'étendre la période de fréquentation touristique des zones balnéaires.

D'autre part, la pression écologique induite par le tourisme a d'ores et déjà des impacts sur l'activité. Les vacances et les loisirs sont responsables de 5 % des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale et 10 % en France[2]. L'importance des sensibilités écologiques et les enjeux de protection de l'environnement ont conduit au dé-

1 – Secrétaire d'État chargé du Commerce, de l'Artisanat, des PME, du Tourisme, des Services et de la Consommation, 2011, *Le tourisme des années 2020*

2 – Idem

veloppement de nouvelles pratiques, d'une offre de tourisme vert et de tourisme durable ayant vocation à réduire l'impact du touriste en termes d'énergie, de consommation d'eau, de production et de gestion des déchets.

RÉGLEMENTATION

L'irruption du numérique dans l'économie bouleverse de nombreuses conventions économiques et sociales et met la réglementation au défi de s'adapter à des technologies et des pratiques en mouvement constant. Nulle part ailleurs ce bouleversement n'est plus visible que dans le domaine des loisirs et de la culture : émergence de plateformes de services et de contenus qui remettent radicalement en cause les chaînes de valeurs existantes et les règles traditionnelles de la concurrence et du commerce, vaste utilisation des données des utilisateurs qui rendent nécessaire une réévaluation des politiques de confidentialité et de vie privée, dématérialisation de nombreux produits qui bouleversent les systèmes de protection et de rémunération de leurs auteurs, développement de l'économie collaborative qui fragilise le droit du travail et les protections des salariés. L'organisation du marché numérique des loisirs et de la culture sous la forme de plateformes prestataires de services et fournisseuses de contenus représente un défi important de régulation du marché. En effet, l'effet de réseau lié au fonctionnement de telles plateformes, qui jouent sur le lien social et le service personnalisé pour rendre le consommateur captif, crée une situation de « winner takes all », où la plateforme la plus importante tend à devenir naturellement monopolistique. La plateforme dominante peut alors imposer à ses consommateurs et à ses fournisseurs, de services ou de contenus, des conditions commerciales contraignantes, voire abusives, comme le montre le conflit récent entre Amazon et l'éditeur Hachette. Cette situation avantageuse lui permet aussi de mettre en avant ses propres services, au détriment des services concurrents, sous le prétexte d'une recommandation personnalisée ou performante. Il n'existe néanmoins pas, à l'heure actuelle, de réglementation des plateformes dominantes, qui protègerait les fournisseurs et les consommateurs contre leurs pratiques prédatrices éventuelles et qui, pour être efficace, devrait être implémentée au niveau européen.

L'impact économique de ces plateformes (Apple, Amazon, Google, Facebook) est aussi causé par leurs pratiques d'évasion fiscale et d'optimisation réglementaire. Elles profitent de la disparité des règles fiscales des États européens pour s'installer dans les pays les plus permissifs et optimiser ainsi leur fiscalité et mettent leurs concurrents établis en France dans une situation de concurrence inéquitable. Une solution alternative à l'harmonisation globale des fiscalités européennes est d'adapter les règles fiscales aux spécificités de l'économie numérique, telles que l'immatérialité des services et la forte prépondérance des revenus liés à la publicité. Ainsi le principe du pays de destination a été appliqué à la TVA depuis le 1er janvier 2015, permettant de réduire les distorsions de concurrence liées aux différences de taux entre les États européens.

Avec le développement de l'économie collaborative, dont des sociétés comme Uber ou Airbnb se réclament, la protection traditionnelle des salariés vole en éclat. En se posant comme simples intermédiaires entre les consommateurs et des particuliers fournisseurs de services, elles nient toute obligation sociale ou commerciale envers les uns ou les autres. En théorie, ces plateformes visent à mettre dans le circuit économique des ressources privées inexploitées (immobilier, véhicules, heures de travail occasionnel) dont d'autres consommateurs pourraient profiter. En réalité, la frontière entre ce qui était traditionnellement du travail salarié et de l'activité professionnelle d'un côté, et des hobbies faiblement rémunérés de l'autre, s'estompe et menace de transformer toute une catégorie d'employés, traditionnellement de classe moyenne et protégés par le code du travail, en travailleurs précaires dotés d'une protection sociale minimale et portant financièrement tout le risque commercial lié à leur activité. La protection sociale n'est pas la seule impactée par des plateformes qui peuvent aussi bouleverser le paysage urbain et la mixité sociale, réduisant significativement le nombre d'appartement en location de longue durée dans des quartiers entiers pour les remplacer par des locations saisonnières qui n'ont de collaboratives que le nom[3]. Les autorités des différents pays affectés commencent à réagir, comme le montrent les actions de groupe contre Uber en Californie et l'activisme croissant de la ville de New York contre Airbnb. Toute la difficulté, pour le régulateur, réside dans sa

3 – http://cdn1.vox-cdn.com/uploads/chorus_asset/file/2361090/airbnb-ag-report.0.pdf

capacité à empêcher une remise en cause de la réglementation sociale, tout en soutenant l'innovation et la mobilisation de ressources privées et occasionnelles par des particuliers, qui peuvent ainsi compléter leurs revenus professionnels.

Enfin, les industries des loisirs et de la culture génèrent une quantité de données personnelles sur les consommateurs, dont la gestion et le commerce deviennent centraux dans le modèle économique des grands acteurs du numérique. Or l'Europe peine actuellement à établir des règles communes sur leur utilisation par les entreprises qui les collectent et sur leur monétisation, qui échappe pour l'heure à toute imposition dans le pays où elles ont été produites.

Tourisme et Patrimoine

Ce secteur est largement influencé par les nouvelles pratiques de la population et en premier lieu par la connectivité croissante. Ainsi, l'encadrement européen du *roaming* représente un enjeu pour ces acteurs. Les frais induits par l'itinérance facturée par les opérateurs aux clients voyageant d'un pays européen à un autre limitent le développement du m-tourisme pour les étrangers : ceux-ci ne voulant pas payer de surcoûts, ne profitent pas des applications disponibles sur leur *smartphone*, tablette... Leur suppression prévue en décembre 2015 a été reportée à 2018. Qui plus est, il est envisager de fixer un plafond (en octets, en euro ou dans le temps) pour la suppression de ces coûts : l'opérateur Free offre par exemple à ses abonnés la possibilité de profiter de leur forfait dans 12 pays de l'Union Européenne sans surcoût, durant 35 jours. Dans le même temps, cela réduit la quantité de données récupérées par les acteurs du tourisme. Ces données leur permettent de faire du « profilage » numérique et d'adapter leur offre.

Le « profilage » numérique est une pratique utilisée pour analyser ou prédire les performances professionnelles d'une personne, sa situation économique, sa localisation, etc. Il représente un atout pour le tourisme et les parcs de loisirs. Celui-ci permet de créer des offres plus personnalisées et d'analyser le flux touristique afin d'adapter l'offre globale. La mise en place en mars 2014 d'un règlement européen commun sur les données personnelles vise à faciliter les échanges transfrontaliers de données et garantir l'uniformité. Le non-respect de ce règlement implique des amendes allant jusqu'à 100 millions d'euros (ou 5 % du chiffre d'affaires annuel de l'entreprise). Les nouvelles dispositions devraient mieux protéger les données sur Internet. Elles incluent le droit à l'effacement des données, de nouvelles limites au «profilage», ou encore l'obligation d'utiliser un langage clair et simple pour expliquer les politiques sur le droit à la vie privée. Tout fournisseur de services Internet qui souhaite traiter des données à caractère personnel serait d'abord tenu d'obtenir le consentement libre, informé et explicite de la personne concernée.

La production de contenu

Le numérique bouscule les notions traditionnelles de droit d'auteur. L'apparition de produits reproductibles indéfiniment sans perdition de valeur a remis en cause les règles habituelles de rémunération des auteurs et mis en danger la création artistique. Ainsi les pratiques de piratage ont sans cesse une longueur d'avance sur les réglementations répressives censées les freiner : la loi Hadopi a détourné les pirates du peer-to-peer vers les sites de streaming, le blocage des sites a provoqué une recrudescence de l'utilisation de DNS alternatives ou de sites miroirs. Au point que les gouvernements et les ayants-droit se tournent vers des approches non réglementaires : celles destinées à accroître l'attractivité de l'offre (sites de streaming pour la musique, plateformes-DRM de services pour les jeux vidéo) ou à toucher les opérateurs de plateformes illégales au portefeuille (signature de chartes avec les régies publicitaires et les services de paiement en 2015).

Le piratage n'est pas la seule conséquence de l'irruption du numérique dans la culture. La territorialisation traditionnelle des droits, par laquelle les ayants-droit négocient pays par pays la cession de droits d'exploitation, est remise en cause par le caractère mondial des nouvelles plateformes de contenus.

Les exceptions, dont certaines reposent sur le caractère éphémère des supports culturels traditionnels (papier, cassettes vidéo), doivent être adaptées à ce nouveau paradigme. Ainsi comment étendre le droit de prêt des bibliothèques au livre numérique sans remettre en cause le modèle économique des éditeurs ? Comment appliquer et rémunérer l'exception pédagogique aux manuels scolaires numériques ? L'exception où la problématique du numérique est la plus prégnante est celle autorisant la copie à titre privé d'œuvres légalement acquises. La dématérialisation totale des œuvres, qui peuvent être copiées d'un support à l'autre au gré

des usages et des pratiques de sauvegarde, interroge sur le lien qu'établit le droit d'auteur entre l'œuvre et son support. Les approches divergent sur ce point : là où la musique et l'audiovisuel continuent de considérer qu'un droit de jouissance n'est cédé qu'en lien avec un support et que toute copie privée à partir de ce support cause un préjudice, le secteur du jeu vidéo, natif du numérique, préfère attacher le droit de jouissance à l'individu qui l'a acheté et autorise cet individu à installer les jeux achetés sur un nombre illimité de supports, pour peu qu'il reste le seul à en jouir.

Outre les exceptions au droit d'auteur, le numérique facilite des pratiques, souvent liées au droit de citation, auxquelles le code de la propriété intellectuelle peine à trouver des réponses : « mashups », « lipdubs », « machinima », « let's play », etc. Ces pratiques, considérées par certains ayants-droit comme bénéfiques à leur activité (notamment par les créateurs de jeu vidéo) peuvent être également vues comme des atteintes au droit moral du créateur sur son œuvre. Tout le défi de la réglementation reviendra donc à garantir le respect des droits du créateur tout en ne freinant pas ces innovations, qui deviennent souvent à leur tour des œuvres artistiques à part entière.

La démocratisation des outils de production et de distribution des contenus culturels rend également de plus en plus floue la frontière entre productions professionnelles et productions amatrices. La confusion est entretenue par la popularité croissante des hébergeurs comme Youtube, chez qui professionnels et amateurs se mêlent sans distinction de traitement. Comment, dans ce cas, appliquer une réglementation qui établit une distinction claire entre ces deux types de production ? La confusion des rôles se retrouve dans l'ensemble de la chaîne de valeurs. L'offre de contenus en ligne se caractérise par la coexistence de services qui ciblent des marchés similaires mais relèvent de statuts juridiques différents (éditeur de services, distributeur, hébergeur, etc.). Il en résulte des distorsions potentielles de concurrence entre des acteurs soumis à des réglementations plus ou moins contraignantes. Par exemple, pour écouter gratuitement de la musique en ligne, les internautes ont le choix entre des services éditorialisés de streaming musical (Deezer, Qobuz, Spotify, etc.) et des plateformes vidéo communautaires généralistes (Dailymotion, YouTube, etc.), dont la responsabilité dans la lutte contre le piratage est différente. Si les rôles des acteurs de la chaîne de valeur étaient plutôt bien définis dans l'ère analogique, le numérique brouille les frontières, en favorisant la diversification des modèles économiques et l'émergence de rôles hybrides.

La révision prochaine des directives européennes sur le droit d'auteur, sur les services audiovisuels, sur le câble et le satellite, ainsi que leur future transposition en droit national, devront répondre à l'ensemble de ces problématiques, en trouvant un équilibre entre soutien aux modèles économiques et commerciaux innovants et protection des créateurs.

Enfin aux enjeux purement règlementaires, viennent s'ajouter les enjeux fiscaux. En effet, les crédits d'impôt importants, mis en place dans le domaine audiovisuel ou vidéoludique par d'autres pays producteurs, ont un impact important sur la localisation des entreprises et des projets de production.

L'audiovisuel

L'impact de la transformation numérique sur la pertinence de la réglementation est particulièrement visible dans le domaine de l'audiovisuel, où celle-ci est plus contraignante que dans les autres industries culturelles, en raison du système de soutien à la production mis en place au nom de l'exception culturelle.

Ce système, qui repose sur un ensemble de contraintes financières (obligation de financement de la production européenne/française) et commerciales (mise en valeur de l'offre européenne et française à travers des quotas de diffusion), est remis en cause par l'installation ailleurs en Europe d'éditeurs étrangers de services. En l'absence de principe de pays de destination, ils ne sont pas tenus de respecter les mêmes règles de soutien culturel que leurs homologues français et se retrouvent en situation de concurrence biaisée. De la même manière, ils ne sont pas contraints d'appliquer la réglementation sur la chronologie des média, censée préserver la rentabilité des différents supports de diffusion (dont les salles de cinéma) en imposant un délai obligatoire avant la diffusion sur un support donné.

Ces réglementations, qui ont été mises en place pour promouvoir et défendre l'exception culturelle européenne, se heurtent également aux nouveaux modèles économiques et commerciaux apportés par le développement du numérique. Les quotas de diffusion freineraient l'apparition de services audiovisuels

thématiques, qui pourraient séduire des publics cibles de niche. De même, la chronologie des média est accusée de promouvoir le piratage en réduisant l'attractivité des services de média audiovisuels à la demande sur abonnement (SVoD), qui sont soumis à des délais minimaux de diffusion de 3 ans après la sortie en salle. La révision en cours de la directive sur les services de média audiovisuels et celle de l'accord interprofessionnel sur la chronologie des média seront l'occasion de répondre à ces problématiques.

Le secteur audiovisuel a également cette particularité d'être soumis à des contraintes de normes de diffusion, destinées à permettre l'accès de tous à la télévision hertzienne. L'État a, par le biais des normes qu'il impose au secteur hertzien par voie terrestre et qui se diffusent de fait aux autres modes de distribution, une influence considérable sur le rythme de déploiement des innovations dans le domaine. Ainsi la libération de la bande 700 MHz le 5 avril 2016 sera l'occasion d'encourager la généralisation de la haute définition (HD) et de préparer l'arrivée de l'ultra-haute définition (UHD), par l'introduction progressive des normes de compression et de diffusion les plus avancées (HEVC, DVB-T2).

Le jeu vidéo

Le jeu vidéo est un secteur qui, contrairement aux autres industries culturelles, montre une préférence pour l'autorégulation. Le système de classification des contenus en vigueur en France (PEGI ou Pan-European Game Information) a été créé par l'Interactive Software Federation of Europe (ISFE), qui représente les éditeurs de jeux vidéo en Europe. Bien qu'homologué par décret par les autorités françaises, ce système contraste avec celui qui domine dans l'audiovisuel, où ce sont un établissement public (CNC) et une autorité indépendante (CSA) qui sont chargés de la classification des contenus.

L'autorégulation domine également dans le domaine des pratiques commerciales, et notamment celles employées par les jeux *free-to-play*. Ce modèle économique s'appuie sur des jeux gratuits au sein desquels s'intègre un principe de micro-paiements par le biais de boutiques virtuelles. L'intégration de vente (objets, argents…) dans un jeu se décrivant comme gratuit est prise pour cible au Royaume-Uni, par la Commission européenne et en France. Cela n'a pour l'instant donné lieu qu'à l'émission de règles de bonne conduite par l'OFT anglais, tandis que la France n'a pas annoncé d'initiative en propre. En réponse à ces contestations et aux actions de groupes aux États-Unis, les principaux opérateurs de plateformes concernés, Apple et Google, ont pris des mesures destinées à informer les utilisateurs de l'existence de microtransactions dans les jeux et à bloquer les achats intempestifs par des utilisateurs non avertis (enfants en particulier). Cependant le régulateur, en la personne morale de l'ARJEL (Autorité de Régulation des Jeux d'Argent en Ligne), pourrait s'intéresser aux entreprises de jeux vidéo, si celles-ci continuent de flirter avec les jeux d'argent[4].

Enfin, avec la popularité croissante de l'e-sport, la question d'une reconnaissance officielle de cette nouvelle discipline se pose, avec tous les verrous réglementaires qu'elle pourrait aider à lever : possibilité d'organiser des tournois avec des récompenses monétaires, reconnaissance des sponsors dans les diffusions de compétitions, reconnaissance du statut des participants (visa pour les étrangers, revenus), etc.

L'édition

Les principaux enjeux réglementaires de l'édition tournent autour de l'application du principe de neutralité technologique au livre papier et à son équivalent numérique. Depuis sa condamnation en mars 2015 par la Cour de Justice de l'Union européenne, la France a dû appliquer un taux de 20 % au livre numérique, considéré comme un service numérique, au lieu du taux réduit de 10 % qui s'applique au livre papier. Cette différence de taux crée une iniquité de concurrence entre papier et numérique, qui nuit au développement du

4 – Comme le montrent les incursions menées par Konami et Zynga dans le domaine des jeux de hasard et de casino

marché du livre numérique en France. Seule une acceptation par l'Union européenne d'un taux unique permettra de résorber cette distorsion.

La question de la neutralité technologique se pose également dans le modèle de prêt en bibliothèques, qui est imposé par la loi dans le cadre du livre papier mais n'a pas été étendu au numérique. Les éditeurs avancent, pour justifier leur opposition à une extension de cette obligation au numérique, que le livre numérique ne connaît pas les mêmes contraintes que le papier (horaires fixes d'accessibilité, dégradation progressive, nombre limité d'utilisateurs simultanés). Si un accord a été trouvé fin 2014, sous l'égide du ministère de la Culture, celui-ci a été dénoncé par plusieurs associations de bibliothécaires en raison du coût exorbitant qu'il leur impose.

Enfin, la loi sur le prix unique du livre a été étendue depuis 2011 au livre numérique. Cette loi impose à l'éditeur de fixer un prix de vente de l'œuvre identique pour tous les revendeurs (en France comme à l'étranger). Mais elle se prête plus difficilement aux spécificités du numérique, où elle limite la possibilité pour les revendeurs de proposer des offres groupées, couplées entre numérique et papier ou encore des abonnements en accès illimité aux œuvres numériques sur le modèle d'une bibliothèque numérique. Ainsi, en janvier 2015, la médiatrice du livre a conclu à la légalité des offres illimitées, à condition que leur prix soit fixé additivement par les éditeurs qui les composent. Les négociations qu'elle mène depuis avec l'ensemble des acteurs du secteur pourraient permettre d'arriver à un compromis qui maintienne l'attractivité commerciale d'offres illimitées multi-éditeurs tout en respectant le principe du prix unique.

MARCHÉ

L'événement le plus marquant, intervenu dans le domaine des loisirs et de la culture ces 15 dernières années, est l'irruption des technologies numériques, qui continuent d'induire des changements profonds dans le secteur. L'abondance de l'offre et la mondialisation ont favorisé le développement de plateformes numériques intermédiaires, qui ont provoqué des bouleversements sans précédent de la chaîne de valeur et des rapports de force. En se posant comme simples outils de mise en relation directe du producteur et de son consommateur, elles présentent leur rôle comme celui d'une désintermédiation des intermédiaires traditionnels. Cependant, en réalité, par leur rôle dans la mise en valeur de l'offre et par leurs négociations contractuelles avec les producteurs, elles constituent bel et bien de nouveaux intermédiaires sur le marché (phénomène de réintermédiation plutôt que de désintermédiation).

Ces plateformes occupent une place centrale de la chaîne de valeur, qui leur donne un pouvoir disproportionné sur l'ensemble du marché :

- comme cela a déjà été mentionné dans la partie « réglementation», l'effet de réseau inhérent au rôle de ces plateformes comme intermédiaire tend à favoriser des positions quasi-monopolistiques des plus importantes d'entre elles ;
- les plateformes tentent d'accroître cet effet de réseau en rendant le consommateur captif d'écosystèmes fermés lui fournissant tout ce dont il a besoin ;
- cette position dominante est encore accentuée par la rente de situation que leur confère la quantité importante de données qu'elles collectent sur les consommateurs et les producteurs de services et de contenus. Ainsi une nouvelle plateforme sera très désavantagée par rapport à une autre qui a accumulé des années de données comportementales sur ses utilisateurs.

Le marché, qu'il soit touristique ou culturel, se retrouve alors constitué d'une poignée d'intermédiaires dominant une masse de producteurs de contenus qui luttent pour être visibles sur ces plateformes. Une grande partie de la valeur se retrouve alors captée par les grandes plateformes du fait de deux phénomènes :

- leur position dominante, face à un grand nombre de petits acteurs qui dépendent de leurs algorithmes de recommandation ou autres outils de visibilité (comme les recommandations éditoriales sur l'Appstore), leur donne un pouvoir de négociation important qui leur permet d'obtenir des conditions commerciales avantageuses, comme le montre le conflit entre Amazon et les auteurs de littérature ;
- la multiplication de l'offre, sa grande disponibilité et sa faible visibilité tirent les prix des contenus et des services vers le bas et favorisent, dans le cas des produits dématérialisés, les modèles gratuits rémunérés par la publicité et les modèles freemium. Ceux-ci donnent alors une valeur croissante aux données

comportementales qui sont aux fondements de leur performance. Ainsi on observe un transfert de la valeur des contenus et services vers les données, souvent monopolisées par les plateformes.

L'enjeu pour le marché devient alors de maintenir des conditions de concurrence créatrices de valeur et d'innovation dans un contexte où :

- les nouvelles plateformes innovantes se trouvent confrontées à des concurrents dominants armés d'une grande expérience du comportement des utilisateurs, d'un pouvoir de négociation important et s'étant assuré de la captivité de leur clients (par la non-portabilité des contenus par exemple) ;
- les nouveaux fournisseurs de services et de contenus entrent sur un marché souvent saturé d'offres et dominé par des intermédiaires aux pratiques parfois prédatrices. Les compétences vitales sur ce type de marché peuvent alors être très éloignées de leur expertise première dans la production de contenus ou de services : maîtrise des algorithmes de recherche et de recommandation (SEO ou Search Engine Optimization), connaissance approfondie des nouveaux canaux de marketing et de leurs avantages respectifs.

Les producteurs de contenus et fournisseurs de service doivent également tenir compte de l'évolution géographique et démographique des marchés ciblés :

- les pays émergents, en particulier la Chine, prennent une part croissante dans la consommation de produits culturels et touristiques. Cela implique, pour les entreprises, une adaptation linguistique et culturelle de leurs produits. Par exemple, les attentes chinoises en matière de modèles économiques dans le jeu vidéo sont extrêmement différentes de celles des occidentaux (réticence devant les jeux payants mais forte propension à acheter des objets dans les jeux qui témoignent de leur statut social) ;
- le vieillissement des populations occidentales met la Silver Economie au cœur des stratégies commerciales des secteurs des loisirs et de la culture. Dès 2015, les 60 ans et plus assureront 54 % des dépenses de biens et services dont 57 % pour les loisirs[5]. 42 % des acheteurs de biens culturels ont 50 ans et plus, ce qui représente (en valeur) 38 % des dépenses.

5 – CGSP, décembre 2013, *La Silver économie, une opportunité de croissance pour la France*

Tourisme et Patrimoine

Le secteur du tourisme est particulièrement affecté par les modifications démographiques. Si les jeunes sont les plus nombreux à partir, les seniors alimentent davantage le marché du tourisme en raison de dépenses plus importantes (pouvoir d'achat plus élevé) et de séjours de plus longues durées.

La France est la première destination touristique mondiale avec 83,7 millions de touristes en 2014[6] , soit un marché de 134 milliards d'euros[7].

Le secteur est largement influencé par les pratiques socioculturelles dont l'augmentation de la connectivité des populations. En conséquence, l'e-tourisme représente le premier secteur du e-commerce en France. Avec la pénétration croissante du smartphone (et dans une moindre mesure des tablettes) au sein de l'ensemble des populations, le m-tourisme connaît une croissance importante. L'usage est encore restreint puisque si 37 % d'internautes ont préparé leurs vacances depuis leur mobile en 2013, seuls 11 % ont finalisé l'acte d'achat[8]. Les acteurs du tourisme ont encore une présence relativement faible sur ces média (3 % des offices de Tourisme et 37 % des agences de voyage, et agences en ligne[9]) mais commencent à mettre en place diverses stratégies afin de conquérir ces marchés. Les agences de voyages, tour-operators et autres guides de voyage adaptent progressivement leurs offres pour s'adapter à une demande « connectée » via par exemple la création d'applications de « guides de voyage » interactifs avec la possibilité d'utiliser la géolocalisation.

Le nombre d'objets connectés passera de 62 millions à 21 milliards en 2020[10] à l'échelle mondiale et le nombre de connexions entre objets communicants devrait progresser de 27 % d'ici à 2016[11]. Les acteurs du tourisme intègrent donc ces nouvelles pratiques à leur offre avec les technologies du « sans contact » (NFC - *Near Field Communication*) donnant ainsi accès aux

6 – DGE 2015

7 – INSEE, 2011

8 – Fevad 2012

9 – DGCIS, 2013

10 – Analysys Mason

11 – ABI Research

transports, aux espaces touristiques, aux billetteries évènementielles, et des potentiels développements dans les accompagnements, de visite (mise en place à l'essai à Nice par exemple en 2014).

Cependant, le développement du m-tourisme est pour l'instant limité aux touristes français (voire européens) et exclut une part montante de nouveaux clients n'ayant pas forcément accès au réseau internet. Les enjeux liés au *roaming* constituent ainsi l'un des défis à relever pour le secteur tant d'un point de vue technologique que règlementaire. Les touristes issus des classes moyennes hautes des pays émergents représentent un segment de marché à ne pas négliger. (5 millions de touristes asiatiques en 2014[12] dont 1,7 million de touristes chinois, soit une clientèle qui a doublé entre 2010 et 2014 et qui connait toujours la hausse la plus dynamique (+23 % en 2014)[13]).

Avec 21 milliards d'euros de chiffre d'affaires du tourisme pour la valorisation et le tourisme patrimonial, les musées et autres acteurs de la culture sont en partie intégrés au secteur du tourisme. Les musées français ont enregistré 60 millions d'entrées en 2013, auxquelles s'ajoutent les 16 millions d'entrées des monuments historiques[14]. Cependant, quelques musées et monuments (le Louvre, le Centre Georges Pompidou, la Tour Eiffel) concentrent la majeure partie des visites notamment étrangères. Afin d'étendre leur marché et de s'adapter à un nouveau public, ces derniers souhaitent cibler les usagers « connectés » en utilisant les technologies comme la réalité augmentée. Cela permet également d'améliorer l'accessibilité des musées et d'ouvrir leurs portes à des publics handicapés (malvoyants, sourds…) et aux enfants grâce à la dimension ludo-pédagogique. Les villes mettent également en place des activités touristiques (visites thématiques comme à Bordeaux ou Lyon, parcours à énigme) en lien avec la réalité augmentée et la gamification afin d'augmenter leur attractivité. Si la réalité augmentée concerne surtout le patrimoine culturel pour le moment, le patrimoine naturel fait également l'objet d'attention avec la volonté de développer des applications permettant par exemple de donner des informations sur la faune et la flore.

12 – DGE, 2015

13 – DGE, 2015

14 – Ministère de la Culture et de la communication

Les parcs de loisirs regroupant parcs d'attraction, parcs animaliers, parcs aquatiques, parcs à thèmes et plaines de jeux couvertes pour enfant, sont au nombre de 600 sur l'espace français. Les parcs de loisirs accueillent environ 30 millions de visiteurs par an ce qui représente un peu plus de 2 milliards d'euros de chiffre d'affaires annuel moyen, mais ces chiffres sont en grande partie le fait des majors (Disneyland, la Compagnie des Alpes avec le Futuroscope et le Parc Asterix, le Puy du Fou, le Zoo de Beauval)[15].

Le sport

Depuis 2012, les ventes d'articles de sport et de services associés ont connu une croissance stable autour de +3 % qui porte le chiffre d'affaires du secteur à 9,6 milliards d'euros[16].

Le marché français des équipements, textile et chaussures de sport a progressé de 3 % en 2014 à 10,8 milliards d'euros. Le marché est notamment porté par la chaussure de sport, en hausse de 8 % en valeur et le textile à + 1 %. Les pantalons de survêtement, pantacourts, vestes coupe-vent/imperméables, tops stretch, doudounes sans manche et maillots de football bénéficient de hausses de plus de 5 %. En termes de disciplines pratiquées, le running, le basketball et les activités pratiquées en clubs de gym sont les moteurs de l'activité[17].

Le marché de l'*outdoor* représente en Europe 16,3 milliards d'euros (en 2013) et malgré une stagnation voire une régression à l'échelle européenne, le marché français progresse modestement[18].

Le marché du sport se concentre en particulier autour des accessoires de sport (chaussures et textiles). Le textile appliqué au marché du sport (qui représente 50 % du marché *outdoor* en moyenne) vise deux principaux objectifs : la performance et le confort. Les textiles chauffants par exemple connaissent une croissance annuelle de 50 % selon les industriels présents sur ce marché (Gerbing, Alpenheat 43).

15 – < www.veilleinfotourisme.fr >, consulté le 25/06/2015

16 – Ministère des Sports, de la jeunesse de l'éducation populaire et de la vie associative, 2013, Les chiffres clé du Sport

17 – DGE 2015

18 – NPD Group, 2013

L'ensemble du secteur voit également se développer le marché des textiles et équipements sportifs connectés et en lien avec celui-ci le développement de technologies liées au big data pour les sportifs. Ces nouveaux équipements permettent de suivre d'une part les performances et d'autre part l'état de santé des sportifs. S'adressant aussi bien aux sportifs de haut niveau qu'au grand public, le marché des objets connectés pour le sport devrait représenter 18 milliards de dollars à l'échelle mondiale d'ici à 2018.[19]

En 2013, une étude du CEA chiffrait à 33 % le pourcentage de personnes qui utilisent régulièrement leur téléphone mobile pour mesurer des données de santé. Une habitude qui devrait se développer car selon une étude Opinion Way, 53 % des Français pensent que les outils technologiques sont une aide dans la gestion de la santé et du bien-être.

De plus, l'ère du textile connecté semble s'ouvrir. Parmi les 9 solutions de la Nouvelle France industrielle, la solution « Objet connecté » intègre la question des textiles intelligents et connectés, reprenant ainsi l'un des 34 plans industriels lancés fin 2013 qui avait comme objectifs d'« Exploiter les opportunités offertes par les révolutions numériques et les nanotechnologies, grâce aux textiles intelligents et innovants ».

La production de contenu

Le marché de l'audiovisuel, du multimédia et la production de contenu est très mondialisé. Les marchés s'organisent aujourd'hui par bassins linguistiques et culturels, et par spécialisation de programme. Sous l'impulsion du numérique et de la mondialisation, la production et la distribution des contenus se concentrent sur un nombre restreint d'acteurs mondiaux (Sony, Disney, Time Warner, Google, Bertelsmann, Vivendi, etc.), tandis que des bassins régionaux émergent (comme Bollywood). Parallèlement les coopérations internationales s'intensifient. Des milliers de programmes culturels se coproduisent et s'échangent sur des marchés globaux et dématérialisés. Les programmes produits par les multinationales des médias sont déclinés et adaptés aux goûts des marchés locaux. C'est là la forme moderne de la diversité culturelle que l'on nomme « *mondialocalisation* » (glocalisation). Dans ce contexte, l'Europe, en l'absence de marché unique perd chaque année, et depuis plusieurs années, 8 % de parts d'exportation.

Or, l'Europe, les États-Unis et le Japon représentent actuellement 80 % du marché mais ne devraient représenter d'ici à 2020 que 60 % de ce marché. Sa croissance est largement tractée par les BRIC et les pays émergents.

Usagers, producteurs, diffuseurs, développeurs, industriels, sont aujourd'hui à l'étape cruciale de la convergence numérique, née de l'interopérabilité et de l'interconnexion des technologies et des supports. Les usages et les modes de création de contenus s'en trouvent profondément modifiés. Jusqu'alors, l'usager juxtaposait ses pratiques car la distinction entre médias était bien marquée quant à la nature des contenus. Dans un univers technologique interconnecté, le consommateur passe d'un média à l'autre de manière transparente pour y trouver le même type de biens et de services informationnels désormais libérés des contraintes liées au support technique (mobile, tablette, etc.). La convergence technologique va donc peu à peu conduire à la convergence culturelle entre anciens et nouveaux médias.

La multiplication des modes de consultation des contenus a ouvert la voie à des nouvelles formes de narration et de production à travers le transmédia qui favorise l'interaction, la participation et l'immersion du spectateur. Ce phénomène suppose également une adaptation des modèles économiques, ainsi que des compétences des créateurs. En réponse à ce contexte de convergence technologique et de mutations des usages, les contenus se sont faits multi supports, géolocalisés, ubiquitaires, communautaires ; ils se diffusent de plus en plus via des plateformes et bientôt via des objets communicants (*Internet of Things*).

La démocratisation des outils de production, la facilité de distribution sur les plateformes de contenus dématérialisés et l'apparition de sources de financement alternatives (crowdfunding par investissement ou par don) ont dans un premier temps provoqué une importante multiplication et une diversification de l'offre de contenus culturels. Des genres entiers avaient été écartés par les éditeurs qui s'étaient détournés des marchés de niche en raison des coûts de production croissants et sont réapparus sur les plateformes communautaires. L'afflux de nouveaux créateurs a également provoqué l'apparition de genres nouveaux,

19 – Juniper Research

notamment dans l'audiovisuel et le jeu vidéo. Dans le même temps, le rôle des éditeurs a été remis en cause, du fait de la capacité des créateurs à marketer et distribuer directement leurs œuvres aux consommateurs.

Cependant, l'offre devenue pléthorique a vite été confrontée aux limites de visibilité des plateformes, dont les algorithmes de recommandation, basés sur les usages et la popularité des œuvres, ne sont pas conçus pour faire sortir de l'ombre de nouvelles œuvres prometteuses. Au contraire, ces algorithmes encouragent une certaine bestsellerisation de l'offre en accentuant la popularité ou le caractère méconnu des contenus présents sur les plateformes. Ainsi :

- La concurrence sur ces plateformes s'est opérée principalement par les prix, seul outil disponible à ces nouveaux auteurs pour enclencher l'effet d'entraînement dans la visibilité. Cette pression sur les prix n'a pas eu de limites, du fait du coût marginal négligeable des produits dématérialisés. En particulier, pour les marchés où la concurrence a été la plus brutale (presse, jeu vidéo mobile), ce sont maintenant les modèles freemium ou rémunérés par la publicité qui prédominent. Cette course vers la gratuité a été accélérée d'ailleurs par les pratiques encore fréquentes de piratage qui ont diminué la propension des consommateurs à payer pour leurs contenus (musique en ligne).

- La boucle de rétroaction positive, créée dans la visibilité des œuvres par le mode de fonctionnement des algorithmes de recommandation, a eu pour effet de rendre encore plus imprévisible le succès des œuvres, qui, lorsqu'elles n'adressent pas un marché de niche déjà conquis, doivent compter sur l'effet de viralité pour se faire connaître.

- La pression à la baisse des prix et la viralité ont contribué à diminuer encore le taux de succès d'une industrie déjà connue pour son risque. Par exemple, dans le jeu vidéo, alors que le taux de succès dans les jeux traditionnels à gros budget était d'environ 20 %, il est estimé à moins de 1 % pour le marché mobile.

Ce phénomène a eu et aura à court terme plusieurs conséquences :

- une mortalité importante de petits acteurs au profit de quelques élus, qui auront tiré leur épingle du jeu de la viralité. Cependant, sur les marchés les plus volatiles, comme le jeu mobile ou les vidéos sur Youtube, un succès n'est pas une garantie d'une prospérité pérenne et les « one-hit wonders » sont nombreuses, comme le montrent les difficultés des géants Zynga, Gameloft ou Rovio ;

- un tarissement des sources de financement : les banques et les investisseurs traditionnels se détournent de ces industries jugées trop risquées. Quant au financement participatif, il souffre d'une désaffection du public, du fait de plusieurs phénomènes simultanés : échecs retentissants de campagnes phares, utilisation abusive des plateformes de crowdfunding comme outil marketing ou de mesure d'audience, report du risque par les investisseurs traditionnels sur les mécènes du crowdfunding (comme l'illustre la vente d'Oculus à Facebook qui a profité aux investisseurs entrés après le succès de la campagne Kickstarter) ;

- un retour en force des éditeurs (chaînes Youtube, grands groupes de presse en ligne), dont l'expérience dans les campagnes de marketing traditionnelles et la capacité à absorber leurs coûts est redevenue un atout sur un marché saturé. Ces éditeurs ne sont pas toujours les acteurs traditionnels, devenus très frileux sur un marché risqué, mais parfois des acteurs nouveaux (producteurs Youtube tels que Maker Studios, éditeurs de « jeux indépendants » tels que Devolver Digital, grands groupes de presse en ligne du type Vox Media ou Buzzfeed).

Le rééquilibrage du marché par l'extinction de nombreux acteurs sera brutal, mais le foisonnement de l'offre demeurera et l'enjeu principal sera alors de rétablir une certaine prévisibilité de la rentabilité des projets. Celle-ci passe par des moyens de « trouvabilité » qui permettent à chaque public de trouver l'œuvre qui est susceptible de lui plaire, quelle que soit sa popularité. Ces outils de visibilité devront vraisemblablement reposer sur une combinaison des analyses d'achat et d'usage (à l'instar du magasin d'Amazon), des caractéristiques intrinsèques des œuvres (sur le modèle de la radio Pandora) et des recommandations de leaders d'opinions (comme tentent de l'implémenter les plateformes Steam ou Spotify).

Pendant ce temps, les média traditionnels (chaînes de télévision, journaux papier, jeux vidéo à gros budget), qui cohabitent maintenant avec ce foisonnement de contenus numériques, doivent trouver leur place dans ce nouvel écosystème, en réinventant leurs modèles et en affirmant leur valeur ajoutée.

L'audiovisuel

Portés par les éditeurs de chaînes de télévision et les FAI, le streaming et la VOD représentent également un marché en plein essor pour la diffusion de contenu vidéo. Le marché a progressé de 3,8 % en 2014 à 250 millions d'euros. On compte à ce jour environ 90 services de VOD en France et force est de constater que l'effet NETFLIX n'est pas encore visible. On peut penser que dans les années à venir, les nouvelles offres (Netflix, EST,...) devraient booster ce marché.

Le marché français de la musique représente quant à lui 25 % des ventes numériques. Si l'ensemble du marché a perdu le tiers de sa valeur depuis 2007 et que ses revenus ont chuté de 5,3 % en 2014, le marché numérique progresse avec une hausse de 6 % de ces revenus entre 2013 et 2014.

Figure 1 : Le marché numérique français de la musique - Répartition des revenus (sources : SNEP retraité par Erdyn)

■ Le téléchargement représente un peu moins de la moitié de la distribution numérique de musique avec sur le devant de la scène Itunes. Ce géant capte près de 80 % des revenus du téléchargement.

■ Le streaming est le secteur connaissant la plus importante progression en France mais aussi à l'échelle mondiale, les revenus du streaming ayant enregistré une hausse de 39 % en 2013[20] et 34 % en 2014[21]. Il représente aujourd'hui 16 % des revenus totaux de la musique. Le suédois Spotify et le français Deezer dominent le marché hexagonal, notamment grâce à leurs partenariats respectifs avec SFR et Orange dont l'offre mobile intègre l'accès au service de streaming.

Dans le domaine de la production, si la production audiovisuelle française (fiction, documentaires, animation, magazines, vidéoclips et spectacles vivants) se situe aux alentours de 900 millions d'euros, il faut aussi considérer les marchés des films *corporate*, des contenus pour sites web ou encore les films à usage publicitaire (700 films environ pour un chiffre d'affaires de 250 millions d'euros).

Le jeu vidéo

De même, le marché du jeu vidéo et des médias est à la fois en expansion et en mutation (évolution des supports et des pratiques). Sa croissance est limitée dans les pays matures (France, Royaume Uni, Allemagne, États-Unis…) avec une croissance de 4,1 % en 2014 mais les BRIC connaissent une croissance à deux chiffres notamment en Chine (12 %) ou au Brésil (10,6 %)[22].

Figure 2 : Évolution du marché du jeu vidéo en France (M€) - IDATE - 2012

20 – Syndicat National de l'Édition Phonographique, 2014, *L'Économie de la production musicale*

21 – < http://www.snepmusique.com> , consulté le 12.05.2015

22 – IDATE, 2012

Avec un chiffre d'affaires de 2,7 milliards d'euros en France (2013) et 50 % de la population qui joue, le jeu vidéo est la deuxième industrie de loisirs française. Le dynamisme du secteur varie selon les supports avec des taux de croissance plus ou moins importants. Le *software* pour PC (physique et dématérialisé) représente 134 millions d'euros par an avec une tendance forte à la dématérialisation[23]. Il faut cependant tenir compte de l'impossibilité d'évaluer avec exactitude les ventes dématérialisées sur PC, les principaux acteurs concernés ne communiquant pas leurs chiffres de vente. Cela induit une sous-estimation chronique du marché notamment avec la part grandissante prise par le *free-to-play*. Le développement de ce nouveau business model oblige les concepteurs de jeux à repenser leur pratique. La part croissante du jeu dématérialisé est liée à la mutation du marché et à un renversement de l'équilibre en faveur des plateformes mobiles : si l'ordinateur individuel représente toujours un peu plus de 50 % de l'offre des éditeurs français, le jeu sur mobile (*smartphone* et tablette) connaît une forte croissance à la fois en terme d'offre puisque plus de 30 %[24] de l'offre française est à destination des plateformes mobiles, que de pratique puisque 50 % des joueurs français jouent sur un *smartphone* ou une tablette[25].

Au sein de ce secteur, le *serious game* est lui aussi en développement avec une réappropriation dans divers secteurs (santé dans le cadre de rééducation et d'éveil ; formation et e-learning ; réappropriation par les musées et parcs d'attraction…). Avec une croissance annuelle de l'ordre de 47 % entre 2010 et 2015 et un marché français représentant 47 millions d'euros en 2012[26], le *serious game* connaît un essor important. Si le « boom » espéré s'avère moins important qu'attendu, le positionnement des acteurs français sur le marché reste un enjeu important.

L'édition

Parmi les secteurs liés à l'économie de contenu, c'est l'édition qui stagne le plus en France. Ses revenus sont relativement stables. Ils sont mesurés par les revenus nets des éditeurs (2,8 milliards d'euros en 2011[27]) et par les ventes en sortie de caisse (4,13 milliards d'euros en 2012[28]). L'un des enjeux majeurs réside dans l'essor de l'édition numérique qui est encore marginale : 2 % du chiffre d'affaires des éditeurs en 2011[29] et 0,6 % du marché total du livre en 2012 (soit 21 M€[30]). Elle pourrait atteindre 75 M€ en 2015. C'est très inférieur aux marchés américains et anglais, où le livre numérique atteint respectivement 20 et 15 % de la valeur. L'équipement croissant de la population en liseuse (500 000 unités fin 2013[31]) et en tablettes contribue à l'augmentation des ventes d'e-book mais dans une moindre mesure qu'attendu. Celles-ci devraient atteindre 20 % des ventes de livres d'ici 2017[32]. Le marché professionnel représente encore la majeure partie de l'activité (56 % soit 46 M€), mais sa progression a surtout été portée par la forte augmentation des ventes vers le grand public avec 44 % du chiffre d'affaires en 2014 contre 29 % en 2012. Cette augmentation est liée à la fois à l'augmentation de l'équipement de la population comme évoquée mais également aux évolutions des habitudes de lecture et à l'étouffement de l'offre des éditeurs. Les enjeux d'évolution de ce marché reposent sur ces deux derniers points. Cependant, le livre numérique, et notamment le livre enrichi grâce aux possibilités qu'offre ce support, suppose des coûts de production plus importants qui ne peuvent encore être totalement répercutés sur le prix de vente. Si le livre numérique bénéficie d'une diminution des coûts avec l'absence de point de vente, le rééquilibrage des coûts n'est pas encore effectif avec des coûts de communication plus élevés que dans l'édition traditionnelle. Qui plus est, les comportements d'achat sont très différents entre le secteur de l'édition traditionnel et le secteur de l'édition numérique. Mais les initiatives se multiplient depuis près de cinq ans pour créer les conditions de réussite de ce nouveau marché. Si Numilog, filiale de Hachette qui distribue des livres numériques, existe depuis 2008, citons le Labo de l'Edition, labellisé Paris & Co, qui cherche à développer l'innovation dans le domaine de l'édition. Parmi les sociétés incubées, la société FlameFy, qui développe un outil de *storytelling*

23 – Syndicat des Editeurs de Logiciels de Loisirs

24 – SNJV – IDATE, 2014, *Baromètre annuel du jeu vidéo en France*

25 – SELL 2015, *L'essentiel du jeu vidéo*

26 – IDATE, Digiworld, 2014

27 – Syndicat national de l'édition

28 – GfK, 2014

29 – Syndicat national de l'édition

30 – GfK, 2014

31 – GfK, 2014

32 – Xerfi,2014, *La distribution de livres face aux enjeux du numérique - Prévisions et perspectives à l'horizon 2017, paysage concurrentiel et mutations de l'offre*

interactif, est emblématique de ce secteur qui cherche de nouvelles façons d'écrire, de nouvelles formes de narration.

PRODUCTION

Tourisme et Patrimoine

Le premier enjeu lié à la production d'offres touristiques et d'activités liées au patrimoine réside dans les nouvelles technologies utilisées telles que la réalité augmentée ou les enjeux liés à la ville connectée qui font nécessairement augmenter les coûts de production. Les grandes villes telles que Paris, Bordeaux ou Lyon misent sur ces nouvelles tendances pour étendre leur gamme de service. Bordeaux propose ainsi un parcours en réalité augmentée permettant de se balader dans la ville en retraçant son histoire. Lyon s'illustre en proposant le premier service de wifi de poche permettant aux touristes étrangers de rester connecté : il s'agit d'un boitier fonctionnant sur le modèle d'une clé 4G (disponible à la location auprès du Pavillon ONLYLYON Tourisme). Cela offre ainsi aux étrangers la possibilité de profiter de l'ensemble de l'offre de m-tourisme local. Cependant, le secteur se caractérise par la présence de nombreux acteurs de taille modeste pour qui l'investissement nécessaire est trop important.

Le second verrou rencontré dans le secteur du tourisme concerne l'étude de la clientèle. Il est à la fois financier, technique et réglementaire et limite l'usage des données de téléphonie mobile pour « tracker » les flux touristiques. L'analyse des données de géolocalisation des téléphones portables représente un nombre d'informations important (origine des touristes, durée du séjour, lieux d'hébergement, mobilité touristique et excursion…) mais soulève en premier lieu la question de l'usage des données personnelles, bien que ces données soient anonymisées voire regroupées par l'opérateur de téléphonie (l'accès aux données sources n'étant pas légal). Le second problème réside dans l'obtention de ces données auprès de l'opérateur. Cela suppose un accord avec l'un des fournisseurs et donc un enjeu financier potentiellement important auquel s'ajoute l'absence d'interopérabilité entre les bases de données des différents opérateurs.

Qui plus est, le suivi des touristes par données de géolocalisation ne peut être effectif que dans les zones bien couvertes en termes de réseau, excluant ainsi les espaces ruraux et montagneux. Les touristes étrangers sont également plus difficiles à suivre dans la mesure où ils ne sont pas nécessairement connectés.

Le sport

L'industrie des équipements sportifs est particulièrement concernée par la délocalisation et en particulier pour les activités « traditionnelles » comme la production textile. Décathlon par exemple réalise près de la moitié de sa production en Asie (Chine et Thaïlande)[33]. L'augmentation des technologies incorporées au sein des produits est, selon la FIFAS (fédération française des industries sport & loisirs), un levier permettant de conserver une part de la production en France.

La production de contenu

La dématérialisation des contenus et leur coexistence éventuelle entre plusieurs formats ou avec leurs équivalents physiques oblige les entreprises traditionnelles des média et de la culture à revoir intégralement leur processus de production de contenus, en changeant leurs outils, leurs formats ou l'organisation humaine ou matérielle de leurs chaînes de production. Au-delà des investissements matériels considérables que cela demande à des entreprises qui ont souvent des marges de manœuvre financière faibles, ces bouleversements imposent des ajustements dans la gestion des ressources humaines, qui incluent des formations à ces nouveaux outils mais aussi à de nouveaux métiers. Au vu des changements importants que la numérisation intégrale de leur chaîne de production impose et des risques financiers et commerciaux qu'elle comporte, la tentation est forte de se contenter de rajouter, par-dessus l'infrastructure de production traditionnelle, des processus peu optimisés de production numérique. Les entreprises sont alors confrontées à des coûts marginaux de production élevés et à des problèmes d'assurance qualité importants.

Ces bouleversements des processus sont rendus d'autant plus difficiles à gérer que s'ajoutent des étapes de traitement des contenus spécifiques au numérique (postproduction). Ces étapes doivent alors être intégrées de manière harmonieuse dans le flux de la production des contenus. Mais elles peuvent également faciliter le travail des créateurs traditionnels en accroissant l'information disponible lors du processus de création

33 – Dalila Messaoudi. Le territoire français à l'épreuve de la délocalisation des activités industrielles : le cas du secteur textile-habillement. Bulletin de la Société géographique de Liège, 2012

(prévisualisation des effets spéciaux, aide à l'écriture d'articles journalistiques). Elles nécessitent alors une formation spécifique des créateurs à leur utilisation.

Les différences de compétitivité entre les pays à bas coût structurel, ceux qui pratiquent des politiques d'incitation fiscale agressives et les autres provoquent des mouvements massifs de délocalisation des tâches à basse valeur ajoutée. Ainsi la numérisation de documents écrits, la réalisation de textures, d'animation ou de tests qualités pour l'audiovisuel et le jeu vidéo sont majoritairement réalisées dans les pays émergents.

Ce mouvement pose d'importants problèmes économiques aux pays développés qui voient ainsi partir de nombreux emplois. Tout l'enjeu consiste alors, pour relocaliser en France ces emplois, à recentrer la production sur les tâches à forte valeur ajoutée, en automatisant avec des outils spécifiques (optical character recognition ou OCR, création procédurale d'assets 3D, etc.) celles sur lesquelles la France n'est pas compétitive. Ces développements d'outils impliquent des investissements importants, ainsi que l'acquisition de compétences inédites dans ces secteurs.

La délocalisation des tâches vient également amplifier l'effet de l'explosion des budgets et des équipes sur les processus de production. En effet, les productions les plus grosses, que ce soit dans le jeu vidéo ou le cinéma, impliquent une collaboration entre plusieurs studios, répartis sur l'ensemble du globe. La difficulté réside alors dans la création d'un processus de production et d'outils associés, permettant à ces équipes distantes de travailler simultanément ou séquentiellement sur les mêmes contenus. La tenue des délais devient alors très délicate, car le moindre bug dans les outils ou les procédures peut paralyser une grande partie de la chaîne.

A ces équipes professionnelles s'ajoute en outre la participation de plus en plus fréquente des communautés qui se forment autour de ces projets, selon le nouveau modèle de production par crowdsourcing. Cette participation peut aller d'une simple prise en compte en temps réel des retours de la communauté à la création d'une œuvre entière par la communauté, comme le tente actuellement le studio Epic sur son jeu Unreal Tournament.

Enfin, la conception de contenus est confrontée à un mouvement contradictoire de l'industrie sur le sujet des normes. Sur la partie traditionnelle de l'industrie, elle obéit de plus en plus à des normes standardisées, tant en termes de format et d'encodage (avec par exemple la prédominance du MPEG4) qu'en termes de contenus en lui-même. Ainsi par exemple, les productions audiovisuelles françaises et notamment les séries s'uniformisent sur le modèle américain passant d'un format 90 min. à 52 min. et aujourd'hui tendent à diminuer à 40 min. Sur les nouveaux contenus numériques (livre numérique, réalité augmentée), c'est au contraire l'absence de standards qui complique parfois le développement des entreprises.

Audiovisuel

En raison des avantages fiscaux et autres *Tax Shelters* existant en Belgique, au Luxembourg ou au Canada, la production audiovisuelle française connaît un fort taux de délocalisation (60 %) ce qui est renforcé par l'internalisation des fonctions de postproduction par les agences. Le taux de délocalisation des tournages atteint 35 % au premier semestre 2012 selon la FICAM, dont 69 % pour les films à plus de 10 M€ de budget. Afin de remédier à cette fuite, le gouvernement a mis en place des aides via un crédit d'impôt pour dynamiser la production audiovisuelle et multimédia française et tenter de l'inciter à rester sur le sol français.

Jeux vidéo

Ces délocalisations vers le Canada concernent plus encore le secteur du jeu vidéo attiré par les mesures sociales et fiscales mises en place par le pays et qualifié par le SNJV de « dumping social et fiscal »[34]. Produire un jeu au Québec permet de réduire les coûts de production de plus de 40 % par rapport à une production française. La concentration de la production de jeux autour des pôles traditionnels (Asie, États-Unis, Canada) continue de se renforcer.

L'édition

Le principal défi dans le secteur de l'édition est relativement similaire avec des enjeux liés à la reconfiguration des chaînes de production pour s'adapter au numérique et ce d'autant plus que produire un livre enrichi est souvent plus coûteux alors que le marché n'est pas encore prêt à en payer le prix. Ainsi en 2013, dans une étude réalisée par le site Slate, un consommateur se disait prêt à ne payer guère plus de 7 euros pour la version numérique dont la version papier serait de 18 euros…..

34 – < http://www.culturecommunication.gouv.fr/Politiques-ministerielles/Industries-culturelles/Dossiers-thematiques/Le-jeu-video >, consulté le 20/03/2015

Les grandes tendances

TECHNOLOGIQUES

Les technologies liées aux TIC sont les plus prégnantes dans l'ensemble des secteurs traités. L'immersion et l'enrichissement numérique sont des tendances de plus en plus importantes que ce soit au sein des sites culturels ou dans la production audiovisuelle et multimédia. La réalité augmentée concerne aussi bien les secteurs des jeux vidéo, du tourisme ou encore de la muséographie. L'une des tendances majeures de la plupart de ces technologies consiste à proposer une nouvelle expérience utilisateur, et permettre à l'usager d'aller toujours plus loin dans un univers hyperréaliste.

La robotique de service s'invite elle aussi dans les secteurs des loisirs et de la culture. Pour l'instant de manière très ponctuelle, les robots se substituent aux guides et hôtesses. Cela suppose le développement des modes d'interaction homme-machine. Il peut intégrer des fonctions de reconnaissance faciale.

L'usage est au cœur des préoccupations et les apports technologiques sont fortement attendus au service de nouvelles expériences.

Tourisme et Patrimoine

Après la visite virtuelle, aujourd'hui les visites deviennent interactives avec par exemple la préparation numérique de la visite, la création de parcours adaptés aux visiteurs ou pour aller encore plus loin l'immersion à une autre époque, en un autre lieu. Cela passe pour l'instant au travers d'un écran de type tablette mais l'interface a vocation à s'effacer voire à disparaître grâce à des lunettes stéréoscopiques (Cluny propose à ses visiteurs une salle en immersion et lunette stéréoscopique pour reconstituer la grande église disparue), à la présence d'hologrammes, du 3D naturel ou encore par le biais de l'immersion sensorielle. La modélisation 3D permet également aux acteurs du patrimoine d'effectuer des travaux de restauration et de conservation.

Le *Big Data* et le *datamining* représentent aujourd'hui un fort potentiel pour le tourisme en terme d'analyse de marché : qui vient, pour combien de temps, que vont-ils voir, comment se déplacent-ils ? Permettant ainsi aux professionnels du tourisme d'anticiper les tendances du marché et d'adapter leur offre face à des affluences de fréquentation sur le modèle du *yield* et du revenu management utilisé dans les transports aérien et ferroviaire. L'usage du *Big Data* donne ainsi naissance à de nouveaux systèmes d'information décisionnels permettant d'optimiser l'offre en termes de prix, de quantité, d'accessibilité...

Jusque-là, les observatoires du tourisme utilisaient les traces physiques des touristes (fréquentation hôtelière, trafic autoroutier) et des panels de touristes dans le cadre d'enquêtes afin de recueillir les informations. Le recueil des traces numériques laissées par les touristes représente un potentiel important via le *tracking* c'est-à-dire le recueil des données de géolocalisation auprès des opérateurs de téléphonie mobile ou encore le suivi de publications de photographie des touristes sur les réseaux sociaux. Le système de *tracking* est également utilisé au sein de navires de croisière, permettant aux passagers de suivre leurs bagages.

L'enjeu majeur pour le secteur du tourisme réside dans l'adaptation de ces technologies et leur appropriation et intégration au sein des offres par l'ensemble des acteurs y compris de taille modeste, très nombreux dans le tourisme.

Concernant plus particulièrement les navires de croisière, ceux-ci développent des technologies spécifiques afin de réduire leur impact énergétique tout en améliorant leur performance : l'usage de nouveaux revêtements à base de silicium permettant de réduire la friction, le développement de nouveaux systèmes de propulsion au GNL (Gaz Naturel Liquéfié) ou d'équipements de récupération du carburant réutilisable leur permet de réduire leur consommation de carburant. Les navires nouvellement construits sont équipés de *scrubbers* (épurateurs de fumées) afin de réduire les émissions de polluants dans les fumées…

Le sport

Le sport utilise lui aussi les technologies du *Big Data* en lien avec l'exploitation des données issues des capteurs de plus en plus présents (analyse des données de santé, de performance, d'efficacité…). Le développement des technologies de capteurs est, dans ce secteur, lié au développement des textiles techniques et notamment des textiles intelligents intégrant les capteurs aux équipements ainsi que des outils de géolocalisation (équipements de sport d'hiver par exemple). La valorisation des données massives a un double impact sur le sport de haut niveau : cela permet d'analyser, adapter et améliorer les performances d'un joueur ou d'une équipe et

dans un second temps, cela modifie la perception du sport par les supporters de plus en plus connectés qui ont ainsi accès à davantage d'informations en temps réel. L'impact sur les pratiques des amateurs réside davantage dans leur lien avec le développement des objets connectés et des stratégies marketing associées pour suivre leurs performances et progressions (en effectuant des statistiques personnelles, le *quantifyed self*) que dans le fait de pratiquer en toute sécurité.

Les technologies liées aux textiles intelligents sont variées et passent également par la capacité de ceux-ci à générer, stocker et rediffuser l'énergie et la chaleur.

La production de contenu

Les enjeux liés à la mobilité et au multi-support sont très présents. La multiplication des services interactifs hybrides (via la norme HbbTV notamment) conduit à des modifications dans les modes de conception des contenus, ceux-ci devant s'adapter et être transposables entre le *online* et le *offline*, les divers écrans (écran secondaire sur tablette par exemple). Il est donc indispensable de lever les verrous technologiques qui brident encore l'interopérabilité et l'interactivité des contenus. Les formats hybrides, les outils de création procédurale, les outils de production et de diffusion de contenus immersifs par exemple constituent des éléments dont le développement conditionne le déploiement de la production de contenu. Les technologies de conception de contenu, les technologies immersives, l'analyse comportementale sont ainsi influencées les unes par les autres (cf. fiches correspondantes).

Le jeu vidéo

Le jeu vidéo utilise les technologies afin d'augmenter l'interactivité et le réalisme. La recherche de l'immersion est la tendance la plus présente. Il en découle le développement de multiples technologies liées à la réalité virtuelle, la réalité augmentée, la réalité mixte… Des briques technologiques participent de cette recherche de réalisme comme la capture faciale et celle des mouvements, la génération procédurale (de formes 3D, de textures, d'animation, etc.), la simulation du réel par les moteurs de jeu (simulation de lumière, de fluides, de comportements individuels ou de groupe, physiques, de tissus, etc.) et dans les studios virtuels, les technologies de retour haptique, de reconnaissance vocale… (cf. Fiche Technologies Immersives). Si le jeu vidéo cherche à immerger toujours plus le joueur, son développement passe également par la compréhension des comportements de jeu. Il s'appuie ainsi sur des procédés d'analyse prédictive ou d'intelligence artificielle : le jeu vidéo est un pionnier dans la valorisation et l'intelligence des données massives par le biais du *game analytics*.

INDUSTRIELLES

Du fait du périmètre étendu du secteur Loisirs et Culture, il est difficile d'établir une chaîne de valeur spécifique. Le domaine des loisirs et de la culture est avant tout constitué d'une offre de service et de production de contenu. Toutefois cette révolution numérique a généré plusieurs changements disruptifs: la dématérialisation des contenus et des supports, la délinéarisation de la chaîne de valeur, une mutation complète des usages et l'avènement progressif de la convergence numérique.

Tourisme et patrimoine

Par définition, production de service et consommation sont largement corrélés dans le secteur du tourisme. Cependant, l'offre de tourisme français doit faire face à la concurrence internationale. Le développement touristique au sein de nouvelles destinations en Europe centrale, dans les pays baltes ou encore en Chine détourne les flux touristiques de la France. Ces destinations disposent de services de plus en plus similaires et à moindre coût (pouvoir d'achat plus important pour les touristes étrangers et main d'œuvre bon marché). Cette tendance est renforcée par les facilités de circulation (en termes de transport mais aussi de visas).

La production de contenu

La localisation d'une production induit une « coloration culturelle » du contenu. La délocalisation de la production de contenu soulève deux enjeux majeurs : la souveraineté culturelle d'une part et d'autre part la nécessité d'adapter les procédés de production afin de prendre en compte la nécessaire adaptation du produit. Cette problématique économique majeure liée à la capacité à adapter le produit au lieu de consommation et à lui faire perdre sa coloration initiale implique une prise en compte dès la conception. Cela est particulièrement prégnant concernant les grosses productions de jeux vidéo avec par exemple l'adaptation du faciès du personnage ou des couleurs (la symbolique du blanc par exemple n'a pas du tout la

même signification en Europe et en Asie). Il est clair que sur les grosses productions, il existe cependant une répartition des tâches entre plusieurs prestataires souvent spécialisés (nettoyage des plans, animation de personnages, décors…). Cela contribue à une certaine automatisation de tâches et une réduction parfois du *time to market*. La tendance actuelle est donc double, la création de contenu tend à être de moins en moins marquée culturellement afin de plaire au plus grand nombre à l'export, et dans le même temps, les produits ne doivent pas devenir trop standardisés au risque de ne pas être appréciés.

La production collaborative est également une tendance qui vient modifier les modes de production grâce à des outils numériques de plus en plus adaptés et sécurisés (comme le cloud, les outils de stockage…). Le secteur de l'audiovisuel (vidéo comme musique) mais aussi celui du jeu vidéo voient également leur production se démocratiser de manière foisonnante grâce à des plateformes d'hébergement comme Youtube ou Dailymotion (comme en témoigne l'augmentation du nombre de chaînes sur Youtube).

L'audiovisuel

Les producteurs de contenus audiovisuels doivent faire face à la concentration des fournisseurs d'outils de production (ex : le quasi-monopole d'Adobe et d'Autodesk sur de nombreux segments comme l'imagerie 2D et 3D). Malgré la multiplication de divers concurrents, la Creative Cloud d'Adobe n'a pas encore été égalée et ce bien que son modèle économique basé sur l'abonnement soit critiqué, modèle qu'Autodesk adopte progressivement pour ses diverses applications. Il faut également tenir compte des aspects industriels de cette industrie avec notamment les plateaux de tournage, machinerie... qui peuvent induire des lieux de tournage multiples. Il faut aussi évoquer plusieurs outils déjà existants en production tels que les studios virtuels (beaucoup utilisés en télévision) ou encore les multiples possibilités d'insérer des acteurs virtuels ou avatars dans les contenus. Ces technologies continuent d'évoluer pour apporter un réalisme de qualité ou proposer des nouveaux types de contenus. La prévisualisation, qu'elle soit d'objets 3D ou non, fait l'objet de plusieurs dossiers de R&D en cours.

Le jeu vidéo

Le secteur du jeu vidéo bénéficie lui aussi d'une démocratisation des outils de production avec le développement de plateformes et de *frameworks* mettant à disposition des outils de développement comme Unity ou Allegorithmic. Cela permet à de petits studios de produire mieux, plus vite et à moindre coût. Cela se développe dans le même temps que la production collaborative. Ces deux tendances permettent à des acteurs de taille plus modeste d'être plus compétitifs sur la scène nationale par la mutualisation des compétences.

L'édition

Le livre numérique, s'il induit un surcoût de production pour les éditeurs classiques (liés à l'apport de valeur ajoutée, aux apports du transmedia… mais aussi du fait d'un changement et d'un équilibrage des coûts non encore répercutés), permet de faciliter les démarches des auteurs qui peuvent ainsi s'auto-éditer.

D'USAGE

Comme déjà évoqué, ce qui influence en premier lieu les secteurs des loisirs et de la culture est la connectivité galopante des populations. Cette tendance devrait se poursuivre (en lien avec l'augmentation du nombre d'objets connectés). Le déploiement des réseaux Internet et la libéralisation des réseaux de télécommunications ont multiplié les supports de distribution, de diffusion et d'accès aux contenus. Les médias d'audience se sont vus peu à peu concurrencés par des médias d'accès qui ont renversé les usages. Le public jusqu'alors passif est devenu actif, interactif, voire producteur, multipliant des pratiques pluri plateformes, nomades, ubiquitaires, communautaires (médias sociaux, blogs, forums, etc.). Le déploiement des réseaux Internet et la libéralisation des réseaux de télécommunications ont multiplié les supports de distribution, de diffusion et d'accès aux contenus. Les contenus étant devenus des data infiniment transférables et appropriables, certains consommateurs confondent droit d'usage et droits d'auteurs et agissent comme des passagers clandestins (piratage). On constate chez les utilisateurs une incompréhension de la chaîne de valeur et des droits. Les principaux phénomènes de consommation constatés sont :

- La consommation en mobilité sur différents terminaux et à tout moment
- Cet éclatement favorise la consommation simultanée de plusieurs contenus. Ainsi environ 80 % des personnes possédant un terminal mobile intelligent le consultent en regardant la télévision, dans 30 %

des cas pour consulter des informations en lien avec l'émission en cours sur le flux

- Le rôle de la prescription est majeur dans le succès d'une œuvre

- L'interaction (sociale ou avec le contenu) et la contribution: recommandation, notation, annotation. Une dérive induite par le « *user generated content* » et le non professionnalisme des créateurs/contributeurs serait une production de contenus de qualité inférieure et peu objective

Tourisme et Patrimoine

Selon l'OMT, les pratiques touristiques d'ici à 2020 devraient s'harmoniser entre pays et faiblement se modifier : on retrouvera toujours en premier lieu le tourisme balnéaire suivi du tourisme sportif d'hiver et d'été, du tourisme de découverte et d'aventure, le tourisme de nature… Il ne serait donc pas nécessaire de modifier l'offre actuelle mais de la réadapter aux attentes du public. De même, le grand enjeu pour les musées réside dans leur intégration à l'ère numérique. Le musée devient participatif ainsi que centre de ressource en ligne (via par exemple la numérisation des œuvres). Dans leurs pratiques, les acteurs des loisirs intègrent également cette connectivité en interne par la mise en place d'espaces de travaux collaboratifs (permettant par exemple les travaux simultanés au sein de différents musées).

La production de contenu

L'audiovisuel

Le secteur de l'audiovisuel est également concerné par la multiplication des supports : les productions à destination des flux classiques (télévision et radio) doivent s'adapter aux nouveaux modes de diffusion (ordinateur, tablette, téléphone) et aux pratiques délinéarisées (VOD, Replay, Streaming, Podcast…). Ces nouvelles pratiques introduisent une nouvelle concurrence pour les acteurs classiques (chaînes de radio, télévision) avec l'émergence des plateformes de VOD, la multiplication des chaînes Youtube… qui s'adaptent en conséquence en proposant une offre multi-plateforme ou encore des expériences télévisuelles interactives avec la possibilité d'interagir avec un programme en direct via une application tablette ou *smartphone*.

Le jeu vidéo

Le secteur du jeu vidéo connaît une modification de ses usages avec d'une part le déploiement des supports *smartphone* ou tablettes, faisant croître considérablement le nombre de joueurs. D'autre part, le développement du jeu en ligne modifie également les dynamiques de marché : 36 % des jeux (gratuits ou payants) sont désormais des jeux en ligne. À cela s'ajoute le développement d'un nouveau modèle économique lié aux nouveaux usages du consommateur: avec le *free-to-play* ou *freemium*, le consommateur souhaite de plus en plus essayer avant d'acheter voire ne souhaite plus payer pour le jeu. Il se déploie sur l'ensemble des supports : PC, Console, *smartphone* et tablette. Réservé à ses débuts aux petits acteurs et aux jeux pour *smartphone* (en moyenne, plus de 90 % des jeux du Top 20 de l'AppStore sont des *free-to-play*), des géants du jeu vidéo comme Blizzard ou Ubisoft développent dès à présent leurs nouveautés sur le modèle du *free-to-play*.

Qui plus est et en lien avec le vieillissement de la population des joueurs, les jeux s'adaptent à la diminution du temps à consacrer au jeu avec la naissance de session de jeu courte à la fois sur *smartphone* et tablette avec des jeux comme CandyCrush ou Hearthstone mais également sur PC avec Left4Dead ou League of Legend.

Ce dernier jeu est également l'une des stars des deux dernières tendances du secteur : l'E-sport et le streaming de jeux vidéo. Le jeu vidéo voit en effet se développer le nombre de tournois internationaux donnant lieu à des retransmissions sur les chaînes spécialisés. Le joueur devient en effet spectateur soit en suivant les compétitions, soit en visionnant des productions d'autres joueurs (pro-*gamers* ou non) diffusées sur des plateformes comme Youtube ou spécialisées comme Twitch (appartenant à Amazon) dont la finalité est tout à fait différente : faire découvrir ou découvrir un jeu en même temps que le spectateur.

De nouveaux usages des joueurs introduisent également des enjeux technologiques nouveaux : le retour au « *couch coop* », c'est-à-dire au jeu multi-joueurs sur un même écran (par rapport au jeu en réseau) implique pour les créateurs des jeux de permettre le split d'écran tout en conservant une qualité suffisante. D'autre part, les pratiques liées notamment aux jeux mobiles, ont poussé au développement des jeux multi-joueurs asynchrones ou des jeux en réalité alternée. Pour ce dernier, le *smartphone* permet de suivre le joueur grâce à la

géolocalisation notamment et de lui offrir des informations (via des QR codes par exemple) sur le monde qui l'entoure lui permettant de poursuivre le jeu.

La position de la France

INDUSTRIELLE

Le domaine des loisirs et de la culture est représenté en France par quelques grands leaders mondiaux implantés sur des secteurs bien définis (tourisme, sport, production audiovisuelle) ou des applications transversales (capteurs, photonique) :

Tourisme et Patrimoine

La France étant la première destination touristique mondiale, cela lui procure un atout considérable pour ses acteurs. La qualité de son hôtellerie et de ses installations est souvent mise en avant. Ainsi la France compte des géants du tourisme comme le groupe hôtelier Accor, premier opérateur européen et sixième mondial, présent dans 92 pays[35]. L'un des objectifs d'Accor pour conforter et améliorer sa place réside dans « l'accélération en matière de CRM[36], de fidélisation et de digitalisation ». L'usage du *Big Data* est donc une des clés de sa nouvelle feuille de route.

La Compagnie des Alpes est quant à elle un acteur majeur de la production de loisirs actifs en Europe. Elle compte 11 domaines skiables des Alpes (Les Arcs, Val d'Isère…) et 15 parcs de loisirs dont le parc Asterix, le Futuroscope, Walibi. Elle cumule un chiffre d'affaires de 678 millions d'euros en 2013 et une progression moyenne de 4,4 %.

Cependant, le secteur du tourisme reste constitué en majorité d'une myriade de petits et moyens acteurs, qu'ils s'agissent des hôteliers, des restaurateurs ou des offices de tourisme des communes de taille moyenne. La mutualisation devient un élément central pour leur permettre de gagner en compétitivité et en visibilité en passant notamment par des plateformes de réservation.

Le sport

La France occupe actuellement la quatrième place mondiale dans le secteur du sport. Basée sur les résultats des sportifs de haut niveau, cette place met en avant une activité importante mais aussi des infrastructures de haut niveau (stades, salles, stations de ski,…)

Concernant les fabricants d'articles de sport, Décathlon est leader dans son domaine. Le groupe réalise un chiffre d'affaires de 7,4 milliards d'euros en 2013 et connaît une croissance supérieure à 5 % chaque année depuis 2008. 58 % de son chiffre d'affaires est réalisé à l'international[37]. L'innovation est au cœur de la stratégie de Décathlon aussi bien sur le textile (thermique, régulation de chaleur, anti bactérien…) que sur l'équipement (allègement des matériaux). On trouvera également des acteurs spécialisés dans les équipements sportifs connectés comme Babolat pour les raquettes.

Du fait de sa situation géographique, la France possède avec les Alpes l'un des plus importants domaines skiables du monde. Cela a une incidence forte sur les acteurs industriels avec des sociétés leaders dans leur domaine comme POMA (infrastructures, télécabines,…), Salomon, Rossignol ou encore TechnoAlpin, leader mondial de la neige artificielle.

Hykob est spécialisé dans les capteurs et ce pour différentes applications dont les systèmes inertiels et de positionnement (permettant par exemple le suivi des performances sportives, l'orientation et cap d'objets mobiles), l'amélioration de la production médiatique et notamment sportive (acquisition de données très précises en temps réel). C'est un des projets de Hykob avec le groupe ASO et le Tour de France mais leur activité majeure touche aux capteurs urbains.

Enfin, plusieurs clusters existent, contribuant ainsi à fédérer des acteurs autour de la R & D, du développement international (Outdoor Sport Valley, Sporaltec, Eurosima ou encore Sport et Bien être/Euralens)

La production de contenu

Que ce soit dans le cinéma, la production audiovisuelle, l'animation ou encore le jeu vidéo, la France est considérée comme l'une des nations leaders au niveau mondial. Cette position est due à plusieurs atouts indéniables que de nombreuses nations nous envient :

- la créativité et la fameuse French Touch
- la qualité de nos écoles de formation (graphisme, ingénieurs, informatique)

35 – < www.accor.com >, consutlé le 25/06/2025

36 – Customer Relationship Management

37 – < http://corporate.decathlon.com/> , consulté le 25/06/2015

- un tissu industriel de qualité
- un environnement favorable et sensible à la création

La vision de nos professionnels tout comme leur niveau de formation sont ainsi considérés comme des atouts et nos ingénieurs et créatifs sont ainsi « chassés » dès les remises de diplômes par les grands acteurs américains et canadiens. Mais tous ne répondent pas aux sirènes nord-américaines.

La chaîne de valeur des contenus numériques est complexe, mettant en œuvre des aspects technologiques et industrielles à tous les niveaux : création, conception (outils et méthodologie), production, format et encodage, diffusion et désormais monétisation. La France est présente sur l'ensemble avec des acteurs de taille souvent hétéroclites.

Parmi les acteurs industriels majeurs, Technicolor est une entreprise spécialisée dans la conception et la fabrication de systèmes de vidéo et d'image numériques. Elle travaille principalement sur les technologies immersives et de réalité augmentée. L'entreprise cherche également, afin de conforter son dynamisme récent, à renforcer et étendre la couverture géographique du groupe afin de réaliser des gains d'échelle ou d'avoir accès à un écosystème plus large. Après plusieurs années délicates, c'est aujourd'hui un des leaders mondiaux de la création de contenus et des effets spéciaux pour l'audiovisuel en général (cinéma et télévision).

Concernant la réalité virtuelle, Homido et Archos sont bien positionnés bien qu'ils ne soient pas leaders sur le marché des casques de réalité virtuelle. Infiniteye, start-up française devenue Starbreeze Paris en juin 2015 après son rachat par les studios suédois Starbreeze AB, dispose d'un projet qui pourrait le porter sur le devant de la scène : bien qu'il ne soit qu'au stade de prototype contrairement aux autres technologies, son casque dispose d'un champ de vision bien plus large que ses concurrents. Light and Shadows se positionne également sur le marché de la réalité virtuelle et des technologies immersives : s'il se positionne davantage sur le secteur du B2B et à destination des industriels (automobiles, aéronautiques…), sa technologie peut être appliquée au secteur des loisirs et de la culture.

Contrairement à la réalité virtuelle, la réalité augmentée est un marché plus segmenté, composé de multiples briques technologiques et ne faisant pas émerger de leader pour le secteur des loisirs et de la culture. Des acteurs d'autres secteurs comme Total Immersion, pionnier dans son domaine, Diotasoft, Artefacto, Optinvent, Laster ou quelques start-up comme AugmenteDev tirent leur épingle du jeu et contribuent au développement de la technologie

dans le secteur des loisirs et de la culture (cf. Fiche Technologie Immersive). Ils travaillent à la fois pour le BtoB (avec par exemple des applications d'aide à l'aménagement de point de vente, d'espace de tourisme) et le BtoC (application smartphone et ordinateur pour la vente, lunettes de réalité augmentée à destination du grand public). Chacun développe de nouvelles technologies de réalité augmentée en lien avec la géolocalisation, les applications médicales ou le marketing digital… (cf. Technologies Immersives).

Audiovisuel

Concernant les studios de production, la France compte quelques leaders européens disposant d'une visibilité de plus en plus internationale comme Mac Guff pour la production d'effets visuels numériques et notamment le 3D Relief ou Solidanim, Team TO et GeBeKa sur l'animation. La France dispose d'une place de leader sur la scène cinématographique internationale et est notamment le 2ème pays exportateur pour ce qui concerne l'animation. En termes de compétences techniques, Thales Angénieux est un fabricant mondialement reconnu d'optiques de précision offrant les meilleurs objectifs pour la production cinématographique ou télévisuelle (et dans une moindre mesure pour le secteur de la sécurité), la société travaille également sur les capteurs 3D. 70 % de son chiffre d'affaires est réalisé à l'étranger. Au niveau des prestataires techniques, il faut mentionner le rôle majeur du groupe Euromédia au niveau européen, leader de la prestation de services audiovisuels (car régies, liaisons HF, studios de tournage,…)

Ces contenus étant de plus en plus complexes et lourds en termes d'images 3D notamment, les outils d'encodage sont au cœur de la diffusion. 2 acteurs français se sont fait une place significative sur ce créneau. Envivio a ainsi développé depuis près de quinze ans une compétence forte autour du MPEG4 alors que tous les acteurs concurrents se préoccupaient encore du MPEG2. ATEME, initialement prestataire de service autour des matériels électroniques, s'est concentré depuis plusieurs années aussi sur le MPEG4, qui sera la norme internationale haute définition en 2016.

En ce qui concerne la diffusion, force est de constater que les grands acteurs globaux internationaux (Google, Apple, Amazon et Facebook) occupent une place prépondérante sur les marchés. Pour ces derniers, les contenus sont avant tout, comme les données personnelles de leurs utilisateurs, un « carburant ». Ces acteurs globaux ont pour point commun de tirer leurs revenus et leurs profits de l'exploitation d'un réseau d'activités investissant chaque segment de valeur et se renforçant mutuellement : vente d'espaces publicitaires, exploitation des données personnelles, vente de terminaux, *cloud computing*, etc. La distribution / diffusion de contenus, notamment culturels, n'est qu'une «brique» parmi d'autres, au milieu des bouquets de services (moteur de recherche, messagerie, réseau social, stockage et partage de documents, etc.) que ces «plateformes» offrent aux internautes. Sans grands égards pour les auteurs, les artistes et les intermédiaires de la chaîne de création, les plateformes cherchent à limiter au maximum le coût du carburant que constituent pour elles les contenus. Ainsi, l'un des principaux enjeux de l'exception culturelle à l'heure du numérique est de promouvoir le développement d'un tissu de services culturels numériques puissants et indépendants, qui ne puissent devenir de simples produits d'appel pour des plateformes globales.

Le secteur français de l'audiovisuel dispose d'acteurs de premier ordre parmi les diffuseurs avec par exemple la plateforme de streaming Deezer ou le service d'hébergement, de partage et de visionnage de vidéo en ligne Dailymotion. Ce dernier appartient aujourd'hui à la multinationale française Vivendi, deuxième groupe de divertissement mondial qui regroupe Canal+, Universal Music Group. Dans une moindre mesure mais connaissant un taux de croissance élevé, Qobuz est une plateforme de streaming française proposant des titres dans des formats permettant d'éviter la perte (FLAC, Apple Lossless...). Les acteurs français en particulier du secteur de la musique restent cependant très en retard concernant les technologies liées au format. Des Think Tank comme Nouveaux programmes ont vu le jour, ce dernier a mis en place quant à lui une mutualisation de l'accès aux données stratégiques (marchés, concurrences…) afin de permettre aux TPE et PME françaises du secteur de l'audiovisuel et plus particulièrement travaillant sur les formats d'être compétitives sur la scène internationale. On peut également citer le Forum Blanc (tous les ans en janvier au Grand Bornand) qui se veut un Think Tank autour des nouveaux contenus, organisé en collaboration active avec Imaginove et le

Fonds des Médias du Canada (FMC), l'équivalent du CNC pour le Canada.

En ce qui concerne les plateformes de VOD, le marché de la VàD reste relativement concurrentiel : on dénombre, en février 2013, 75 éditeurs de services de VàD actifs en France (hors hébergeurs, télévision de rattrapage et plateformes spécialisées dans les films pour adultes).

En 2012, sept plateformes touchent plus de 10 % des consommateurs de VàD payante. Le marché est dominé par les offres des FAI et des chaînes traditionnelles, qui occupent 5 des 6 premières places en termes d'audience (FAI : la VoD d'Orange, Club Video de SFR ; chaînes de télévision : CanalPlay, MyTF1Vod, Pass M6). C'est lié au poids de la TV sur IP, qui représente 77 % des transactions payantes et 69 % du marché. L'offre d'Apple (iTunes Store) fait toutefois une percée sensible (17 % des consommateurs de VàD payante déclarent avoir utilisé cette plateforme en 2012). L'essor de la télévision connectée pourrait amplifier ce phénomène et menacer les positions des FAI et des chaînes de télévision. L'arrivée en France du service de VàD par abonnement Netflix n'a pas bouleversé l'équilibre du marché français comme annoncé[38]. Si les chiffres sur le nombre d'abonnés français restent flous, ils sont estimés entre 500 000[39] et 750 000[40] quand CanalPlay était à 600 000 au printemps 2015. La médiatisation de Netflix a de plus servi ses concurrents en donnant plus de visibilité à la VoD. Cependant, la taille internationale de ce dernier lui permet de négocier plus facilement les catalogues et donc d'étoffer son offre, d'autant qu'il dispose également de productions exclusives, y compris françaises, ce qui n'est pas le cas de CanalPlay. L'évolution tant du catalogue que technologique (avec le passage à l'ultra HD) de Netflix laisse à penser qu'il pourrait prendre de nouvelles parts de marché dans les années à venir pouvant aller jusqu'à 2 millions d'abonnés d'ici à 2019[41].

Jeux vidéo

Dans le domaine des jeux vidéo, le champion français est Ubisoft. Il s'agit du troisième éditeur indépendant de jeux vidéo dans le monde, qui développe de nombreux jeux en interne. Avec des best-sellers comme Assassin's Creed, Just Dance, ou encore Rayman, il réalise un chiffre d'affaires supérieur à un milliard d'euros[42]. La société se développe aujourd'hui sur iOS et Androïd au travers du modèle *free-to-play* avec le lancement de *CSI – Hidden Crime* (développé dans les studios d'Abu Dabi). Les 29 studios d'Ubisoft sont implantés en France (Montpellier, Annecy, Montreuil), en Chine (Shanghai) et depuis peu à Abu Dhabi, cette dernière localisation doit permettre à Ubisoft d'étendre son marché sur la zone Moyen-Orient. Le plus important studio se trouve à Montréal et – outre le développement des jeux – est centré sur les opérations en ligne, la sécurité en ligne, la capture de mouvement. Quantic Dream est quant à lui un studio reconnu pour sa technologie de capture de mouvement. Tout comme Arkane Studio, ces développeurs ont créé des triples A qui font leur renommée (*Heavy Rain* pour le premier, *Dishonored* pour le second). Il est cependant difficile de les situer sur la scène mondiale dans la mesure où leurs éditeurs sont étrangers. Les recettes des jeux sont donc imputées à ces éditeurs. Ainsi par exemple, Eugen System, studio indépendant, a développé les jeux PC Ruse ou Wargame, édité par Ubisoft pour le premier et Focus Home Interactive pour le premier volet de Wargame (European Escalation).

Ce dernier est le premier éditeur français et se place sur la seconde marche du podium mondial avec des succès tel que Farming Simulator, les différents Sherlock Holmes ou encore le Tour de France. On peut également citer Just for Game et Big Ben dans le top 20 des éditeurs mondiaux de jeux pour consoles et PC[43]. A ces acteurs du jeu vidéo, s'ajoutent ceux centrés uniquement sur le jeu pour plateforme mobile ou réseaux sociaux tel que Kobojo (Pyramid Valley, Mutants Genetic Gladiators), Pretty simple (Criminal Case, Magical Ride, My Shops), Oh Bibi (Motor World: Car Factory), Royal Cactus (Sleepy Wings), Scimob (94 seconds, 94 Degrees, 94 percent, Word Academy)…

L'édition

Le paysage français de l'édition est principalement constitué d'une multitude de petites et moyennes maisons d'édition disposant chacune d'une ligne

38 – Rapport Lescure

39 – Cabinet IHS

40 – Future Source Consulting

41 – Cabinet IHS

42 – < www.ubisoftgroup.com >, consulté le 25/06/2015

43 – SELL – L'essentiel du jeu vidéo 2015

éditoriale propre afin de se différentier face à la concurrence, y compris du livre numérique.

Le groupe Hachette est le principal éditeur de la scène française avec plus de 150 marques d'édition en littérature, éducation, dictionnaire, encyclopédies… et un chiffre d'affaires en 2012 de plus de 2 milliards d'euros. Il réalise 35 % de son chiffre d'affaires en France, 22 % au Royaume-Uni et autant aux États-Unis[44]. Sa troisième place sur la scène internationale (5e en tenant compte de l'édition professionnelle) s'appuie essentiellement sur les rachats d'éditeurs étrangers comme Hodder Headline au Royaume-Uni ou Time Warner Book aux États-Unis. Viennent ensuite des acteurs centrés principalement sur le marché français comme Éditis (600M€ de CA) qui, bien que devenu espagnole, regroupe les acteurs majeurs de la scène française Robert Nathan, Laffont ou encore Plon, le groupe Gallimard-Flammarion (421M€) dont les deux entités se positionnent en 48e et 46e position mondiale[45] ou Média Participation (388M€).

Le secteur de l'édition numérique compte également un grand nombre de petits et moyens acteurs. Ce foisonnement induit un renouvellement important des acteurs que ce soit au sein des distributeurs (librairies en ligne comme Feedbooks, Epagine, Actialuna, Izneo) de taille modeste comparée aux géants comme Amazone ou Itunes, des fournisseurs de technologies ou de terminaux (Beingenious ou encore Bookeen et son Cybook qui tente de rivaliser face au Kobo canadien ou au Kindle américain).

ACADÉMIQUE

Le CEA-List (Intelligence Ambiante –Systèmes Interactifs) par exemple, travaille sur la 3D et ses applications en réalité augmentée, sur l'analyse vidéo, sur la linguistique et l'analyse sémantique multilingue de documents pour des applications d'indexation, de veille… Ces applications ne sont pas directement liées aux univers de la production multimédia ou des jeux vidéo mais peuvent y trouver de nombreuses applications. Il en va de même pour le GIPSA-Lab (Grenoble Image Parole Signal Automatique) qui s'intéresse aux systèmes linguistiques et machines parlantes, aux enjeux liés à l'interface Machine-Cerveau.

Tourisme et Patrimoine

L'Institut de Recherche et d'Études Supérieures du Tourisme, rattaché à l'Université Paris I – Sorbonne, se concentre sur l'analyse des différentes thématiques en liens avec le tourisme et structure l'Équipe Interdisciplinaire de Recherche sur le Tourisme (EIREST). Cette dernière travaille sur les enjeux liés au patrimoine culturel, à l'image et l'imaginaire et aux enjeux de la métropolisation et de l'influence sur le tourisme. A cela s'ajoute un axe transversal de recherche : « Méthodes : Enquêter, Mesurer, Évaluer (M.E.M.E.) ».

La Fondation des Sciences du Patrimoine assure la gouvernance du LabEx PATRIMA qui regroupe plus de 200 chercheurs issus de laboratoire de l'Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, de l'Université de Cergy-Pontoise, du CNRS, du CEA, ainsi que de grandes institutions patrimoniales comme le Louvre, le Musée du Quai Branly, le musée de Port Royal… Ce LabEx vise à rassembler sciences de l'homme et sciences exactes autour des enjeux de l'ensemble de la chaîne des savoirs et savoir-faire liée au patrimoine, de la restauration, numérisation à la médiation du patrimoine.

Le sport

Dans le secteur du sport, la recherche se concentre principalement sur les usages et pratiques ou encore sur le lien entre santé et sport comme à Rennes 2 au sein du laboratoire Mouvement, Sport Santé (M2S). Ce dernier étudie les mécanismes et effets du sport, mais travaille également à l'amélioration du rapport bénéfices sur risques de la pratique physique. Le Centre de recherche et d'innovation sur le sport (CRIS), rattaché à l'Université Claude Bernard de Lyon 1, dispose d'un axe de recherche sur la « Performance Motrice, Mentale et du Matériel » (P3M).

Venant faciliter l'innovation, la collaboration entre les structures de recherche et les entreprises et entre les entreprises elles-mêmes, plusieurs clusters viennent animer les réseaux de l'industrie du sport de montagne avec le cluster montagne et Outdoor Sports Valley ou de glisse avec EuroSIMA Cluster

44 – < http://www.hachette.com/fr/presentation/chiffres-cles>, consulté le 23/06/2015

45 – < http://www.publishersweekly.com/pw/by-topic/industry-news/financial-reporting/article/58211-the-global-60-the-world-s-largest-book-publishers-2013.html >, consulté le 23/06/2015

La production de contenu

Le LabEx ICCA (Industrie culturelles et création artistique. Numérique et Internet) est un « laboratoire d'idées au cœur des industries culturelles, de la connaissance et de la création artistique[46] ». Il regroupe les problématiques liées aux industries culturelles (presse, radiotélévision, musique enregistrée, édition, cinéma, audiovisuel, nouveaux médias, jeu vidéo, etc.) et industries connexes (industries éducatives, ingénierie documentaire, data mining, etc.) ainsi qu'à la création artistique. Il a pour objectif de définir de nouveaux modèles économiques, de régulation, analyser la transformation juridique et l'essor de nouveaux usages ou marchés. Il se concentre donc sur les questions liées par exemple au format et au support (taille et multiplicité des écrans pour les différentes productions multimédia). Le LabEx a également vocation à tisser un lien entre les recherches qui y sont menées, les usages présents ou émergents qui peuvent en être faits au travers par exemple de la pédagogie numérique. Les membres du LabEx spécifiquement concentrés sur les industries créatives ou les technologies s'y rattachant sont :

- Le LABSIC (Laboratoire des sciences de l'information et de la communication), rattaché à l'université Paris Nord, dispose d'une thématique sur les « Industries culturelles, éducatives et créatives : reconfiguration des secteurs et logiques émergents ». Il s'agit « d'étudier d'où vient (et ce qui fait) la cohérence de chaque filière, ce qui en justifie l'appartenance à l'ensemble des industries culturelles, mais aussi ce qui, dans cet ensemble, laisse subsister d'importants clivages et conflits, et détermine, à l'occasion de la grande remise en question liée aux mutations numériques, les stratégies de multi-médiatisation et de multi-valorisation des grandes firmes du secteur.[47]»
- L'Institut de recherche sur le cinéma et l'audiovisuel (IRCAV) qui aborde les problématiques économiques et sociologiques du cinéma et de l'audiovisuel.
- Le CEISME (Centre d'Étude sur les Images et les Sons Médiatiques) qui étudie les genres, les programmes (télévisés, cinématographiques, radio et web), leur réception et leur histoire.

De même que dans le secteur du sport, divers clusters viennent structurer la filière de la production de contenu en facilitant la mise en place de synergie. On trouve ainsi des pôles de compétitivité comme Cap-Digital, Imaginove ou encore Images & Réseaux mais également des clusters de taille plus restreinte sur des secteurs plus ciblés comme CapitalGames sur le jeu vidéo, Pictanovo sur l'image ou PRIMI sur le transmedia.

46 – < http://www.univ-paris3.fr/labex-icca-industries-culturelles-et-creation-artistique-numerique-et-internet-121888.kjsp >, consulté le 02/02/2015

47 – < http://labsic.univ-paris13.fr/index.php/labsic/les-thematiques-du-labsic >, consulté le 02/02/2015

Analyse AFOM

ATOUTS

Quelques acteurs français parmi les leaders mondiaux

Une qualité de la formation reconnue à l'international

Soutien des pouvoirs publics à l'industrie cinéma et audiovisuelle qui lui permet d'être conquérante

Plusieurs acteurs de référence allient développement de briques technologiques et production de contenu

Créativité (French Touch)

FAIBLESSES

Nombreuses PME - Secteur fragmenté

Barrière linguistique et culturelle qui complique l'accès aux plus gros marchés mondiaux

Déficit de compétitivité par rapport aux pays émergents et aux pays ayant des politiques d'incitation fiscale agressives

Règlementation lourde et instable (dont droit d'auteur)

OPPORTUNITÉS

Marchés en croissance (jeux vidéo, tourisme, musées, sport)

Croissance du marché dans les pays émergents

Emergence de nouveaux segments de marché (contenus immersifs)

MENACES

Risque de délocalisation de la production lié aux coûts de production

Risque de délocalisation de la production lié aux incitations fiscales de certains pays

Manque de fonds propres

Nouvelles destinations touristiques

SOURCES

CapDigital, 2014, *Cahier de Tendances, Marchés & Leviers*

CNC, 2011, *Les pratiques de consommation de jeux vidéo des Français*

Deloitte, 2014, *Les tendances du tourisme et de l'hôtellerie 2014*

EY, 2013, *1er panorama des industries culturelles et créatives – Au cœur du rayonnement et de la compétitivité de la France*

Institut G9+, 2014, *Livre Blanc « 2020 : Où vont les industries françaises du numérique »*

Lepers J-F ; Portugal J-N, CNC, 2013, *Avenir à 10 ans des industries techniques du cinéma et de l'audiovisuel en France, Une vision prospective*

Ministère des Sports, de la jeunesse, de l'éducation populaire et de la vie associative, 2013, *Les Chiffres Clés du Sport*

PIPAME, 2011, *Prospective du m-tourisme*

Rapport Lescure, 2013, *Mission « Acte II de l'exception culturelle » - Contribution aux politiques culturelles à l'ère numérique*

Rapport Reda, 2015

Revue Espace Tourisme et Loisirs, n° 316 – janvier 2014, *Partage non marchand et tourisme - Big data, traces numériques et observation du tourisme*

Revue Espace Tourisme et Loisirs, n°318 – Mai 2014, *Qualité, classement et avis de consommateurs - Le renouveau des musées*

Revue Espace Tourisme et Loisirs, n°314 – Septembre 2013, *Réalité augmentée & patrimoine - Handicap et loisirs de nature*

SELL, 2014, *L'Essentiel du jeu vidéo*

SNJV, 2014, *Baromètre annuel du jeu vidéo en France*

VICERIAT P., ORIGET DU CLUZEAU C., Conseil National du Tourisme, 2009, *Le tourisme des années 2020*

Xerfi, 2014, *Le marché des croisières maritimes*

Xerfi, 2014*, La distribution de livres face aux enjeux du numérique - Prévisions et perspectives à l'horizon 2017, paysage concurrentiel et mutations de l'offre*

GLOSSAIRE

CLIA : Cruise Lines International Association, association internationale des compagnies de croisières

CNC : Centre national du Cinéma et de l'image animée

DROM-COM : Départements et Régions d'Outre-Mer et Collectivités d'Outre-Mer

F2P : Free-to-play – Jeu en ligne dont une partie ou son intégralité est jouable gratuitement

FICAM : Fédération des Industries du Cinéma, de l'Audiovisuel et du Cinéma

IREST : Institut de Recherche et d'Etudes Supérieures du Tourisme

NFC : Near Field Communication – littéralement communication en champ proche, technologie de communication sans-fil à courte portée et haute fréquence

PEGI : Pan European Game Information

SELL : Syndicat des éditeurs de logiciels de loisirs

SNJV : Syndicat National du Jeu Vidéo

VOD ou VàD : Video-On-Demand ou Vidéo à la demande

TECHNOLOGIES CLÉS

1 Matériaux avancés et actifs

LOISIRS & CULTURE
ÉNERGIE, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
ENVIRONNEMENT, HABITAT, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Matériaux avancés, matériaux fonctionnels, matériaux actifs, composites, nanomatériaux

© Beneteau - Patrick Tableau – Maud Tronquez – Rémi Laval-Jeantet

Définition et périmètre

Les matériaux avancés désignent les matériaux fonctionnels, les matériaux à haute performance, les matériaux à haute valeur ajoutée, etc. Ils constituent une famille large de matériaux qui concernent de nombreux domaines d'application. Ils répondent à des besoins de hautes performances telles qu'une forte résistance mécanique, thermique ou à la corrosion par exemple.

Les matériaux actifs désignent les matériaux intelligents agissant directement sur leur environnement en ayant par exemple des propriétés antibactériennes, antistatiques, dépolluantes, autonettoyantes ou présentant des propriétés de conversion d'une énergie en une autre (matériaux pyroélectriques, piézoélectriques…).

Ces matériaux, qui sont opposés aux matériaux de commodité, ont en commun de posséder des fonctionnalités supplémentaires par rapport à la fonction première qu'ils apportent. Ils permettent ainsi d'améliorer les propriétés globales du système dans lequel ils sont intégrés comme par exemple la durabilité, l'efficacité, l'innocuité.

Pour bénéficier d'un référentiel exploitable, on se basera sur le marché des matériaux à haute valeur ajoutée, tel que défini par Oxford Research pour la Commission Européenne[1]. Les matériaux inclus dans cette catégorie ont les particularités suivantes :

- nécessitent des connaissances poussées pour être développés et produits (« knowledge intensiveness ») ;
- possèdent des propriétés nouvelles, supérieures, surmesure pour des applications structurales ou fonctionnelles ;
- ont le potentiel de contribuer à donner des avantages compétitifs sur le marché ;
- ont le potentiel d'adresser les grands challenges sociétaux définis, dans le programme Horizon 2020, par la Commission européenne dans le cadre de la stratégie Europe 2020[2].

Oxford Research indique que les matériaux concernés couvrent les familles classiques de matériaux (polymères, matériaux métalliques, céramiques) et les nouvelles catégories de matériaux (matériaux composites, semi-conducteurs).

Oxford Research cite également la classification proposée par Moskowitz[3] qui précise davantage les matériaux concernés :

- matériaux de bioingénierie ;
- alliages avancés ;
- céramiques avancées ;
- polymères techniques ;
- polymères organiques pour l'électronique (OPE) ;
- autres matériaux pour l'électronique ;
- revêtements avancés ;
- nanopoudres ;
- nanocarbones ;
- nanofibres ;
- couches minces ;
- composites avancés.

Quelques exemples sont donnés ci-dessous afin d'illustrer les types de matériaux concernés.

- Alimentation : emballages actifs (perméabilité/imperméabilité à l'eau, à l'oxygène, à l'éthylène par exemple) ;
- Habitat : verre électrochrome, matériaux dépolluants, textiles lumineux, matériaux à changement de phase pour l'isolation, surfaces photovoltaïques intégrées ;
- Santé : matériaux à libération contrôlée (thérapeutique, diagnostic), vecteurs thérapeutiques, dispositifs médicaux implantables ;
- Sécurité : exosquelette pour la défense en fibres de carbone et alliages de titane ;
- Mobilité : composites pour l'allègement des pièces ;
- Loisirs & culture : textiles intelligents (pour jeux immersifs par exemple).

1 – Oxford research, 2012 : *Technology and market perspectives for future value added materials*

2 – Exemples de grands challenges européens : santé, changements démographiques, bien-être ; sécurité alimentaire et bioéconomie ; énergie propre et efficace et à approvisionnement sécurisé

3 – Moskowitz, S.L., 2009 : *Advanced Materials Revolution Technology and Economic Growth in the Age of Globalization*, John Wiley & Sons

Le sujet est donc très vaste. Cette fiche retrace les principaux matériaux par nature et par application, sans que les matériaux ou les débouchés n'aient toujours de relations entre eux.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les matériaux sont à la base de tous les secteurs. Les rendre performants et les concevoir de manière à répondre de plus en plus spécifiquement à plusieurs besoins précis (au lieu d'un seul classiquement) augmente leur valeur ajoutée et contribue à leur déploiement ainsi qu'au développement des secteurs applicatifs.

Par exemple, les matériaux avancés sont utilisés pour les bétons bas carbone (dérivés de magnésium au lieu du calcium), pour les dispositifs médicaux implantables (films de fibroïnes, les protéines majoritaires de la soie), pour les pièces automobiles (composites polypropylène/fibre de verre).

Ainsi, il est clé de se positionner sur ce marché en forte croissance qui touche tous les secteurs d'activité à tous les niveaux des chaînes de valeur. Les matériaux à haute valeur ajoutée sont clés tant en termes de marchés propres qu'à travers leurs utilisations dans les applications qu'ils servent.

La technologie clé « modélisation, simulation et ingénierie numérique » (4) influence fortement les matériaux avancés car ces technologies permettent de prédire le comportement des matériaux sans passer par des tests laboratoire et offrent ainsi un gain de temps et d'argent.

Les capteurs (2) et les matériaux avancés s'influencent mutuellement dans le sens où de nouveaux besoins de performances sur les capteurs peuvent générer de nouveaux besoins en matériaux et inversement de nouveaux matériaux peuvent mener à de nouveaux marchés pour les capteurs.

La fabrication additive (9) est influencée par la nécessité de maîtriser finement les matériaux mis en œuvre, qu'ils soient métalliques, céramiques ou plastiques.

Les marchés

La dénomination « Matériaux avancés et actifs » étant sujette à interprétation, il est possible de trouver différents chiffres pour ce marché du fait de périmètres différents. Dans tous les cas, il est à noter que ce marché couvre une multitude de matériaux avec des propriétés bien spécifiques pour chaque application et représente donc la somme d'une multitude de segments de marché.

Liens avec d'autres technologies clés

Les matériaux avancés influencent :	Domaines d'application	Les matériaux avancés sont influencés par :
/	Alimentation	/
/	Habitat	/
Capteurs (2) Microfluidique (17)	Santé	Capteurs (2) Fabrication additive (9) Cobotique et humain augmenté (10)
Capteurs (2)	Sécurité	Modélisation, simulation et ingénierie numérique (4)
Fabrication additive (9)	Mobilité	Modélisation, simulation et ingénierie numérique (4)
Capteurs (2) Fabrication additive (9)	Loisirs & culture	Capteurs (2) Fabrication additive (9)

Le marché total des matériaux à haute valeur ajoutée est estimé par Oxford Research à 150 Md € en 2015 et 186,1 Md € en 2020. Les secteurs applicatifs principaux sont[4] :

- l'environnement (les technologies d'efficacité énergétique pour la protection de l'environnement en représentent 40 %) avec 38,2 Md € en 2015 et 48 Md € en 2020 ;
- les TIC avec 38,8 Md€ en 2015 et 46,6 Md€ en 2020.

4 – Oxford research, 2012 : *Technology and market perspectives for future value added materials*

D'ici à 2020, les secteurs à plus forte croissances devraient être l'énergie et les secteurs transverses. Au contraire, la santé et les TIC devraient être les secteurs les moins dynamiques (tout comme entre 2008 et 2015).

Taille du marché des matériaux à haute valeur ajoutée (Md €)	2008	2015	2020	2030	2050
Énergie	7,1	14,3	18,9	37,0	175,7
Transport	9,6	13,1	15,8	24,3	52,6
Environnement	24,6	38,2	48,0	86,8	352,2
Santé	27,0	32,1	37,4	55,0	115,2
TIC	29,6	38,8	46,6	70,7	152,2
Autres / transversales	3,6	13,5	19,3	42,2	250,8
Valeur totale estimée	**101,7**	**150,0**	**186,1**	**316,0**	**1098,6**

Figure 1 : Marché des matériaux à haute valeur ajoutée par secteur applicatif[6]

Figure 2 : Marché des composites par secteur client en France en 2012[5]

Le marché mondial des composites était de 7,3 Md $ en 2012 et est estimé à 10,9 Md $ en 2018, soit une croissance annuelle (CAGR) de 7 % sur cette période[7].

Le marché français des composites en 2012 est de 2 Md € soit 300 000 t de composites commercialisés.

Les marchés applicatifs en France en 2012 étaient principalement les transports et le bâtiment[8].

Le marché des nanomatériaux était estimé à 1,7 Md $ en 2010 et projeté à 5,8 Md $ en 2016 soit une croissance annuelle de 23 %[9]. Des craintes sur les conséquences sanitaires des nanomatériaux peuvent freiner cette expansion, en particulier en Europe, sans qu'il

5 – Oxford research, 2012 : *Technology and market perspectives for future value added materials*

6 – Fédération de la plasturgie et des composites, 2014 : *Panorama 2014*, d'après des données JEC

7 – Lucintel, 2013 : *Growth Opportunities in Global Composites Industry 2013-2018*

8 – Fédération de la plasturgie et des composites, 2014 : *Panorama 2014*, d'après des données JEC

9 – Lucintel, 2011 : *Global nanomaterial opportunity in energy and emerging trends*

n'émerge de réglementation spécifique. En France, la déclaration est toutefois obligatoire. Il est donc raisonnable de penser que le secteur verra encore une croissance d'ici 2020, pour un marché de l'ordre d'une dizaine de milliards de dollars.

Les défis technologiques à relever

Défis par grandes familles de matériaux

Verres et céramiques

L'industrie des verres et celle des céramiques proposent des matériaux avancés pour de nombreuses applications. L'industrie est fortement guidée par les impacts environnementaux, pour les marchés cibles d'une part, mais aussi pour leurs propres procédés, fortement consommateurs d'énergie et d'eau. Les développements des technologies de fours en particulier permettront de répondre à ces défis.

Les grands défis de ces deux secteurs sont aussi liés à l'augmentation de la durabilité des matériaux, afin de diminuer l'impact environnemental de la production sur l'ensemble de la durée de vie du produit. Le développement des techniques de recyclage est une attente majeure pour diminuer cet impact environnemental, avec par exemple des techniques de mise en forme basées sur la compaction de poudres.

Le développement de capteurs ou de matériaux actifs intégrés dans les céramiques forment les « céramiques intelligentes » capables de détecter la présence d'occupants et de mettre en place un éclairage ou un chauffage en conséquence.

Enfin, au niveau mondial, le secteur de l'énergie tire le développement de nouveaux verres (et de leurs revêtements) et de nouvelles céramiques techniques aussi bien pour l'énergie solaire (photovoltaïque, thermique) que pour l'éolien. Les céramiques sont aussi particulièrement exploitées pour les applications en santé.

Composites

Les composites sont notamment clés pour l'automobile, l'aéronautique et l'énergie éolienne. Ils répondent bien au besoin d'allègement des pièces et allient également de bonnes propriétés mécaniques. Les enjeux pour ces matériaux sont les suivants :

- augmentation de la durabilité et de la recyclabilité ;
  - L'augmentation de la durée de vie passe par la tenue dans le temps des matériaux mais aussi par la mise au point de matériaux réparables.
  - L'introduction des composites s'est largement faite en substitution de matériaux métalliques, qui ont vu aussi de leur côté leurs performances croître. Mais toutes les caractéristiques des matériaux ne peuvent être substituées. La durabilité et la recyclabilité des composites en sont des exemples frappants.
  - En termes de recyclabilité et de réduction de l'empreinte carbone, l'introduction et le déploiement des fibres végétales dans ces matériaux représentent une tendance forte. Pour le moment, malgré les premiers succès d'intégration, ces fibres restent marginalement utilisées car elles posent des problèmes de fabrication, de durée de vie (faible résistance à l'humidité en général) et d'émission d'odeurs caractéristiques non acceptables (par exemple pour des véhicules particuliers).
- augmentation de la cadence de production ;
  - ce n'est pas un sujet nouveau concernant les composites. Les développements en cours portent essentiellement sur le développement de CND (Contrôle Non Destructif) adaptés à de fortes cadences, telles qu'on peut en trouver dans l'automobile.

Matériaux métalliques

Le développement de nouveaux matériaux est principalement destiné aux marchés suivants : aéronautique, production d'énergie (matériaux constitutifs des turbines), stockage de l'hydrogène, construction navale, médical.

Il s'agit par exemple de superalliages et d'intermétalliques. Les superalliages sont des alliages qui ont une excellente résistance mécanique et une bonne résistance au fluage à haute température (typiquement 0,7 à 0,8 fois sa température de fusion). Les intermétalliques se distinguent des alliages classiques par leur microstructure.

L'un des enjeux liés aux alliages à haute performance est l'amélioration des performances spécifiques rapportées à la densité dans une optique d'allègement des structures, très présente dans l'aéronautique[10].

10 – Pipame, 2015 : *Mutations économiques du secteur de l'industrie des métaux non ferreux – R&D et innovation*

De plus, la reproductibilité des propriétés des alliages est un fort enjeu pour garantir la fiabilité des pièces. Pour cela, le contrôle de la microstructure est essentiel. Cela se traduit donc par le choix d'un procédé d'élaboration adéquat et pour lequel les mécanismes qui entrent en jeu sont bien compris[11].

Nanomatériaux et matériaux nanostructurés

Les nanomatériaux ont connu ces dernières années de nombreux développements. Toutefois, les plus grandes avancées ont été réalisées au niveau de la recherche fondamentale. Au niveau industriel, le principal enjeu pour le développement des nanomatériaux est de créer de nouveaux procédés de production intégrés dans une chaîne de valeur des nanomatériaux[12].

Les enjeux court terme des nanotechnologies consistent à consolider les modèles de prédiction des propriétés des nanomatériaux, leurs procédés de production et leur intégration aux chaînes de production existantes.

En termes de fabrication, la priorité est de contrôler les propriétés des nanomatériaux lors de la fabrication et de développer des techniques bas coût pour les manipuler à l'échelle nanométrique et ainsi les intégrer comme constituants de systèmes nanoassemblés.

Modélisation

Une grande tendance est générale aux différents types de matériaux : la modélisation. Deux objectifs principaux sont visés dans le but d'accélérer le processus de développement des nouveaux matériaux :

- modélisation du comportement macroscopique à partir de propriétés microscopiques pour pouvoir prédire le comportement du matériau en fonctionnement ;
- modélisation et validation expérimentale pour prédire le comportement du matériau en fin de vie.

Pour cela, deux défis principaux existent :

- la gestion de données toujours plus nombreuses : les mesures expérimentales actuelles sont plus précises et davantage de paramètres sont mesurés. Il faut de ce fait adapter les modèles mathématiques. De plus, il faudra gérer et diffuser les bibliothèques de données contenant une grande quantité d'informations sur les différents matériaux ;
- l'optimisation de la modélisation et de la conception : un nouveau concept de logiciel a récemment été développé, PIDO (Process Integration and Multi-Objectives Design Optimization). Ce type de logiciel permet la formalisation et la gestion de flux à traiter en un procédé flexible et dynamique.

Outre la problématique de modélisation, les matériaux avancés et actifs regroupent des familles de matériaux bien distinctes avec des enjeux souvent très spécifiques du matériau considéré et/ou de l'application. Ainsi, les défis technologiques sont présentés ci-dessous par grande famille de matériaux.

Défis par applications

Matériaux pour les capteurs

L'un des enjeux majeurs dans le domaine des capteurs est la capacité à recevoir et émettre d'importants flux de données tout en consommant le moins d'énergie possible et en garantissant la fiabilité des données.

© Nawatechnologies

L'intégration des capteurs sur les plateformes CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) sera un grand défi pour les années à venir[13]. Cela inclura notamment le développement de capteurs basés sur des matériaux différents du silicium (comme les métaux semi-conducteurs des groupes III et V ou des matériaux plastiques) qui offrent de nouvelles fonctionnalités ou des coûts réduits.

De plus, de nouveaux capteurs basés sur des nanofils ou des nanotubes de carbone doivent être investigués en raison de leur potentiel pour améliorer la sensibilité des capteurs.

11 – Pipame, 2015 : *Mutations économiques du secteur de l'industrie des métaux non ferreux – R&D et innovation*

12 – EuMat, 2012 : *Strategic research agenda*

13 – Oxford research, 2012 : *Technology and market perspectives for future value added materials*

Par ailleurs, les progrès réalisés dans la synthèse de certains matériaux actifs (céramiques ou monocristaux piézoélectriques) permettent des avancées importantes dans le secteur des sonars, du CND[14], des radars et de la récupération d'énergie ou des capteurs autonomes. Le domaine de l'optronique mobilise aussi de nombreux matériaux, aussi bien de l'électronique, que des céramiques ou des verres.

Matériaux pour la santé

Concernant les dispositifs médicaux de type prothèse ou implant, les enjeux matériaux s'articulent autour de trois thèmes[15] :

- durabilité ;
- fonctionnalisation ;
- production.

La longévité des dispositifs et la restauration partielle des fonctions des tissus ou des organes sont clés. Notamment, afin d'améliorer la durée, la compréhension des cinétiques de (bio)résorption et l'étude de la toxicité des produits de dégradation permettra d'avancer sur cet aspect.

La maîtrise des propriétés de surface à l'échelle nanométrique (mouillabilité, adhésion des cellules, distribution des charges, (an)isotropie) est clé afin de garantir une meilleure intégration du dispositif dans le corps.

En termes de production, la reproductibilité des propriétés d'un lot à l'autre et la maîtrise des coûts de production (notamment à travers l'approvisionnement en biomatériaux à des coûts compétitifs) permettront d'améliorer la phase de production de ces dispositifs.

Pour les systèmes de libération contrôlée des médicaments, un système de biomatériaux capables de délivrer un médicament spécifiquement dans un tissu ou une cellule est requis. Une large littérature est aujourd'hui disponible montrant une libération contrôlée du principe actif à l'endroit souhaité. Il manque néanmoins de données relatives à leurs performances in vivo pour passer aux étapes de recherches cliniques[16].

14 – CND : Contrôle non destructif

15 – EuMat, 2012 : *Strategic research agenda*

16 – EuMat, 2012 : *Strategic research agenda*

Matériaux pour l'électronique organique

Les applications de l'électronique organique se développent fortement. Les applications couvrent le textile, le packaging, jusqu'à l'automobile ou le médical.

Ce secteur recourt à des matériaux qui ont des propriétés conductrices, semi-conductrices, luminescentes, électrochromiques ou électrophorétiques. Les technologies portent aussi bien sur la sélection des matériaux (organiques purs ou nanoparticules métalliques) que sur la maîtrise des procédés, et notamment des technologies de dépôt et de revêtement.

Matériaux pour l'énergie

Pour le photovoltaïque, des matériaux avec de meilleures propriétés optiques et de plus hautes températures de travail sont nécessaires.

Les éoliennes off-shore et les systèmes de récupération de l'énergie marine sont construits pour résister dans des environnements très contraints où les réparations coûteuses représentent un véritable défi. En ce sens, les matériaux auto-réparant représentent un véritable enjeu pour la filière. De plus, l'augmentation de la puissance délivrée par ces systèmes nécessite des pâles plus grandes ayant un poids réduit pour fonctionner efficacement. Le développement de matériaux plus résistants à la fatigue (plastiques renforcés en fibres de verre et de carbone, incluant des nanoparticules) et de nouvelles architectures de matériaux et de procédés comme les constructions en sandwich sont clés ainsi que des solutions de tribologie durable.

Le stockage de l'hydrogène pourrait être un nouveau débouché pour les intermétalliques. Notamment Mg_2Ni s'avère être un bon candidat. Pour ces matériaux, un compromis entre capacité de stockage de l'hydrogène par le matériau, cinétique de sorption et température d'utilisation est nécessaire[17].

Enfin, l'utilisation de terres rares pour réaliser des aimants permanents est aussi un sujet d'actualité (voir la fiche correspondante).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les différents défis commerciaux sont liés de manière générale pour tous ces matériaux :

- À la protection des nouveaux matériaux par la propriété intellectuelle ;
- Au financement des PME ;
- Au passage à l'échelle industrielle.

Les matériaux à haute valeur ajoutée étant définis par leur forte intensité de connaissance mobilisée pour leur développement et par leur potentiel de création d'un avantage compétitif, il est clé de protéger ces atouts grâce à la propriété intellectuelle.

Les matériaux avancés sont des domaines pour lesquels les développements représentent généralement des risques élevés et des besoins capitalistiques forts. Dans ce contexte, les PME ont des difficultés particulières à tirer leur épingle du jeu car elles ne sont pas suivies par leurs financeurs sur ce type de projet.

Pour la même raison, la phase d'industrialisation est critique et peine à se concrétiser dans certains cas.

Les enjeux réglementaires

De manière générale, il n'y a pas de contrainte réglementaire générique sur les matériaux. Leur intégration s'appuie sur le cadre des différents marchés applicatifs le cas échéant.

Un obstacle au développement des nanomatériaux en Europe est la crainte de l'impact sur les utilisateurs finaux, notamment pour les produits en contact fréquent avec la peau. Les nanomatériaux sont aujourd'hui considérés avec méfiance par les consommateurs et les industriels mais ne font pas l'objet de restriction particulière pour le moment. Notamment, le règlement européen REACH régulant les produits chimiques sur le territoire ne fait pour le moment pas la distinction sur la forme physique des substances chimiques mais uniquement sur la composition chimique.

Analyse AFOM

ATOUTS

Présence d'acteurs des matériaux et de donneurs d'ordre qui sont des leaders internationaux

Fortes compétences sur les thématiques composites et nanomatériaux

FAIBLESSES

Accès limité des PME aux matériaux avancés en cours de développement

OPPORTUNITÉS

Nombreux secteurs en croissance

Stratégie de différenciation par l'innovation soutenue par les pouvoirs publics

MENACES

Forte concurrence à l'international

17 – Pipame, 2015 : *Mutations économiques du secteur de l'industrie des métaux non ferreux – R&D et innovation*

Facteurs clés de succès et recommandations

Le time-to-market des matériaux à haute valeur ajoutée est long en général (de l'ordre de 20 ans pour l'automobile et l'aéronautique par exemple). Ainsi, pour l'horizon 2020, les pouvoirs publics devront encourager les projets de développements applicatifs à partir des matériaux déjà développés en laboratoire. Étant donné les difficultés à introduire un nouveau matériau, il est crucial de soutenir les projets vraiment différenciants sur le marché. Les développements de matériaux ne devront donc être entrepris que dans l'optique d'avantages forts par rapport à l'existant. Typiquement, le secteur considère comme intéressant des gains de 30 % sur le coût ou sur les performances[18].

Un soutien spécifique aux PME pourra être apporté dans le but de les accompagner davantage dans les phases de développement et d'industrialisation.

Acteurs clés

Les secteurs d'application sont transverses, et on compte en France de nombreux industriels et académiques actifs dans le domaine. On dispose en France de bonnes compétences en R&D industrielle et académique, et on compte généralement des acteurs tout le long de la chaîne de valeur, des grands donneurs d'ordre aux PME sous-traitantes. Une particularité du secteur est son dynamisme lié à la présence de nombreuses startups des matériaux avancés.

Industriels impliqués dans les composites : Yanara Technologies (producteur spécialiste des composites), Lineo (filiale de la coopérative agricole Cap Seine), Faurecia (fournisseur automobile), Plastic Omnium (fournisseur automobile), Baudet (fabricant d'articlés sanitaires), Bénéteau (fabricant nautisme), Hexcel (fibres), Toray (fibres), Stratiforme (fournisseur pour le ferroviaire), Airbus (donneur d'ordres aéronautique)

Industriels impliqués dans les matériaux métalliques : Eramet (fournisseur de matières premières), Safran (fournisseur aéronautique), Airbus (donneur d'ordres aéronautique)

Industriels positionnés sur des applications en santé : Carmat (fabricant de cœurs artificiels), Tornier (fabricant de prothèses orthopédiques), Adocia (spécialiste du drug delivery), Ademtech, Noraker (fabricant de dispositifs médicaux implantables)

Industriels producteurs de nanomatériaux : Mathym (solutions innovantes à base de colloïdes), McPhy (stockage d'hydrogène sous forme solide), Nanoceram (fabrication et mise en œuvre de céramique nanostructurées), Nawa-Technologies (fabricant de matériaux et produits basés sur des nanostructures organisées), Neollia (production et développement de nanomatériaux), 3D-Oxides (films minces contenant des oxydes multiéléments)

Autres industriels des matériaux : Saint-Gobain (verre, céramique, matériaux avancés), Arkema (chimiste, producteur de résines), Poly-Ink (fournisseur d'encres contenant des nanoparticules), Affinisep (polymère à empreinte moléculaire), Lixol (producteur de résines alkydes), Arjowiggins (papier et électronique organique), Piezotech (électronique organique)

Centres de recherche et centres techniques : École des Mines de Douai, École Centrale Nantes, PEP, Onera, LMA (Laboratoire des Matériaux avancés, Université de Lyon, CNRS), MACS (Matériaux Avancés pour la Catalyse et la Santé, ICG Montpellier), CTIF (Centre Technique Industriel Fonderie), IFTH (Institut Français du Textile et de l'Habillement), INSERM, LCTS (Laboratoire des Composites Thermostructuraux, Bordeaux), SPCTS (Science des Procédés Céramiques et Traitements de Surface, Limoges), CEA LITEN (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les nanomatériaux, Grenoble), CTP (Centre Technique du Papier, Grenoble)

Instituts Carnot : Cetim, Cirimat, Chimie Balard, Mica

Pôle de compétitivité : Aerospace Valley, EMC2, Matéralia, Matikem, Plastipolis, Pôle européen de la céramique, Techtera, UP-Tex, Axelera, Pôle des Microtechniques, Pole Européen de la Céramique

IRT : Jules Verne, M2P, Railenium, AESE (Aéronautique, Espace, Systèmes Embarqués)

18 – Oxford research, 2012 : *Technology and market perspectives for future value added materials*

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

2 Capteurs

LOISIRS & CULTURE
ÉNERGIE, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
ENVIRONNEMENT, HABITAT, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Capteurs, détection, contrôle, mesures en ligne, biocapteurs, photonique

© European Union DEVILLERS Arnaud

Définition et périmètre

Un capteur est un système analytique intégré transformant une grandeur en un signal. Il permet la détection, la transmission et l'analyse de l'information recherchée. La figure 1 représente le schéma générique d'un capteur.

Figure 1 : Schéma du principe de fonctionnement d'un capteur[1]

Il existe différents types de capteurs suivant le paramètre ou phénomène qu'ils détectent : oxygène, turbidité, mouvement, température, pression, chute, fuite, etc. On parle respectivement de capteur physique, chimique ou biologique lorsque la grandeur détectée par le capteur est physique (température par exemple), chimique (molécule ou type de molécule par exemple) ou biologique (enzyme, anticorps par exemple).

Un biocapteur est un capteur pour lequel l'élément de détection est une molécule biologique. Il est à noter qu'en ce sens, les capteurs d'empreinte digitale par exemple ne sont pas des biocapteurs et les traceurs d'activité (comptage de pas, évaluation des phases de sommeil…) n'en sont pas systématiquement.

À titre d'exemples, trois familles technologiques largement représentées dans les capteurs sont les MEMS (Micro-Electro-Mechanical System), les capteurs d'image dont les CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), la spectroscopie optique (capteur photonique).

Étant donnée leur flexibilité de conception, les capteurs sont utilisés dans tous les domaines d'application comme le montrent les exemples suivants qui ne représentent qu'une petite partie des utilisations :

- Alimentation : capteurs dans les champs ou embarqués (contrôles climatologiques, agronomiques…), capteurs pour évaluer la présence d'allergènes dans les aliments, nez électronique, contrôle de procédés industriels (qualité, sécurité) ;
- Environnement : biocapteurs, prévision des besoins de production en eau, traitement de l'eau, surveillance de fuites, activité sismique, tri des déchets, surveillance de la pollution ;
- Habitat : pilotage au quotidien des performances des bâtiments, comptage intelligent, maintenance prédictive, éclairage ;
- Santé : recherche médicale, traceurs d'activité, contrôle de paramètres physiologiques (glycémie par exemple), contrôle de procédés industriels (qualité, sécurité) ;
- Sécurité : détection de risques biologiques, détection d'intrusion, défense ;
- Énergie : contrôle de procédé, surveillance d'équipements ;
- Mobilité : détection de composants toxiques dans l'habitacle, diagnostic embarqué d'infrastructures, aide à la conduite/pilotage et conduite/pilotage automatique, maintenance prédictive, sécurité au volant ;
- Communications numériques : robotique autonome, téléphones portables ;
- Loisirs & culture : jeux immersifs.

1 – Association for sensor technology, 2014 ; *Sensor trends 2014* (traduction Erdyn)

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

L'amélioration des performances des capteurs est constante et s'effectue en parallèle d'une réduction des coûts de ces systèmes. Les capteurs contribuent de plus en plus à la mise en œuvre de systèmes d'informations complexes et automatiques et leur utilisation est devenue incontournable dans de nombreux domaines.

Par exemple, dans l'environnement, les capteurs sont utilisés pour la gestion de l'eau, la gestion de l'énergie, l'analyse de polluants chimiques et microbiologiques (eau, air, sol). En santé, les traceurs d'activité, l'autocontrôle de la glycémie chez le patient diabétique, les cardiofréquencemètres et sondes pour la biologie sont autant de capteurs différents. Dans l'industrie, les capteurs sont également très utilisés en contrôle de procédé.

Ainsi il est clé de se positionner sur ce marché en forte croissance qui touche tous les secteurs d'activité à tous les niveaux des chaînes de valeur. Les capteurs sont clés tant en termes de marchés propres qu'à travers leurs utilisations dans les applications qu'ils servent.

Liens avec d'autres technologies clés

Les capteurs influencent :	Domaines d'application	Les capteurs sont influencés par :
Intelligence artificielle (11) Internet des objets (5) Valorisation et intelligence des données massives (3)	Alimentation	Modélisation, simulation et ingénierie numérique (4)
Gestion intelligente de l'eau (35) Intelligence artificielle (11) Internet des objets (5) Robotique autonome (12) Technologies de diagnostic rapide (eau, air et sol) (36) Valorisation et intelligence des données massives (3)	Environnement	Métaomique (18)
/	Habitat	Communications sécurisées (13)
Internet des objets (5)	Santé	/
Cobotique et humain augmenté (10) Internet des objets (5) Valorisation et intelligence des données massives (3)	Sécurité	/
Technologies pour l'énergie nucléaire (44)	Énergie	/
Cobotique et humain augmenté (10) Internet des objets (5) Robotique autonome (12) Technologies pour la propulsion (45)	Mobilité	/
Analyse comportementale (19) Cobotique et humain augmenté (10) Internet des objets (5) Modélisation, simulation et ingénierie numérique (4) Nanoélectronique (46) Nouvelle intégration matériel-logiciel (20)	Communications numériques	Analyse comportementale (19) Communications sécurisées (13) Infrastructure de 5e génération (6) Internet des objets (5) Modélisation, simulation et ingénierie numérique (4) Technologies immersives (14) Valorisation et intelligence des données massives (48)
Infrastructure de 5e génération (6) Internet des objets (5) Valorisation et intelligence des données massives (3)	Loisirs & culture	Infrastructure de 5e génération (16) Internet des objets (20) Valorisation et intelligence des données massives (3)

Les marchés

Le marché mondial des capteurs a été évalué à 79,5 Md $ en 2013 et est estimé à 154,4 Md $ en 2020 avec une croissance annuelle de 10,1 % sur la période 2015-2020[2].

Le marché des biocapteurs se développe à la même vitesse que celui des capteurs. En 2013, les biocapteurs représentaient un marché de 11,4 Md $. Ce marché devrait atteindre 22,68 Md $ en 2020 avec une croissance annuelle de 10 % entre 2014 et 2020[3]. Les principaux marchés des biocapteurs sont le médical, l'environnement, la sécurité et l'agroalimentaire.

Le segment des réseaux de capteurs sans fil est un nouveau segment qui connaîtra un fort développement dans les années à venir. Ce marché était de 0,45 Md $ en 2012 et totalisera 1,8 Md $ en 2024 d'après les prévisions[4]. Ce nouveau type de capteurs répartis investit un grand nombre de champs d'applications.

Les marchés des capteurs est multi-applicatif, certains marchés d'intérêt sont spécifiquement analysés et quantifiés. Quelques exemples sont cités ci-dessous.

Marché	Valeur actuelle	Valeur à 5 ans	CAGR sur la période
Automobile[4]	22,1 Md $ en 2015	35,2 Md $ en 2020	9,7 %
Environnement[5]	13,2 Md $ en 2014	17,6 Md $ en 2019	5,9 %
Agroalimentaire[6]	2,9 Md $ en 2012	4,2 Mds $ en 2018	6,4 %

Les défis technologiques à relever

Les défis technologiques actuels ont principalement deux objectifs :

- améliorer les performances des réseaux de capteurs ;
- améliorer les performances des biocapteurs ;
- développer les capteurs complexes.

Les capteurs en réseau doivent notamment être durables et fiables tout en limitant au maximum l'intervention humaine lors de leur fonctionnement et en limitant leurs coûts.

L'autonomie énergétique des capteurs est un enjeu clé pour atteindre le critère de durabilité. Notamment, cela passe par la réduction de la consommation énergétique en fonctionnement (protocoles de communication économique en énergie {Lora de Sigfox ou protocole propriétaire de Qowisio par exemple}, amélioration de la connectique électrique…), optimiser la récupération d'énergie (soleil, température, vibrations…) et améliorer la durée de vie des systèmes de stockage de l'énergie.

La fiabilité des capteurs doit notamment être améliorée pour les réseaux sans fil afin de limiter l'impact des interférences et de la propagation par trajets multiples. En ce sens, le choix du mode de communication et des modalités de communication devra être adapté à l'environnement du capteur afin de garantir des niveaux de fiabilité importants.

De plus, le coût des capteurs étant un verrou clé, l'objectif est d'améliorer les performances globales du réseau en exploitant au maximum les informations données par tous les capteurs et en recoupant les informations entre les différents capteurs, notamment des capteurs bas coût à performance individuelle limitée.

Figure 2 : Illustration du fonctionnement d'un réseau de capteurs

2 – BCC research, 2014 : *Global markets and technologies for sensors*

3 – MarketsandMarkets, 2015 ; *Biosensors market by application, product, technology & geography – Analysis and forecast to 2020*

4 – IDTechEx, 2014 : *Wireless sensor networks (WSN) 2014-2024: forecast, technologies, players*

5 – BCC research 2014 : *Global markets for automotive sensor technologies*

6 – BCC research 2014 : *Environmental sensing and monitoring technologies: global markets*

7 – Frost & Sullivan, 2013 : *Sensors market in the global food and beverage industry*

Pour les biocapteurs, de nouveaux systèmes de détection sont régulièrement en cours de développement afin d'améliorer la sélectivité des capteurs et d'augmenter le nombre et le type de molécules détectées.

Concernant les biocapteurs et de manière plus générale les capteurs à destination de la santé et de l'environnement, la miniaturisation continue d'être un enjeu fort afin d'obtenir des capteurs plus faciles à intégrer aussi bien pour un patient que pour les mesures sur site en environnement et sécurité. Les technologies NEMS (Nano Electro Mechanical Systems) doivent aider à passer les barrières de la miniaturisation. Ce ne sont pas les seules technologies cependant, comme le montre le développement de SWIFTS par Resolution Spectra Systems, un spectromètre haute résolution et ultra compact. De plus, les technologies de microfluidiques et nanofluidiques contribuent également à rendre possible la miniaturisation des capteurs reposant sur la circulation de fluides.

Enfin, l'intégration des capteurs dans les produits finaux est clé pour leur adoption par les marchés applicatifs. Cette problématique n'est pas nouvelle mais reste actuelle car elle survient quelle que soit l'application concernée. En ce sens, des disciplines comme la mécatronique (intégration de l'électronique dans des pièces mécaniques) et la plastronique (intégration de l'électronique dans des pièces plastiques) doivent être favorisées afin d'adresser la problématique d'intégration en amont.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le marché des capteurs est mature du point de vue commercial. C'est un marché international, structuré et pour lequel les modèles économiques sont connus (à l'exception des modèles d'exploitation des données récoltées par les capteurs).

Les avancées technologiques notamment en lien avec la sélectivité des capteurs, le traitement du signal, l'autonomie énergétique et la miniaturisation des capteurs ont permis d'accroître considérablement leurs domaines d'application. L'un des plus grands freins actuels à leur généralisation est la réduction des coûts des capteurs performants afin de pouvoir introduire ces capteurs dans des marchés de masse comme l'automobile ou les produits de grande consommation.

De plus, outre le coût du capteur en lui-même, son intégration peut également être coûteuse. Une meilleure exploitation des données récoltées par les capteurs représente également une voie de réduction des coûts d'utilisation des capteurs (voir paragraphe défis technologiques). Il faut donc raisonner dans une logique de mesure à bas coût et pas seulement dans une logique de capteurs à bas coût.

La standardisation des langages de communication est clé pour le développement commercial des capteurs. En effet, si trop de langages qui ne communiquent pas entre eux existent, cela réduit la flexibilité des utilisateurs et ainsi ralentit le déploiement d'une technologie. Ce processus est actuellement en cours au niveau international et permettra le déploiement du marché.

Enfin, les capteurs dans les domaines de la sécurité de fonctionnement des systèmes, demandant des garanties de fonctionnement, doivent répondre à des processus de validation longs et coûteux qu'il est indispensable de prendre en compte dans leur déploiement commercial (par exemple, intégration de nouveaux capteurs dans les avions commerciaux).

© THALES Quentin Reytinas

Les enjeux réglementaires

Il n'y a pas de contrainte réglementaire générique sur les capteurs. Leur intégration s'appuie sur le cadre des différents marchés applicatifs le cas échéant.

En revanche, la réglementation peut être moteur dans le déploiement commercial des capteurs notamment

sur les domaines de contrôle des effluents, contrôle de la qualité de l'air, de l'eau et des sols et amélioration des performances énergétiques.

Il y a également un fort enjeu pour les acteurs européens que l'Europe se dote d'une réglementation commune dans le but de déployer plus facilement les technologies en disposant d'un marché plus vaste. En effet, une telle harmonisation – qui se fait sur les marchés d'application – donnerait aux entreprises européennes un accès facilité à l'ensemble du territoire européen et renforcerait leur taille critique par rapport aux acteurs américains ou asiatiques.

Analyse AFOM

ATOUTS

Capacités d'innovation fortes au sein des centres de R&D

Présence de donneurs d'ordre qui sont des leaders internationaux

FAIBLESSES

Difficulté de transfert des innovations vers les PME

OPPORTUNITÉS

Utilisation de la réglementation comme accélérateur du développement

Fortes tendances mondiales à mesurer, contrôler les phénomènes pour mieux les optimiser

Forts besoins dans les pays en développement pour le contrôle de l'énergie et de l'eau

MENACES

Forte concurrence à l'international

Facteurs clés de succès et recommandations

Le développement de nouveaux capteurs nécessitent de mener des projets de recherche afin d'adapter des technologies à des usages spécifiques et des niveaux de performances requis. Ainsi, le financement de projets de recherche dans le domaine permettra d'assurer un développement de ces technologies sur le long terme et dans des domaines d'application toujours plus variés. Une partie de ces projets devra préférentiellement porter sur la conception du capteur, l'analyse de ses performances et son intégration dans les systèmes finaux afin de favoriser leur valorisation sur le marché.

La standardisation est une étape clé dans tout développement industriel. Il est nécessaire que les acteurs français participent à l'élaboration des standards des langages de communication afin de promouvoir les systèmes français et ainsi faciliter l'accès à l'export.

Acteurs clés

Industriels fabricants des capteurs ou des technologies pour les capteurs : ST Microelectronics (nombreux domaines d'application), Oceasoft (agroalimentaire, santé), Global Sensing Technologies (nombreux domaines d'application), Parrot (mobilité, sécurité), Fly-n-Sense (environnement), T-Waves Technologies (nombreux domaines d'application), Bodysens (santé, sécurité), Tronics Microsystems (nombreux domaines d'application), Sigfox (nombreux domaines d'application), Confluens (habitat), Whitings (santé), Sofradir (sécurité, défense), Safran (sécurité), Sysnav (nombreux domaines d'application), Qowisio, Resolution Spectra Systems (nombreux domaines d'application), Spectralys (agroalimentaire), Pellenc ST (gestion des déchets), Force A (mesures agricoles), Leosphere (météorologie), Environnement SA (environnement), Indatech (capteurs photoniques), Effilux (éclairage), Sites (capteurs MEMS pour l'habitat).

Exemples d'industriels produisant des produits contenant des capteurs : Valéo (mobilité), Airbus (mobilité), Electricfil (EFI) (mobilité), IER (groupe Bolloré, mobilité), Suez (environnement), Veolia (environnement), Schneider Electric (nombreux domaines d'application), Somfy (habitat), Legrand (habitat), Areva (énergie), EDF (énergie), Saint-Gobain (habitat), Bouygues (habitat)

Laboratoires de recherche et centres techniques : IEMN (Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies), FEMTO ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies), LNIO (Laboratoire de Nanotechnologie et d'Instrumentation Optique, UTT), LASMEA (Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Électronique, et d'Automatique), Inserm

Instituts Carnot : CEA List, CEA Leti, Ifpen TE, Énergies du Futur, M.I.N.E.S., Ifremer, Inria, Irstea, BRGM, LAAS CNRS

Pôle de compétitivité : Vitagora, pôle risques, SCS (Solutions Communicantes et Sécurisées), Medicen, Optitec, Minalogic, TES (Transactions Électroniques sécurisées), Dream

Clusters/Réseaux : i-Care, Optics Valley

Association : Jessica France (porteuse du programme Cap'Tronic), Actia (Réseau français des instituts techniques de l'agroalimentaire)

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

3 Valorisation et intelligence des données massives

LOISIRS & CULTURE
ÉNERGIE, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
ENVIRONNEMENT, HABITAT, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Données massives, Big data, mégadonnées, analyse, stockage, données personnelles, prédiction, cloud computing, cybersécurité, capteurs, visualisation.

© Fotolia

Définition et périmètre

Définition

E-mails, réseaux sociaux, *smartphones* et objets connectés, capteurs et autres satellites génèrent un flot croissant d'informations hétérogènes et non-structurées. La valorisation et l'intelligence des données massives ou *Big Data* ou « mégadonnées »[1] désignent à la fois cette croissance exponentielle du volume des données disponibles sous forme numérique et la famille d'outils (technologies et algorithmes) permettant de les trier et les analyser en temps réel. De façon communément admise, le *Big Data* est défini par les 5V[2].

1. Volume : le *Big Data* fait référence en premier lieu au volume massif de données à traiter, augmentant à un rythme exponentiel. Il est en effet estimé que 90 % des données récoltées depuis le début de l'humanité ont été générées durant les deux dernières années[3] ;

2. Vélocité : la vélocité fait référence à la vitesse à laquelle l'information est créée, circule et est analysée. Notre tendance à dupliquer l'information sur plusieurs supports, à la partager sur différents objets ou l'effet viral des réseaux sociaux amplifient la vitesse de circulation des données. Par ailleurs, les outils du *Big Data* (ex : logiciels d'analyse) permettent de réaliser des études sur ces données en quelques heures, quelques minutes, voire en temps réel contre plusieurs jours auparavant ;

3. Variété : la variété fait référence à l'hétérogénéité des sources (capteurs, archives, réseaux sociaux, documents, applications mobiles, etc.) ainsi qu'à la diversité de formats des données, des informations classiques structurées dans une base jusqu'à des données non-structurées telles que le texte, l'email, la photo, la vidéo, et les métadonnées etc. Le *Big Data* permet de réunir toutes ces données et de les analyser ;

4. Véracité : l'un des enjeux du *Big Data* est d'améliorer la fiabilité des masses de données non-structurées, en améliorant la gestion du bruit et de la consistance, en organisant son accès et en y associant les algorithmes d'analyse correspondant aux besoins des utilisateurs ;

5. Valeur : caractéristique clé du *Big Data*, le volume massif de données n'a d'importance que s'il permet de générer du sens et donc de la valeur pour ces données. Le défi principal est donc d'identifier ce que les outils de valorisation des données massives peuvent apporter.

Les technologies associées à la valorisation et l'intelligence des données massives sont nombreuses et concernent à la fois les solutions *hardware*, *software* et les services associés.

On identifie d'une part les **technologies *software*** permettant d'optimiser les temps de traitement sur des bases de données massives[4] :

- Les bases de données NoSQL**, utilisant de nouveaux formats de stockage** (MongoDB, Cassandra ou Redis) implémentent des **systèmes de stockage** considérés comme plus performants que le traditionnel SQL pour l'analyse de données en masse ;
- Les infrastructures de serveurs permettent de réaliser le **traitement massivement parallèle**. L'infrastructure Spark, conçue spécifiquement pour les projets de *Big Data*, est aujourd'hui la plus utilisée pour traiter des données distribuées en *clusters* et exécuter plusieurs applications en simultané. Elle combine le système de fichiers distribué HDFS (Hadoop Distributed File System), la base NoSQL et l'algorithme MapReduce développé par Google ;
- **Le stockage des données en mémoire (Memtables)** accélère les temps de traitement de requêtes ;
- **Les technologies de *data mining*** permettent d'identifier l'information pertinente à l'aide d'outils statistiques perfectionnées (*clustering*, *machine learning*, data-viz, réseaux de neurones, algorithmes génétiques, etc.).

D'autre part, de **nouvelles plateformes *hardware* de serveurs** se développent pour s'adapter à la valorisation et l'intelligence des données massives. Aujourd'hui, la majorité des solutions *software* de *Big Data* fonctionne sur du matériel standard. Cependant, la plupart des acteurs considèrent que demain, la massification des données des entreprises nécessitera que les serveurs s'adaptent aux flux de plus en plus importants de données[5].

1 – Traduction officielle de la Commission générale de terminologie et de néologie en date du 22 août 2014. Cette étude fera néanmoins référence à l'anglicisme en raison de son utilisation dans le Plan de la Nouvelle France Industrielle

2 – Bernard Marr, *Big Data, using smart Big Data analytics to make better decisions and improve performance*, Broché, 2015

3 – *Big Data* Paris, *Le Guide du Big Data, Editions 2014/2015*, 2014

4 – ATKearney, *Big Data and the Creative Destruction of Today's Business Models*, 2013

5 – IBM, *The Evolution of Hardware and What It Means for Big Data*, 2013

Enfin, un large éventail de services s'est développé autour de la valorisation et de l'intelligence des données massives. Il s'agit notamment de *analytics as a service, infrastructure as a service, data as a service* et *business intelligence.*

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La maîtrise et la collecte des données massives seront certainement l'enjeu majeur du XXIème siècle[6][7] et revêt donc pour la France un caractère stratégique. À l'heure où les données personnelles ont une valeur économique, détenir ces données et être capable de les analyser sera demain un critère de puissance mondiale. Dans différents secteurs métiers, la maîtrise des données sera à l'origine de profondes transformations des métiers et de l'organisation des entreprises (par exemple : la prévention de panne et la maintenance, le design de nouveaux produits etc.).

Un fort caractère stratégique

La valeur économique associée aux données personnelles et à leur exploitation par les entreprises est très élevée, voire pour certains, « illimitée »[8].

Les données personnelles, source primaire de cette « révolution » continueront à **augmenter de façon exponentielle** : réseaux sociaux, objets connectés, technologies mobiles et libéralisation des données publiques (*open data*) font exploser le volume des données disponibles. En 2020, il est estimé que 10,4 zettaoctets, soit 10 400 milliards de gigaoctets de données, seront partagés tous les mois sur Internet[9].

Compte tenu de la valeur associée à la détention des données et leur exploitation, l'appropriation des technologies de collecte et d'analyse des données massives par les entreprises françaises paraît aujourd'hui indispensable pour se maintenir dans la compétition mondiale.

Atouts de la France

Le positionnement des acteurs français sur cette technologie clé est d'autant plus essentiel que la France dispose **d'un système académique particulièrement performant** dans les disciplines sur lesquelles s'adossent la valorisation et l'intelligence des données massives. En matière de formation, l'ENSAE, référence dans le domaine de la statistique, propose une spécialisation en « Data Science », de même que Télécom ParisTech ou l'École Polytechnique qui propose depuis 2014 un mastère spécialisé en *Big Data*. Les offres de ce mastère bénéficient par ailleurs d'un mécénat des entreprises Keyrus, Orange et Thalès, preuve que les groupes français sont conscients de la nécessité de former et de renforcer les compétences des « *data scientists* ». Des organismes comme l'Inria, le CNRS et le CEA sont en outre à la pointe de la recherche et de l'innovation en «Data Science».

Par ailleurs, **un riche tissu de start-up** dans le domaine de la collecte et de l'analyse de données a émergé. À titre d'exemple, Dataiku, pionnier dans le *Big Data* en France, propose des solutions d'analyse prédictive tandis que CitizenData stocke, analyse et crée de la valeur à partir de données issues des capteurs sur textile.

À cela s'ajoute, enfin, **une volonté politique forte et affichée** de faire de la France l'une des références mondiales de la gestion des données massives. En 2011, un nouveau service du Premier Ministre a été créé : Etalab. Il s'agit d'une mission de création d'un portail des données publiques en ligne, permettant aux entreprises et acteurs publics de développer des

6 – « Création de l'Alliance *Big Data* », Site de CapDigital, 20/03/2013

7 – «*Big* data ; impact et attentes pour la normalisation », Livre blanc de l'AFNOR

8 – *Le Big Data parle. L'entendez-vous?,* Livre Blanc de l'EMC

9 – « Vertigineux « *Big Data* », LeMonde.fr, 28/12/2012

nouveaux services à partir de ces données. En octobre 2013, le *Big Data* a fait l'objet d'un plan dédié de la Nouvelle France Industrielle, intégré depuis le 18 mai 2015 dans les neuf Solutions industrielles visant les marchés prioritaires pour la France. Plusieurs appels à projets ont déjà été lancés et seront publiés en 2015 et 2016 sur cette thématique dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir et du Concours Mondial d'Innovation.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché de la valorisation et de l'intelligence des données massives est étroitement liée à la maîtrise des technologies de production de données (objets connectés), de stockage (*Cloud* computing), de modélisation, de visualisation et de simulation, de calcul et d'analyse (analyse prédictive, analyse sémantique) :

- **L'Internet des objets (IoT)** ; l'explosion du marché de l'IoT multipliera la quantité de données personnelles et professionnelles disponibles et rendra d'autant plus nécessaire l'utilisation des technologies d'analyse des données pour les entreprises, les administrations ou encore les particuliers ;
- La maîtrise des **outils de modélisation, visualisation et simulation** est indispensable pour analyser et prendre des décisions à partir des données massives ;
- Le ***Cloud* Computing** : la valorisation et l'intelligence des données massives exigent une capacité matérielle hors du commun à la fois pour le stockage des données et pour les ressources nécessaires au traitement. Le *Cloud* permet l'exploitation de la puissance de calcul ou de stockage des serveurs informatiques distants par l'intermédiaire d'un réseau, généralement internet, offrant ainsi une capacité de valorisation et d'intelligence des données massives ;
- **Le calcul intensif** : l'émergence du *Big Data* et le développement des objets intelligents et connectés accroissent les besoins en calcul intensif. Ces technologies de calcul sont nécessaires à la valorisation et l'intelligence des données massives en ce qu'elles permettent d'analyser leurs flux[1] ;
- **Les technologies d'analyse prédictive** : les algorithmes prédictifs constituent une application directe des techniques de *Machine Learning* au *big data*. Par exemple, à partir d'un historique d'achats, de sessions de navigation sur un site internet, ces algorithmes peuvent prédirent les prochains besoins d'un consommateur ;

- **Les technologies sémantiques** ; ces technologies permettent d'identifier les données pertinentes et signaux faibles cachés dans les données massives. Les possibilités d'extraction vont de la simple reconnaissance de personnes ou d'entreprises à l'analyse d'opinion en passant par la catégorisation thématique ;
- **La cybersécurité** : l'augmentation du volume de données personnelles disponibles sur internet néces-

1 – CNRS, *Livre blanc du calcul intensif*, 2012

site de mettre en place des technologies de cybersécurité plus performantes pour protéger tant les données des utilisateurs (organisations et individus) que la possibilité d'intrusion et de prise de contrôle de systèmes, comme par exemple des objets connectés ;

■ **Les infrastructures de 5ème génération** : le traitement de données de plus en plus importantes en

© Fotolia

un temps restreint nécessitera la mise en place d'un réseau plus rapide. Le développement de la 5G permettra donc, conjointement, le développement de solutions de traitement de Big Data tant centralisées que distribuées ;

■ **L'intelligence artificielle (IA) et le *deep learning*** : les algorithmes de *deep learning* s'inspirent de ceux de l'intelligence artificielle pour extraire automatiquement des informations du *Big Data* ou des représentations de données avec un niveau élevé d'abstraction.

Les marchés

Aujourd'hui, toutes les projections du marché du *Big Data* prévoient **une très forte croissance d'ici 2020**. Elles concernent les solutions de serveurs, stockage, réseaux et logiciels (bases de données relationnelles NoSQL, Hadoop...) ainsi que les services associés.

Un marché en très forte croissance

Le chiffre d'affaires du marché de la valorisation et de l'intelligence des données massives (hors services) devrait croître de **40 % par an** pour atteindre **44,4 milliards d'euros en 2018**[2]**.** En intégrant non seulement les logiciels mais aussi les services, le marché est évalué à 31 milliards d'euros en 2013 et à **105 milliards d'euros en 2018**, soit une progression annuelle **de 29,6 %**[3]**.** Les leaders du marché mondial sont principalement américains. Il s'agit notamment de Google, Amazon, Facebook, Apple, IBM, Intel, Microsoft, TeraData, *Cloud*era, Oracle, EMC, Hortoworks et DataMeer.

En France, le marché de la valorisation et de l'intelligence des données massives est évalué à seulement 387 millions d'euros en 2013 mais est considéré comme particulièrement prometteur avec un taux de croissance de **40 % par an** (logiciel et services)[4]. Selon les estimations du plan dédié de la Nouvelle France Industrielle, intégré dans la Solution industrielle « Économie des données », le marché en France devrait atteindre **9 milliards d'euros en 2020**[5]. Les leaders du marché français sont notamment Atos, Thales, Criteo, Orange et Dataiku.

Des applications dans tous les secteurs

L'émergence des technologies de la valorisation et de l'intelligence des données massives décuple les possibilités d'analyse dans tous les secteurs comme l'illustre le tableau ci-dessous :

---

2 – Données de *Transparency Market Research*

3 – Données d'*ABI Research*

4 – « Le marché du «*Big Data*», nouveau graal de l'informatique », LeFigaro.fr, Tech & Web, 02/04/2014

5 – Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du numérique, *Les 34 plans de la nouvelle France industrielle*, 2013

Secteurs	Exemple de projets
Santé	Projet de recherche en génomique mené par France génomique
Marketing, CRM, publicité	Solution de re-ciblage publicitaire utilisant des algorithmes de *machine learning* pour construire les bannières qui correspondent aux attentes des utilisateurs
Environnement	Projet « Dada » du CNRS : analyse de l'évolution climatique au niveau mondial
Lutte contre la fraude	Projet « Brand WatchDog » mené par l'entreprise Data & Data
Journalisme	Projet « The Migrant Files » mené par l'entreprise Journalism+++
Banque et assurance	Projet d'assurance évolutive mené par la société Progressive avec le lancement du service « *Pay as you drive* »
Loisirs	Projet « X-Field Paintball » de la société PCB Team : création d'une base de données géantes sur la communauté du paintball
Énergie	Projet « Deepky » de Cofely Service utilisant des algorithmes de data-analytics
Mobilité	Création d'un algorithme d'analyse des données de vol. Projet mené par l'entreprise Safetyline

Sources : Atelier d'experts « Communication Numérique » du 31 mars 2015, organisé dans le cadre de l'Étude Technologies clés 2020 et Guide du Big Data 2014/2015
Tableau non-exhaustif des secteurs d'application du *Big Data* et des projets en cours

Le marché de la valorisation et de l'intelligence des données massives bénéficie d'un potentiel très important pour les entreprises et administrations publiques[6] :

- Le potentiel du *Big Data* dans le secteur de la santé serait de **275 milliards d'euros** ;
- Les économies potentielles liées à la collecte et au traitement des données massives pour les administrations publiques en Europe sont estimées à **250 milliards d'euros** ;
- La valeur des données de géolocalisation pour les prestataires de services représenterait **92 milliards d'euros** ;
- Enfin, la valeur des données personnelles en Europe est estimée **à 315 milliards d'euros**.

Les défis technologiques à relever

Le stockage des données massives

Les entreprises de taille moyenne détiennent toutes un centre de données (*data centers*) ou externalisent cette fonction de stockage et d'archivage à des prestataires spécialisés. La croissance exponentielle de la masse des données des entreprises interroge sur le futur du stockage de données. L'augmentation du volume des centres de données ne pourra en effet pas suivre la courbe exponentielle de croissance du volume de données générées dans le monde.

Le traitement et la qualité des données produites

Les technologies de traitement et d'analyse des données ne garantissent pas aujourd'hui une fiabilité totale des données analysées. En effet, le traitement de grands volumes de données peut accroître la marge d'erreur si les données ne sont pas intègres à la base. Pour contrer cela, de nouvelles solutions sont développées pour mieux percevoir la source de la donnée et réduire le taux d'erreur. Des fournisseurs spécialisés dans l'analyse et le nettoyage de la donnée externe ont également vu le jour. Mais l'analyse humaine reste quoi qu'il en soit indispensable. La **montée en compétence** et la **formation de *data scientists*** présentent à ce titre un intérêt stratégique pour l'entreprise.

Le temps réel

Un autre enjeu technologique de la valorisation et de l'intelligence des données massives est la quête du temps réel *via* la réduction du temps de traitement. Les nombreux travaux de recherche technologique en cours proposent des solutions différenciées pour accélérer le traitement des données, à l'instar d'*in-memory*[7]. Le développement des infrastructures de 5ème génération pourrait par ailleurs augmenter considérablement la vitesse de traitement des données.

6 – « Infographie ; *Big Data*, un marché à 100 milliards de dollars », Usine-digitale.fr, 08/04/2014

7 – *Big Data* Paris, *Le Guide du Big Data, Editions 2014/2015*, 2014

Sécurité et anonymisation des données

Face à un volume toujours plus massif de données disponibles, **l'enjeu de leur anonymisation est devenu un enjeu clé.** La nouvelle gestion des données du *Big Data* tend en effet vers ces procédés d'anonymisation des données qui garantissent aux individus une préservation de leur vie privée, tout en permettant aux entreprises de valoriser les informations contenues dans les données personnelles qui, une fois dissociées d'une personne identifiable, ne sont plus soumises à la loi Informatique et Libertés. L'objectif est ainsi d'aboutir à des procédés d'anonymisation irréversibles et absolus, rendant impossible toute identification, alors même que les recoupements massifs permis par le *Big Data* apparaissent antagonistes avec cette recherche. Des critères qui garantissent un niveau d'anonymisation suffisant sont encore à affiner. Cet enjeu technologique est en ce sens très lié au défi de confiance entre opérateurs et clients.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

La croissance exponentielle des données dont disposent les entreprises créent des opportunités nouvelles. En améliorant la connaissance des comportements et préférences de consommation de leurs clients, ainsi que leurs processus de production, les entreprises peuvent proposer de nouveaux produits ou améliorer l'existant, personnaliser davantage leurs offres pour mieux répondre aux besoins de leurs clients et les fidéliser, et *in fine* améliorer leurs résultats commerciaux.

Le « défi de la confiance » entre opérateurs et clients

L'utilisation de données personnelles créée un **risque de réputation fort** pour l'entreprise positionnée sur ce marché, si ses clients n'ont pas confiance dans la manière dont leurs données sont protégées et utilisées[8]. La confiance est centrale dans la relation qui lie l'entreprise avec son client et est d'autant plus importante dans le cas de l'utilisation de données personnelles. Les évènements récents qui ont marqué l'opinion publique - tels que la surveillance exercée par la NSA ou l'attaque informatique de Sony qui a révélé au public l'exploitation d'un nombre important de données personnelles - ont mis en évidence et accentué la sensibilité du public à la protection de ces données et induit le besoin d'être rassuré. Selon une étude récente[9], en moyenne, 78 % des personnes interrogées en Grande Bretagne, Allemagne, France, Italie et Espagne considèrent qu'elles doivent être prudentes lorsqu'elles partagent des données personnelles en ligne.

Une sous-estimation de la valeur et de l'utilité du Big Data par les entreprises françaises

La valorisation des données massives doit « révolutionner » le travail des entreprises mais encore faut-il qu'elles le réalisent. D'après une étude publiée en juin 2015, les entreprises françaises sont particulièrement en retard dans le domaine et n'ont pas pris conscience de la valeur que peut leur apporter la mise en place d'une stratégie de valorisation et d'intelligence des données massives. Pour deux tiers d'entre elles, le *Big Data* est un concept «intéressant, mais trop vague pour constituer un levier de croissance»[10].

Un retard dans l'intégration du Big Data dans les entreprises françaises

En 2015, seules 18 % des entreprises françaises ont des plans d'actions en cours de déploiement dans le *Big Data*, et seules 17 % d'entre elles sont « très matures » dans l'exploitation de leurs données clients. La collecte de données est limitée aux canaux traditionnels. Les données non-structurées sont insuffisamment analysées. Les entreprises manquent de compétences analytiques pour traiter leurs données client ainsi que d'outils spécifiques pour les données non-structurées.

Selon l'Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise[11], cet état de fait peut s'expliquer par plusieurs limitations qui trouvent leur source dans les entreprises elles-mêmes :

- Des difficultés de coordination entre les différents services de l'entreprise, impliquant souvent la coûteuse mise en place d'un département de *data scientists* ;
- La complexité de l'évaluation des bénéfices en termes de productivité et de croissance des straté-

8 – Boston Consulting Group et DLA Piper, *Le Big Data face au défi de la confiance*, juin 2014

9 – *Ibid*

10 – EY, *(Big) data ; où en sont les entreprises françaises ?*, 2014

11 – Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise, *Faire entrer la France dans la troisième révolution industrielle ; le pari de l'innovation #1 Big Data*, mai 2014

gies liées au *Big Data*, face à des besoins d'investissements importants ;

- La mise à niveau des compétences en statistique, informatique et management pour nombre de cadres.

A ces défis d'intégration et d'appropriation de la valorisation et de l'intelligence des données massives par les entreprises françaises s'ajoute un enjeu majeur pour l'industrie du *Big Data*, celui de la protection des données personnelles ou organisationnelles.

Les enjeux réglementaires

L'exploitation par des entreprises de données personnelles à des fins commerciales (base de données marketing, ciblage publicitaire, etc.) pose inévitablement la question de la protection des données personnelles. Qui peut collecter ces données ? Qui en détient la propriété ?

En France, le traitement de données à caractère personnel est régi par les dispositions de la loi « Informatique et Libertés » du 6 janvier 1978. Cette loi définit une donnée personnelle comme « toute donnée permettant d'identifier directement ou indirectement une personne physique » et énonce les principes relatifs à la protection des données :

- Finalité et proportionnalité de la collecte des données ;
- Pertinence des données traitées ;
- Conservation limitée des données ;
- Sécurité et confidentialité ;
- Respect des droits des intéressés : loyauté et transparence.

Ces principes constituent autant de défis du point de vue de la conformité règlementaire des opérations de valorisation et d'intelligence des données massives.

La finalité des opérations de *Big Data* est souvent imprécise, la proportionnalité et la pertinence sont donc difficiles à délimiter[12]. Les opérateurs recherchent des signaux faibles dans la masse de données et des corrélations, mais ne savent souvent pas sur quoi ils vont s'arrêter : c'est le principe de « sérendipité »[13]. Du fait des rapprochements, croisements et analyses de données issues de sources diverses et de la dispersion des moyens de traitement, la collecte et l'utilisation de ces données massives doivent être précisément encadrées sur le plan juridique.

Par ailleurs, **la sécurité et la confidentialité des données** sont capitales pour les opérateurs du *Big Data* étant donné la valeur potentielle qu'une analyse efficace du patrimoine informationnel de l'entreprise et du particulier peut générer. En stockant des données stratégiques sur lesquelles elle compte appuyer ses décisions, l'entreprise s'expose à des phénomènes de cybercriminalité et de piratage. Ce fut le cas d'*Ebay* en 2014, victime d'un vol important de données de ses clients.

Les solutions de stockage sur serveurs et dans le *Cloud* doivent de ce fait répondre à ce risque d'insécurité sur les réseaux. Des actions sont en cours dans le cadre de la Solution industrielle « Économie des données » avec la création d'un label sur la sécurité dans les services de cloud computing (Label Secure Cloud de l'ANSSI) qui permettra aux entreprises et acteurs publics d'avoir confiance en ces nouveaux services.

Corollaire de la sécurité des données, **le principe de collecte loyale impose que les intéressés consentent au traitement de leurs données personnelles.** Le 13 mars 2014, le Conseil d'État dans son arrêté « PagesJaunes » a donné raison à la CNIL à propos de l'obligation d'informer les internautes sur la collecte d'informations issues du *web* social.

Face à l'absence de cadre juridique spécifique, l'Union européenne travaille depuis 2012 sur un projet de règlement européen unifiant le droit de tous les États en la matière. L'objectif principal de ce règlement est d'établir clairement la finalité et les conditions d'utilisation des données personnelles[16]. Ce nouveau règlement devrait être proposé d'ici la fin de l'année 2015. En France, le projet de loi numérique en cours de rédaction devrait aussi aborder certaines thématiques liées aux données personnelles, comme la portabilité.

12 – Société Française de Statistique, *Enjeux Ethiques du « Big Data » : Opportunités et risques*, Séminaire organisé par le groupe « Statistique et enjeux publics » de la SFdS le 22 mai 2014

13 – «Protection des données personnelles et *Big Data* ; inconciliables, vraiment ?», Site de Silicon.fr, 20/04/2014

14 – Données du *Ministère de l'économie et des finances*

15 – GAFAM : acronyme témoignant de l'hégémonie de cinq acteurs américains sur le marché du Big Data. Il s'agit des initiales des entreprises : Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft

16 – Commissariat Général à la stratégie et la Prospective, Marie-Pierre Hamel et David Marguerit, *Analyse des Big Data Quels usages, quels défis ?* », novembre 2013

Analyse AFOM

ATOUTS

Des instituts d'enseignement supérieurs de renommée internationale : l'Institut Mines-Télécom (Télécom Paristech notamment), École Centrale Paris, l'ENSAE, l'École Polytechnique, l'École normale supérieure (Cachan), l'École normale supérieure (Ulm), etc.

Des ressources d'informaticiens et mathématiciens plébiscités dans le monde entier sur des sujets clés comme le *Big Data* ou l'intelligence artificielle

Des centres de recherche à la pointe sur le *Big Data* tels que le CNRS, le CEA List et l'INRIA

Un dynamisme de l'action publique à travers :

L'intégration d'actions *Big Data* dans la Solution industrielle « Économie des données » de la Nouvelle France industrielle

La création en 2011 de la mission Etalab, « portail unique interministériel des données publiques »

La Présidence française du « Partenariat pour le gouvernement ouvert » (*Open Government Partnership*) en 2016[1]

La création de la conférence *Big Data* Paris

FAIBLESSES

Un manque de compétences analytiques et notamment de ressources de *data scientists* pour subvenir aux besoins de ces prochaines années

Une faible perception des entreprises et des particuliers de la valeur des *Big Data* dans la prise de décision stratégique

OPPORTUNITÉS

Un marché mondial estimé à plus de 40 milliards d'euros en 2018

Un marché français estimé à 9 milliards d'euros en 2020

Un potentiel de 137 000 emplois d'ici 2020 en France

Une nouvelle réglementation européenne sur la protection des données à caractère personnel

MENACES

Un monopole des GAFAM[2] détenant les plateformes globales d'échange et collecte des données massives

Une faible protection des données personnelles

Une atteinte à la sécurité économique des entreprises à travers la vulnérabilité du patrimoine informationnel de l'entreprise

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics

■ Intégrer le traitement des données massives dans l'action publique : en tant que grand opérateur de données, l'État doit être un acteur phare du dispositif et se montrer exemplaire en la matière ;

■ Participer à l'établissement d'un cadre réglementaire favorable à l'émergence d'une industrie française de valorisation et d'intelligence des données massives afin de répondre aux enjeux économiques et de souveraineté.

Aux entreprises

Mettre en place une stratégie efficace de valorisation et d'intelligence des données massives. Pour ce faire, quatre facteurs clés de succès peuvent être mentionnés :

■ Impliquer fortement la direction générale de l'entreprise ;

■ Définir la stratégie en impliquant l'ensemble des directions et en travaillant sur leur transversalité ;

■ Recruter et former des *data-scientists ;*

■ Définir une feuille de route agile et un plan d'action concret ;

■ Garantir la sécurité des données pour créer un climat de confiance ;

■ Expérimenter sur des problématiques *Big Data* concrètes et précises.

Aux académiques

■ Améliorer les compétences en *analytics* à travers la formation de *data scientists ;*

■ Accroître l'offre de formations continues, considérée par les experts comme plus efficaces pour former des *data scientists* à horizon 2020.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

En France, **l'INRIA, le CEA List, et le CNRS** sont les principaux centres de recherche travaillant sur la valorisation et l'intelligence des données massives. **L'IRT System X** est un acteur important qui mène des travaux de recherche technologique dans ce domaine. Par ailleurs, les principales grandes écoles françaises ont également lancé des programmes de recherche et formation sur le *Big Data*. **L'Institut Mines-Télécom** propose un programme complet de recherche et d'enseignement pluridisciplinaire sur le *Big Data* accessible en formation initiale et continue et concernant 13 enseignants chercheurs, 50 doctorants et une centaine de diplômés par an. L'école **Télécom ParisTech** a lancé à la rentrée 2013 un nouveau mastère spécialisé «*Big Data* : Gestion et analyse de données massives».

L'École Polytechnique, l'ENSAE et l'École Centrale Paris ont également mis en place des programmes spécialisés sur la thématique[17]. À titre d'exemple, l'École Polytechnique propose le « *Data Sciences Starter Program* », l'École Centrale Paris a créé un programme de formation continue à destination des cadres dirigeants, chefs de projets, managers des systèmes d'information et experts sur la thématique « *Big Data* - Enjeux et opportunités » ; enfin, l'ENSAE a structuré un programme de spécialisation en *Data Science*, visant à former des *data scientists,* et ce tant en formation initiale que continue.

Grands groupes

La France est encore trop absente des « couches basses »[18] du marché c'est-à-dire au niveau des technologies de base et des infrastructures. Ces « couches » sont aujourd'hui quasiment exclusivement occupées par des acteurs américains tels que Google (création de l'architecture *Hadoop*) ou encore Amazon et Cloudera. Les Français ont pris le train en marche, mais sont présents principalement au niveau des applications. **Atos et Bull, Thales, Orange et Keyrus** sont considérés comme les principaux groupes français de la valorisation et de l'intelligence des données massives. Le groupe Technicolor, leader mondial du secteur des médias et des divertissements, s'est lancé dans le

17 – Pour en savoir plus : sites Internet de Polytechnique, de l'École Centrale Paris et de l'ENSAE

18 – « L'équipe de France du *Big Data* ». LesEchos.fr, 15/10/2013

Big Data avec la création en 2014 de Virdata, en partenariat avec IBM. Ce service de *cloud* pour l'Internet des objets comprend des technologies avancées de gestion et analyse des *Big Data*.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

Criteo est l'ETI leader dans le domaine de la valorisation et de l'intelligence des données massives en France. L'entreprise a mis en place une architecture informatique de pointe dans le domaine du *Big Data* et un algorithme capable de prédire les intentions d'achat des internautes à partir de leur historique de navigation afin de mieux cibler les publicités affichées.

Start-up et PME

L'écosystème du *Big Data* en France est majoritairement dominé par les très nombreuses start-up spécialisées dans l'*analytics*, la sémantique et les modèles prédictifs. On peut citer, parmi d'autres, **CitizenData**, solution hébergée de collecte, stockage et analyse de données issues de capteurs, ou encore **Dataiku**, qui édite une solution d'analyse de données et de construction d'applications prédictives[19], **Mesagraph**, qui mesure l'audience sociale des programmes des chaînes de télévision en analysant des millions de tweets par mois et enfin, **Syllabs**, qui a récemment développé une offre de solutions d'analyse sémantique dédiées pour traiter les données massives dans les domaines de l'e-commerce, l'e-tourisme et les media.

Organismes de soutien et d'interface

Enfin, ces entreprises sont soutenues et accompagnées par les pôles de compétitivité français **Cap Digital, Images & Réseaux, SCS et Systematic**. Cap Digital a participé à la création de l'Alliance *Big Data* en 2013 dont l'objectif est de « contribuer à la construction d'une vision commune et de favoriser le développement de nouveaux services et projets dans le domaine du *Big Data* en France »[20].

Avec Cap Digital, quatre autres animateurs ont été sélectionnés pour lancer des appels à projets « Challenges Big Data », permettant de mettre en relation grands groupes et start-up. Il s'agit notamment de Numa, Images & Réseaux, TUBA Lyon et Euratechnologies.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Les acteurs français sont en retard dans la compétition mondiale par rapport aux États-Unis qui dominent très largement le marché[21]. La majorité des leaders mondiaux de fourniture de solutions de *Big Data* sont en effet américains. À l'échelle européenne en revanche, la France se positionne au même rang que l'Allemagne, devant le Royaume-Uni[22].

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Les grandes écoles de statistiques et de mathématiques françaises - tels que Télécom ParisTech, l'ENSAE, l'École Normale Supérieure de Cachan, l'École Normale Supérieure Ulm, l'École Centrale ou l'École Polytechnique – et les acteurs de la recherche publique (CNRS, INRIA, CEA etc.) ont permis à la France de développer un système académique performant, de former des talents et de se positionner en leader dans les disciplines de la valorisation et de l'intelligence des données massives. De nombreuses structures travaillent également sur ce domaine comme par exemple les LabEx SMP (porté par la Fondation Sciences Mathématiques de Paris), Digicosme et Ecodec, Les EquiEx CASD et Digiscope ou bien encore les Lidex CDS, ISN, etc.

19 – La start-up a levé 3 millions d'euros début 2015

20 – Site Internet de Cap Digital

21 – Ateliers d'experts réalisés dans le cadre de l'Étude Technologies Clés 2020

22 – Teradata, Communiqué de Presse : « *Les entreprises françaises exploitent davantage le « nouveau » Big Data que leurs homologues anglaises* », septembre 2014

4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique

LOISIRS & CULTURE
ÉNERGIE, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
ENVIRONNEMENT, HABITAT, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

simulation, modélisation, prévention, prédiction, circulation, visualisation, intégration, déluge de données, hétérogénéité de données, logiciels, marché concentré

Définition et périmètre

Définition

Les technologies de simulation, de modélisation et d'ingénierie numérique visent à construire et à adapter aux moyens numériques un ensemble de fonctions mathématiques décrivant un phénomène qui peut comprendre des dimensions physiques, mécaniques, chimiques, biologiques ou sociales. En modifiant les variables de départ, il est ainsi possible de prédire les modifications et évolutions d'un système étudié.

Initialement appliquées à des domaines, tels que la métrologie, la mécanique, les matériaux ou l'écoulement des fluides, la simulation, la modélisation, et l'ingénierie numérique trouvent des applications dans des domaines de plus en plus nombreux : des réseaux de télécommunications en passant par la circulation d'énergie ou de personnes, la chimie, la biologie, les nanotechnologies, l'environnement et le climat, l'énergie, etc. **Le caractère multi-physique et multi-échelle de ces nouveaux types de phénomènes étudiés renforce le besoin de hiérarchiser le « déluge de données[1]» qui doivent être analysées.** Les modèles sont ainsi conçus pour traiter la bonne information à la bonne échelle.

Un champ d'applications particulièrement vaste

La modélisation, la simulation et l'ingénierie numérique sont au cœur du domaine du numérique puisque des modèles mathématiques sont présents à toutes les étapes de la conception et du déploiement des **infrastructures et des services de télécommunications** (internet, smartphones, vidéo à la demande, etc.). L'enjeu est dans ce domaine d'éviter tout engorgement et d'offrir des services de qualité et des protocoles toujours plus performants. Cela passe notamment par l'analyse du trafic dont les propriétés évoluent en permanence.

Les applications de la simulation-modélisation numérique en santé sont multiples. Des modèles peuvent ainsi servir la **médecine régénérative** comme la **médecine préventive** et **prédictive** en modélisant l'évolution des pathologies (maladies neurodégénératives et chroniques, oncologie, AVC). Ces technologies permettent également de déceler des bio-marqueurs. L'ingénierie numérique est ainsi placée au cœur de la **médecine *in silico***, qui est basée sur la modélisation virtuelle de processus biologiques réels, son objectif étant d'arriver à une modélisation complète du corps humain. Enfin, les technologies de modélisation et de simulation numérique permettent de faire avancer l'épidémiologie et la gestion des pandémies.

Le domaine de l'énergie est également amené à être fortement impacté par l'élaboration de modèles informatiques et d'outils de simulation dans un contexte de prise de conscience du caractère fini des ressources énergétiques fossiles et de la maîtrise des gaz à effet de serre[2]. La modélisation, la simulation et l'ingénierie numérique permettent ainsi de **comprendre comment produire et distribuer les différentes énergies**, par exemple en optimisant la production de biocarburants ou d'électricité.

Les applications de l'ingénierie numérique ont également un rôle clé à jouer dans le domaine de l'environnement, puisqu'elles permettent non seulement de comprendre les évolutions actuelles et de prévoir leurs conséquences, dans le cadre notamment de la **planification et de la gestion du risque environnemental**, mais aussi d'imaginer des scénarios d'inflexion. Le développement de technologies numériques dans ce domaine concerne en grande partie le développement de modèles prédictifs et de simulations numériques à des échelles très variées (de l'ensemble de la géosphère à l'échelle locale). Le domaine de l'alimentation, lié fortement à des problématiques environnementales, est également touché par ces technologies puisqu'elles permettent de doser les intrants et d'optimiser les procédés. Par exemple, elles peuvent ainsi servir à déterminer des quotas de pêche ou à modéliser la croissance végétale afin d'optimiser les ressources.

En ce qui concerne l'habitat et la mobilité, ces technologies permettent de penser les **villes intelligentes de demain**, par le biais notamment de plates-formes qui interconnectent les modèles de différentes composantes de l'écosystème urbain. Dans le domaine de la mobilité, elles peuvent, par exemple, être appliquées au trafic routier pour permettre d'anticiper des difficultés et de proposer des solutions en temps réel. Des données concernant l'environnement et l'énergie

1 –Terme employé dans *Objectif Inria, plan stratégique 2013-2017*, Inria, 2013

2 –*Objectif Inria, plan stratégique 2013-2017*, Inria, 2013

peuvent également être incorporées aux modélisations urbaines de ces « *smart cities* » (services à l'énergie, utilisation des sols et de l'eau, impacts environnementaux, sécurité, etc.). La **maquette numérique** est un autre outil important qui trouve des applications notamment dans l'habitat et l'urbanisme puisqu'elle permet de réaliser des prototypages visuels de projets (à l'échelle d'un bâtiment ou d'un territoire), de manière évolutive et adaptable, aussi bien dans le temps que dans les fonctionnalités.

Enfin, les technologies de modélisation, de simulation et d'ingénierie numérique sont amenées à impacter fortement les domaines des loisirs et de la culture, par le biais notamment de la **modélisation de comportements humains**, à l'échelle des individus comme des groupes sociaux. Toujours en phase de recherche, l'intégration d'aspects sociologiques et psychologiques couplés à des informations biologiques (neurosciences) dans des modèles pourrait ainsi à terme permettre de mieux comprendre, concevoir et exploiter les informations contenues dans les réseaux sociaux. Autre application dont le développement est en plein essor, la possibilité pour des sites de e-commerce de faire virtuellement essayer à leurs clients leurs produits (vêtements, chaussures*) via* la « cabine d'essayage virtuelle » composée de modèles intégrant leurs paramètres physiques. Cette approche pourrait avoir des conséquences importantes sur la **modélisation de la relation client.**

Domaine	Principales applications
Numérique	Conception et déploiement des infrastructures et des services de télécommunications
Santé et bien-être	Médecine préventive, médecine prédictive, médecine régénératrice, médecine *in-silico,* épidémiologie
Énergie	Optimisation de la production de ressources (électricité, biocarburants)
Environnement	Planification des ressources et gestion du risque.
Alimentation	Dosage des intrants et optimisation des procédés
Habitat ; Mobilité	Villes intelligentes (*smart cities*), maquette numérique
Loisirs & Culture	Modélisation de comportements humains collectifs, modélisation de la relation client.

Tableau récapitulatif des principales applications de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique (Source : ALCIMED)

Par ailleurs, le développement de certaines de ces applications (villes intelligentes et modélisation de comportements humains) **dépend fortement de celui des nouvelles technologies d'analyse de données massives (*data analytics*)**. La convergence du *Big Data* et du calcul intensif est ainsi une tendance qui se confirme et devrait permettre de traiter les données massives générées par un nombre croissant de nouveaux capteurs et d'objets connectés, enregistrant des informations sur des phénomènes physiques, l'environnement ou le comportement humain.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Un fort caractère stratégique

Les technologies de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique sont particulièrement clés à l'horizon 2020 puisqu'elles couvrent un champ incroyablement vaste de domaines et **constituent des solutions à des problématiques essentielles du développement humain** (préoccupations environnementales, gestion de l'énergie et des ressources, avancées thérapeutiques et nouvelle conception de la médecine dans un contexte de vieillissement croissant de la population, etc.)

La **multidisciplinarité** est ainsi au cœur de ces technologies qui bénéficieront des avancées dans leurs différents domaines d'application.

Atouts de la France

Le positionnement français dans ce domaine est également très favorable. La France dispose en effet **d'excellentes compétences académiques en mathématique et informatique** et développe des formations spécifiques appliquées à la modélisation, la simulation, le calcul intensif et l'ingénierie numérique.

L'ensemble de l'écosystème national favorise également l'innovation : des partenariats entre recherche publique et privée ont été mis en place, à travers notamment les travaux de collaboration de grands groupes (au niveau national et international) avec l'Inria.

Dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir, l'État soutient **deux initiatives de diffusion des usages industriels de la simulation en faveur des PME/ETI**, la première portée par GENCI et l'association Teratec, la seconde par l'association Micado. Ces initiatives permettront aux PME/ETI françaises d'intégrer la simulation numérique au sein de leurs processus de développement et de fourniture de produits et de services.

D'ici 2020, le numérique restera une **priorité de la politique de l'État** en faveur de la R&D et de l'innovation, notamment pour le développement de logiciels. La simulation numérique couplée au calcul scientifique constitue également un des axes majeurs des programmes publics d'aide à la R&D, les projets aidés allant de la recherche scientifique « amont » au développement expérimental de solutions industrielles[3].

Des entreprises françaises font figure de *leader* mondial dans leur domaine, à l'instar de **Spring Technologies**, qui domine la simulation d'usinage.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché de la simulation, la modélisation et l'ingénierie numérique est liée au développement d'un très grand nombre de technologies clés identifiées dans la présente étude, du fait notamment des nombreux champs d'applications qu'elles couvrent. Parmi les plus importantes ;

Les technologies qui influencent les technologies de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique :

- Les **Capteurs** : les données transmises par les capteurs servent notamment l'actualisation des modèles en temps réel ;
- Certains **Dispositifs bio-embarqués** transmettent également les données nécessaires à la modélisation ou à la simulation pour des applications en santé ;
- Les **Supercalculateurs** : l'augmentation exponentielle des puissances de calcul permet des simulations toujours plus riches, sous réserve que les utilisateurs parviennent à exploiter ces moyens sophistiqués.

Les technologies influencées par les technologies de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique :

- **La Métaomique** : production de très grandes masses de données brutes qu'il faut réussir à intégrer à travers des modèles numériques ;
- **La Fabrication additive** : modélisation et visualisation numérique comme étapes préalables à la fabrication ;
- **La Cobotique et humain augmenté** : par la simulation d'interactions homme-machine (ex. : implants) ;
- **Les Dispositifs bio-embarqués** : utilisation de logiciels de simulation et de modélisation des interactions entre les dispositifs implantés (organes artificiels, prothèses, etc.) et le corps humain ;
- **L'Énergie éolienne** : modélisation et simulation des vents pour l'optimisation en temps réel du fonctionnement des systèmes ;
- **Les Infrastructures de 5ème génération** : importance de la modélisation du réseau pour optimiser son fonctionnement ;
- **L'Ingénierie génomique** : modélisation du génome ;
- **L'Internet des objets** : utilisation pour la modélisation et la simulation des données transmises en temps réel par les objets connectés.

Les marchés

Dynamique du marché mondial

Le marché mondial des technologies de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique est compris dans le marché des logiciels, qui vaut près de 541,6 milliards d'euros en 2014. Ce marché devrait atteindre **789 milliards d'euros en 2020**, sur la base d'une croissance annuelle moyenne de **7,8** %[4]. Malgré une croissance plus faible que sur la période 2010-2014[5], ce marché reste l'un des plus dynamiques de l'industrie numérique.

3 –*France numérique 2012-2020 : Bilan et perspectives*, Ministère de l'économie, novembre 2011

4 –*Software : Global Industry Guide*, MarketLine, mai 2015

5 –La croissance annuelle moyenne entre 2010 et 2014 est évaluée à 10,9 %

À l'échelle mondiale, le marché est largement dominé par les États-Unis et des entreprises comme **Microsoft et Oracle**, qui ont enregistré des chiffres d'affaires respectifs de 47 et 24 milliards d'euros en 2014. L'Europe est le deuxième marché, suivi par l'Asie Pacifique dont le marché est principalement porté par le développement des industries chinoise et indienne. La Chine, particulièrement positionnée sur le marché de l'édition de logiciels, connaît une croissance dynamique, qui polarise tant les efforts internes que les investissements et implantations étrangères. À l'horizon 2020, ce pays pourrait figurer parmi les *leaders* du marché.

Le marché français, un marché concentré

L'industrie française du logiciel représente quant à elle près de **10 milliards d'euros en 2014** [6] et son marché intérieur reste dominé par les leaders américains. Le marché français, qui compte près de **2 500 entreprises**, apparaît en effet très concentré puisque les cinq premiers groupes réalisent à eux seuls près de 55 % du chiffre d'affaires français. Le reste du tissu industriel est essentiellement composé d'ETI et de PME.[7] Le leader français, **Dassault Systèmes,** est deuxième dans sa catégorie en Europe mais ne figure cependant pas au rang des leaders mondiaux, avec un chiffre d'affaires de 2,3 milliards d'euros en 2014.

Des segments en forte croissance

Le marché mondial des logiciels est divisé en plusieurs segments. À titre d'exemple, la simulation numérique pour l'industrie est un segment porteur du marché mondial des logiciels puisqu'il est estimé à 3,7 milliards d'euros en 2014 et devrait atteindre **6,3 milliards d'euros en 2020** sur la base d'une croissance annuelle moyenne de **7,7 %**[8]**.** À noter qu'en 2013, le marché français sur ce segment était de 350 millions d'euros.

Autre segment intéressant, celui de la simulation médicale devrait quant à lui atteindre **1,4 milliards d'euros en 2020**, alors qu'il est estimé à 613 millions d'euros en 2015, sur la base d'une croissance annuelle moyenne importante évaluée à **14,8 %** entre 2015 et 2020[9].

6 –*The software and IT services market in France – key figures, trends and opportunities*, PAC, 2014

7 –Données du *Palmarès Truffle 100*, 2015

8 –*Simulation & Analysis Market Analysis Report*, CIMdata, 2014

9 –*Global Medical Simulation Market 2015-2020*, Meticulous Research, 2015

Les défis technologiques à relever

Défis communs à la valorisation et l'intelligence des données massives

Certains défis technologiques qui concernent la modélisation, la simulation et l'ingénierie numérique sont similaires à ceux développés dans la **fiche n°3 « Valorisation et intelligence des données massives**». Ces défis concernent :

- Le stockage des données massives et la sécurité des systèmes ;
- La qualité des données ;
- Le temps réel.

Défis spécifiques de la simulation, modélisation et ingénierie numérique

On observe aussi des défis propres à la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique. Ils concernent notamment la nécessité de générer des modèles plus complets, plus précis et intégrant des données de plus en plus hétérogènes. **Le calcul haute performance** (*High Performance Computing*) est dans ce cas un levier intéressant puisqu'il permet de calculer plus vite à partir de données de taille plus importante[10]. L'arrivée de calculateurs multi-péta / exa flopiques aux environs de 2020-2025 sera un atout important pour réaliser des simulations complexes passant réellement à l'échelle (complexité des modèles, masse des données utilisées).

10 –Données de l'Inria

À ces défis technologiques généraux s'ajoutent d'autres défis plus spécifiques, comme la question de la **fiabilité des modèles**, en particulier lorsque ceux-ci sont prédictifs et servent la prise de décision (médicale, politique, etc.). En effet, si les logiciels de modélisation et de simulation numérique prennent en compte les probabilités d'erreurs, il demeure essentiel de pousser la recherche sur l'amélioration de la fiabilité des systèmes numériques afin de développer l'« adaptation » des logiciels aux défauts intrinsèques des systèmes[11].

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les défis pour les grands groupes : concurrencer les leaders mondiaux

Le marché français de l'édition logicielle est **très concentré et dominé par de grands groupes**, tels que Dassault Systèmes, Cegedim, Sopra Steria, Murex, Cegid et Axway[12]. Dassault est le seul groupe à avoir une réelle visibilité internationale même s'il n'est pas présent parmi les leaders mondiaux, essentiellement américains. **Le développement à l'international** de ces groupes français est donc essentiel pour asseoir la position de la France.

Bien qu'ils ne soient pas directement positionnés sur le marché de l'édition logicielle, il est toutefois intéressant de noter que des groupes français d'envergure internationale comme Capgemini, Air Liquide, L'Oréal, Alcatel-Lucent, Veolia Environnement ou Atos développent en interne des logiciels de simulation et de modélisation numérique pour des applications dans leurs domaines respectifs.

Les défis pour les ETI et PME : se développer et atteindre une taille critique

La très grande majorité du tissu industriel dans le domaine des logiciels est par ailleurs composée d'ETI et de PME aux chiffres d'affaires beaucoup moins conséquents, 90 % réalisant moins de 50 millions d'euros par an. L'enjeu pour ces entreprises est donc d'atteindre une taille suffisamment importante afin de **capter des parts du marché intérieur** mais également de pouvoir **se développer à l'international**, par le biais de la qualité de l'innovation notamment.

Le rachat des entreprises françaises particulièrement innovantes (Virtuoz, Kelkoo, Ilog) par des entreprises américaines est un autre défi commercial important auquel l'écosystème français doit faire face.

Les enjeux réglementaires

Les enjeux réglementaires de la modélisation, la simulation et l'ingénierie numérique sont similaires à ceux détaillés dans **la fiche n°3 « *Valorisation et intelligence des données massives*».** Ils concernent en particulier :

- Le traitement des données à caractère personnel - surtout lorsque sont en jeu des données de santé comme c'est le cas de certaines application de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique ;
- Le principe de collecte loyale des données ;
- La sécurité et la confidentialité des données personnelles ;
- La nécessité de mettre en place un cadre juridique spécifique en France, au sein de l'Union Européenne comme à l'échelle internationale.

11 –*Objectif Inria, plan stratégique 2013-2017*, Inria, 2013

12 –Données du *Palmarès Truffle* 100, 2015

Analyse AFOM

ATOUTS

Excellence académique (Inria, communautés scientifiques en mathématiques et en informatique, etc.)

Écosystème national favorisant l'innovation (French Tech, Ambition logicielle, stratégie numérique du gouvernement…)

FAIBLESSES

Absence de leadership international des leaders français de l'édition logicielle

Emiettement du tissu d'entreprises

Faible capacité d'investissement permettant de donner aux PME/ETI françaises des capacités d'accélération

OPPORTUNITÉS

Multidisciplinarité et très vaste champ d'applications possibles, liés notamment à des besoins croissants en énergie, en santé et en environnement.

Mise en place des accélérateurs dans le cadre de la French Tech pour favoriser la croissance des entreprises innovantes.

Initiatives de diffusion des usages industriels de la simulation en faveur des PME/ETI

Essor du *big data* et besoin en capacités d'analyse et de prédiction (modèles, simulation, etc.).

MENACES

Hégémonie du marché américain et montée des acteurs asiatiques

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

■ La France doit conserver et renforcer un écosystème favorable à l'innovation en ce qui concerne les technologies de la simulation, de la modélisation et l'ingénierie numérique. Cette innovation, qui résulte notamment de **partenariats de recherche publics-privés**, est un **levier important pour le développement des entreprises françaises (PME et ETI en tête) à l'international**. Le programme « Ambition Logicielle » lancé en 2013 dans le secteur de l'édition de logiciels dans le but d'aider les entreprises prometteuses à se développer est un bon exemple de partenariats publics-privés à encourager.

Aux entreprises :

■ Le soutien aux entreprises innovantes peut également passer par l**e renfort des financements et aides** apportés à la recherche et au développement. Les entreprises peuvent ainsi prendre part à des initiatives publiques comme la « French Tech » qui met en place des accélérateurs à destination des start-up innovantes (fonds d'investissements) ;

■ Les entreprises doivent également prendre part à des projets d'envergure européenne et internationale afin de renforcer leur présence à l'étranger. Des partenariats doivent également être réalisés avec des acteurs leaders du marché (États-Unis et acteurs européens), mais également avec des pays émergents qui s'intéressent de plus en plus aux problématiques de simulation et de modélisation numérique, comme la Chine (santé et vieillissement, ville numérique) et l'Inde (innovations pour les masses)[13] ;

■ Enfin, il paraît important que les entreprises françaises **intègrent les technologies du calcul intensif** à celles de la modélisation et de la simulation numérique dans le but de renforcer leur compétitivité par l'innovation. Cette intégration peut se réaliser *via* une participation aux appels à manifestation d'intérêt, à l'instar de « Diffusion de la simulation numérique » réalisé dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

En France, outre **l'Inria, le CNRS et les laboratoires universitaires spécialisés, le CEA**, **l'ANDRA, le BRGM et l'IFPEN** sont les principaux centres de recherche travaillant sur le développement de la modélisation et de la simulation numérique. A ces centres d'envergure nationale s'ajoutent deux IRT**, SystemX**, qui a lancé un projet de Simulation et Ingénierie Multidisciplinaire, ainsi que **B-Com**, orienté de manière plus générale sur les réseaux et l'hypermédia.

Le CEA, en partenariat avec **l'ONERA**, soutient par ailleurs une formation de Master 2 entièrement dédiée à la modélisation et à la simulation numérique. Cette formation est intégrée au département de mathématiques appliquées de **l'Université Paris-Saclay**.

Grands groupes

Le leader français de la production logicielle est incontestablement **Dassault Systèmes**, qui, s'il fait figure de *leader* européen, ne se positionne pas aujourd'hui en tant que *leader* mondial.

D'autres grands groupes français non spécialistes de la simulation et de la modélisation numérique ont développé des compétences internes pour mettre au point des solutions de simulation et de modélisation numérique dans leurs domaines respectifs. C'est le cas de **Véolia**, **Alcatel-Lucent, Airbus, Total, EDF, RTE** et **Capgemini**.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

Les principales ETI françaises occupent le secteur de la production à l'instar de **Cegedim, Sopra Steria, Murex, Axway et Cegid**, qui concentrent avec le géant Dassault Systèmes la majorité du chiffre d'affaires français.

D'autres entreprises de taille intermédiaire comme **Atos,** acteur international des services informatiques **et GENCI,** société civile spécialisée dans le calcul intensif,

13 –*Objectif Inria, plan stratégique 2013-2017*, Inria, 2013

se positionnent de manière croissante sur le secteur de la simulation et de la modélisation numérique qu'ils intègrent à leur offre. Les deux entreprises ont ainsi lancé en juin 2015 la sixième édition du Prix Bull – Joseph Fourier 2015, visant à accélérer le développement de la simulation numérique et la transformation digitale.

Start-up et PME

Les PME et start-up constituent la grande majorité du tissu industriel français. Beaucoup de ces entreprises sont particulièrement prometteuses malgré des chiffres d'affaires encore peu importants en comparaison de ceux réalisés par les grands groupes du secteur logiciel.

Ces entreprises sont positionnées sur tous les domaines d'applications de la modélisation et de la simulation numérique. Il s'agit notamment de :

- Mécanique et conception : **Spring technologies, Esi Group, HydrOcean**, **MathWorks, Structure Computation, et EC2 modélisation** ;
- Santé : **Digisens, Rhenovia Pharma, Brain Vision Systems et Lixoft** ;
- Environnement: **Optifluides, Geomod, Datapole et Trinov** ;
- TIC : **Docea Power et QoS Design** ;
- Chimie : **Scienomics** et **TheCosmocompany ;**
- Energie: **Corys Tess, Izuba energies, Powersys**;
- Sciences Humaines et sociales: **Golaem, Madea concept, Serious Factory**.

Organismes de soutien et d'interface

Les structures qui soutiennent l'écosystème de l'innovation français en matière de simulation et de modélisation numérique sont principalement **Teratec** et les pôles de compétitivité **Systematic, Cap Digital, Aerospace Valley, Images et Réseaux, SCS, TES, Minalogic** et **Imaginove**.

Le Groupement d'intérêt scientifique (GiS) « **Modélisation Urbaine** » a pour principale mission de faire converger, à l'échelon national, les besoins entre les mondes de la recherche, de l'ingénierie, de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre dans le champ de la modélisation urbaine.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

5 Internet des objets

LOISIRS & CULTURE
ÉNERGIE, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
ENVIRONNEMENT, HABITAT, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Objets connectés, capteurs, données, plateformes numériques, interopérabilité, confidentialité, vie privée, réseaux, middleware, normalisation

© SIGFOX

Définition et périmètre

Il existe de **multiples définitions de l'Internet des objets** (IoT), parmi lesquelles : « *un réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électronique normalisés et unifiés, et des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter, sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels, les données s'y rattachant* ». [1]

Internet devient ainsi progressivement un réseau étendu reliant entre eux les objets connectables. **Ce réseau constitue l'Internet des objets**. Les objets le constituant sont le plus souvent qualifiés de « connectés », mais aussi « communicants » ou « intelligents ». Leur nombre est estimé à 50 à 80 milliards dans le monde d'ici 2020 (15 milliards en 2014[2]).

Un **objet connecté** est un objet qui n'est en général pas destiné à se connecter directement à Internet mais qui interagit avec d'autres objets ou avec l'être humain, en **M2M**, *Machine-to-Machine*, ou *via* les **terminaux communicants** que sont les *smartphones*, les tablettes, les *smart* TV. Selon l'Institut de l'Audiovisuel et des Télécoms en Europe (IDATE), l'Internet des objets sera composé en 2020 à 85 % d'objets connectés, à 11 % de terminaux communicants et 4 % relèvera du M2M[3].

En se connectant à Internet, les objets connectés génèrent des informations qui augmentent leur valeur intrinsèque. Ils participent au développement de l'économie servicielle en ouvrant de nouvelles possibilités de services innovants facilitateurs du quotidien.

Dans un rapport de 2013, **Cisco a introduit le terme d'** « **Internet of Everything** » qui comprend non seulement l'Internet des objets mais aussi les données, les processus et les individus[4].

1 –BENGHOZI P.J., BUREAU S., MASSIT-FOLLEA F., 2009 : *L'Internet des objets, quels enjeux pour l'Europe*

2 –IDATE, 2013 ; *The Internet of things market*

3 –Ibid

4 –Cisco, 2013 ; *Internet of Everything*

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

L'Internet des objets est une **dimension fondamentale de l'Internet de demain.**

Caractère stratégique

En plus de couvrir une diversité de marchés d'application, les nouvelles solutions de services apportées par les objets connectés **impactent toutes les sphères de notre société** (administrations et collectivités, entreprises, consommateurs individuels) et devraient se développer fortement dans les cinq prochaines années.

De grandes multinationales comme Google, Cisco ou Samsung misent sur l'Internet des objets comme **relais de croissance** dans les années à venir, notamment en rachetant des fabricants d'objets connectés ou d'éditeurs de logiciels spécialisés.

Atouts de la France

La France bénéficie **d'acteurs économiques bien positionnés sur la scène internationale**, notamment des start-up et PME sur différents maillons de la chaîne de valeur : fabricants d'objets connectés (Netatmo, Parrot, Withings, *etc.*), opérateurs de réseau de l'Internet des objets et déploiement de réseaux très bas débit dédiés à l'IoT (Sigfox figure parmi les leaders mondiaux et a attiré des investisseurs étrangers), plateformes de gestion des données (Sen.se), etc.

La France est également bien positionnée sur les plateformes d'interopérabilité (Actility par exemple) et les hébergements (exemple d'OVH), qui peuvent être clés sur les sujets de la protection des données. Ses principaux opérateurs de téléphonie mobile (Bouygues, SFR, Orange, etc.) sont en outre engagés dans le déploiement de solutions d'Internet des objets.

Parmi les dix objets connectables à l'iPhone les plus vendus sur l'Apple Store, quatre sont français. Par ailleurs, **quatorze objets connectés français ont été primés en 2015 au Consumer Electronics show (CES) de Las Vegas**, parmi lesquels le maillot de sport connecté de Cityzen Sciences, la caméra de Giroptic ou la centrale d'alarme de MyFox dans la catégorie « maison intelligente ».

Bpifrance est le premier investisseur dans les fabricants français d'objets connectés avec environ

80 millions d'euros déjà investis[5]. La **Cité de l'objet connecté** a ainsi ouvert ses portes en juin 2015 à Angers et regroupe des infrastructures de prototypage et de production de préséries, et un réseau d'expertises et de partenaires capables d'accompagner les entrepreneurs dans l'industrialisation de leur produit. À terme, un site de production doit également s'y ajouter. La proximité de ces équipements à Angers comme dans d'autres lieux et de ces partenaires participera à **raccourcir encore davantage les cycles d'innovation** pour demeurer compétitif dans ce marché mondialisé.

Liens avec d'autres technologies clés

Les objets connectés présentent des liens très étroits avec plusieurs autres technologies clés 2020 :

- **Capteurs** : en tant qu'instruments de recueil des données dans l'environnement, puis de traitement et de traduction de ces données en informations compréhensibles pour l'utilisateur, leur demande augmentera *via* l'essor de l'Internet des objets ;
- **Nanoélectronique** (puces, processeurs, capteurs miniaturisés, etc.) : les composants électroniques produits, plus petits et plus performants, proposant de nouvelles fonctionnalités toujours plus intégrées, répondent aux besoins du marché émergent des objets connectés ;
- **Infrastructures de 5ème génération :** la 5G accompagnera et favorisera le développement des objets connectés en permettant de gérer des volumes plus importants de données à une vitesse accélérée ;
- **Exploitation numérique des données de santé** : la collecte d'informations personnelles par des objets connectés de santé/bien-être soulève des défis en termes de diffusion et d'utilisation de ces données ;
- **Valorisation et intelligence des données massives (*Big Data*):** par les nombreuses données collectées par les objets connectés, ceux-ci-contribuent au développement du *Big Data* ;
- **Intelligence artificielle (IA) et *machine learning*** : en analysant les données collectées de manière intelligible de façon à pouvoir prendre des décisions ou prédire/prévenir des situations, l'Internet des objets participe à l'émergence de l'intelligence artificielle dans de nombreuses facettes de la vie quotidienne.

5 –France Stratégie, 2015 : *Demain l'Internet des objets*

Les marchés

Marché global en forte croissance

Le marché mondial de l'Internet des objets pesait 580 milliards d'euros en 2014 et **devrait atteindre 1 525 milliards d'euros en 2020[6].** Le marché devrait **croître de 16,9 % par an** sur cette période 2014-2020. Cette estimation **exclut les *smartphones*, tablettes et ordinateurs individuels**.

Les **objets connectés et les services des technologies de l'information** constituent le segment principal du marché mondial de l'Internet des objets. Il est à noter que les objets connectés seuls représentent 38,5 % du marché total. À l'horizon 2020, avec l'arrivée à maturité du marché, **les logiciels** (applications, SaaS, etc.) **devraient gagner des parts de marché importantes**.

Marchés verticaux clés et champs d'application

D'abord développés dans le sport et la santé, les objets connectés deviendront clés sur d'autres marchés verticaux tels que par exemple l'énergie, l'industrie, les transports, l'alimentation, etc. Ils se développeront et intègreront la vie d'un individu, d'une entreprise, d'une collectivité, et y occuperont une place croissante : fonctionnement des hôpitaux et du système de santé, d'une ville, gestion de l'habitat, production de biens, marketing produits/services, etc.

En particulier, **les segments des entreprises et du secteur public apparaissent comme les plus porteurs**[7]. Cisco, leader mondial des infrastructures de télécommunications, estime ainsi dans une étude récente que l'Internet des objets représente un **potentiel d'économies de 3 300 milliards d'euros pour le secteur public (collectivités, administrations) au niveau mondial d'ici 2022.**

Certains domaines d'application sont ainsi jugés particulièrement prometteurs :

- **La ville intelligente / *smart city*:** l'Internet des objets permettra de gérer les infrastructures d'une ville de façon plus optimale et automatisée, en tenant compte de divers facteurs pour prendre la meilleure

6 –International Data Corp, 2014 ; *Worldwide and Regional Internet of Things (IoT) 2014–2020 Forecast: A Virtuous Circle of Proven Value and Demand*

7 –L'Usine Digitale, 02/06/2015 : *L'internet des objets pèsera 1700 milliards de dollars en 2020*

décision au moment opportun et/ou éviter les défaillances (**hypervision urbaine**) ;

■ **La maison intelligente et l'immeuble intelligent / *smart home et smart building*:** ils sont à eux seuls un des forts potentiels de la *smart city* selon Cisco[8]. L'entreprise mène des expérimentations dans plusieurs villes dans le monde, dont Nice ;

■ **L'industrie du futur / *smart manufacturing*** : les chaînes de logistique et de distribution de l'industrie ont été parmi les premières à intégrer des puces dans les produits pour des questions d'optimisation et de traçabilité. L'Internet des objets permettra aux industries de rationaliser davantage leurs processus internes, commercialement d'une part (collecte de données sur les motivations d'achat, les déplacements des consommateurs en magasin, *etc*.) et pour la production d'autre part (gestion des équipements, et suivi des stocks, envoi de commandes automatiques aux fournisseurs, *etc*.).

À titre d'exemple, le secteur de l'assurance (automobile, santé, etc.) sera également particulièrement impacté par l'augmentation des données générées par les objets connectés: analyse en temps réel du comportement des conducteurs, informations sur l'état de santé des assurés, etc. L'accès aux données fera l'objet de rapprochements entre assureurs, fabricants d'objets connectés et prestataires de services numériques, à l'instar d'Axa et Withings. **Les assurés pourraient ainsi payer une prime d'assurance couvrant un risque individualisé, fonction de leurs comportements[9].**

Les défis technologiques à relever

L'Internet des objets est un système de systèmes d'une grande complexité. **La capacité à gérer des systèmes et composants différents apparaît comme essentielle.**

Standardisation de la communication entre objets

Les objets de l'Internet des objets se reconnaissent et peuvent communiquer entre eux **grâce à un identifiant numérique**. Un objet connecté se voit ainsi attribuer un ou plusieurs identifiants. L'identité numérique d'un objet connecté **peut être assignée par différentes technologies** : radio-étiquettes (puces RFID), étiquettes graphiques (QR code), étiquette virtuelle (URL), adresse IP.

La multiplication des objets connectés dans de nombreux domaines du quotidien fait apparaître **la nécessité de plateformes leur permettant d'interagir en utilisant un langage commun.** Ces interactions sont sources d'analyses enrichies en surpassant l'approche cloisonnée qui prévaut à l'heure actuelle. En effet, l'Internet des objets fait appel à une hétérogénéité de technologies et de protocoles de communication qui rendent difficiles l'interopérabilité des objets et la garantie d'une expérience globale pour l'usager.

Des géants industriels ont monté des alliances telles que le **consortium AllSeen Alliance ou l'Open Interconnect Consortium**, et des **programmes open source comme Eclipse IoT** afin de travailler ensemble sur la question des standards de communication entre objets connectés. De nombreuses autres alliances ou consortiums *ad'hoc* se sont créés, parfois par grands secteur d'application, à l'instar de Confluens pour le *smarthom*e, et des initiatives sont engagées par des organismes de normalisation, telles que Smart M2M à l'ETSI ou encore oneM2M, un groupement d'organisations à plus haut niveau.

Défi de convergence : interopérabilité des objets pour des services intelligents

Les approches en matière d'interopérabilité sont soit technologiques (et à plusieurs niveaux : connectivité, réseaux, *middleware*, applications) soit thématiques par secteur.

Des plateformes se sont lancées dans cette agrégation de données issues d'objets connectés très différents **afin de générer des services intelligents de façon sécurisée**. Ces plateformes interprètent et analysent les données afin de **pouvoir dispenser des services de plus en plus adaptés à l'usager, particulier ou entreprise,** en centralisant des données sur des habitudes, appétences ou encore relations. Elles représentent une opportunité de mieux connaître et comprendre les comportements de l'usager.

L'ambition est également de **pouvoir automatiser certaines tâches de la vie quotidienne** en programmant ces interactions, particulièrement propices dans

8 –Cisco, 2013 ; *Internet of Everything*

9 –France Stratégie, 2015 : *Demain l'Internet des objets*

les domaines de la maison intelligente et l'immeuble intelligent, de l'industrie, de la santé ou encore dans les transports.

Réseaux à (très) ***bas débit dédiés à l'Internet des objets***

Deux technologies sont actuellement disponibles pour permettre les communications entre objets connectés (envoi de messages très courts de quelques octets) sur des **réseaux bas débit** :

■ **La technologie *Long Range* (LoRa) est reconnue au niveau mondial comme étant la plus aboutie.** Elle a été développée par le français Cycleo, devenu filiale de l'américain Semtech (qui garde la maîtrise de la technologie), et est expérimentée en France par Bouygues Telecom. Elle bénéficie d'une immunité aux interférences, minimise la consommation, et a d'excellentes facultés de pénétration dans les bâtiments ou en sous-sol (avantage concurrentiel majeur de cette technologie) ;

■ **La technologie *Ultra Narrow Band*** est une bande très étroite qui permet de couvrir des zones très larges avec une économie d'infrastructures (1 500 antennes pour couvrir la France, contre 5 000 à 15 000 pour Bouygues Telecom avec la technologie LoRa), mais au détriment de la taille des messages (ne peut dépasser 12 octets, contre 242 octets avec LoRa) et de la pénétration dans les bâtiments. La start-up française Sigfox est reconnue comme la pépite française actuelle positionnée sur cette technologie. Par ailleurs, Qowisio a levé 10 millions d'euros en 2015 pour développer son réseau basé sur la technologie Ultra Narrow Band[10].

L'enjeu de ces deux technologies concurrentes est de permettre aux objets de communiquer entre eux, en consommant le moins d'énergie possible, à un coût réduit pour l'**usager.** Certains acteurs reconnaissent qu'il y a aujourd'hui de la place sur le marché pour les deux technologies compte tenu de leurs spécificités respectives (couverture du territoire, messages plus ou moins volumineux, etc.).

Sécurité et stockage dans un contexte d'ouverture et de volumes croissants

La croissance du volume de données qui transite sur les réseaux et l'ouverture des systèmes d'information des entreprises par-delà leurs frontières augmentent d'autant plus les enjeux relatifs à la sécurité pour prévenir les risques de piratage, d'intrusion et de vol d'informations confidentielles (secrets industriels notamment). Les usages domestiques sont également concernés par des problématiques de sécurité. En l'absence de système de sécurité fiable, ils peuvent être facilement détournés et piratés à distance (exemple du piratage possible d'un pacemaker).

Cette question de la sécurité concerne tant les objets connectés que les données collectées par ces objets, domaines différents qui nécessitent chacun des réponses adaptées. Tous les acteurs de l'écosystème se retrouvent alors impliqués à des échelles différentes : producteurs de composants, fabricants d'objets connectés, fournisseurs de réseau, hébergeurs de données, etc.

Se pose également pour les entreprises la question du stockage de données de plus en plus massives dont la croissance est exponentielle. L'augmentation du volume des centres de données ne pourra en effet pas suivre la courbe exponentielle de croissance du volume de données générées dans le monde.

Problématiques du passage à l'échelle

Un défi technologique important pour le développement de l'Internet des objets concerne la capacité des réseaux à absorber plus de routeurs pour orienter les flux dans un contexte où la croissance des données est toujours plus importante. Les infrastructures ne sont pas aujourd'hui toutes en mesure d'absorber le déluge de données lié à la multiplication des objets connectées.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Partage de la valeur entres acteurs économiques traditionnels et nouveaux entrants dans le secteur numérique

L'exploitation des données produites par les objets connectés **est au cœur du modèle économique.**

Le développement de l'Internet des objets entraîne une **restructuration par l'usage** où les acteurs du numérique captent une part de plus en plus importante de la valeur ajoutée du produit ou du service au détriment des opérateurs télécom. L'étude « Économie des Télécoms 2014 » indique ainsi que **les constructeurs de terminaux ont capté +35 % de valeur entre**

10 – L'Usine Digitale, 08/06/2015 : *Qowisio* défie *Sigfox et LoRa dans les* réseaux pour objets connectés

2007 et 2013, et cette évolution monte à +80 % pour les acteurs Internet, contre – 49 % pour les opérateurs télécom[11].

© Withings

Sur ce marché en pleine croissance, se pose donc **la question du partage des bénéfices entre acteurs traditionnels et fournisseurs de services numériques** dans le cadre de développement d'offres hybrides produits/services. Parallèlement, une tendance à la désintermédiation se développe, permettant aux nouveaux entrants de prendre la place des acteurs traditionnels, à l'instar par exemple des services numériques.

© Fotolia

Adoption et connaissance des objets connectés dans la sphère privée

Alors que le marché de l'Internet des objets s'avère particulièrement porteur pour l'industrie (*smart manufacturing*, offres hybrides produits/services, etc.) et les administrations ou collectivités (économies liées à une nouvelle gestion des ressources, comme par exemple dans le cas de la ville intelligente), les acteurs de l'Internet des objets **devront relever le défi de surpasser les freins relatifs** à l'immersion de l'Internet des objets dans **la sphère privée en légitimant leur valeur ajoutée pour différents usages, en les rendant simples d'accès et sécurisés.**

L'enjeu sera également d'améliorer dans les années à venir la connaissance des objets connectés au sein de la population française. Une étude réalisée par l'Observatoire des objets connectés en novembre 2014[12] indique que si 92 % des Français ont déjà entendu parler des objets connectés et 23 % déclarent en posséder un, **seuls 41 % d'entre eux savent réellement de quoi il s'agit.** La dynamique d'apprentissage est en revanche très rapide et l'état de la connaissance devrait rapidement évoluer.

L'étude révèle également des points de tension et d'ambiguïté chez les consommateurs. Si 84 % des personnes interrogées considèrent que les objets connectés constituent un vrai progrès, elles sont 88 % à penser également que ces derniers les rendent plus dépendantes aux machines.

Les principaux freins à l'achat d'objets connectés sont ainsi **le coût** (pour 59 % des personnes interrogées), la **non-perception de leur utilité** (45 %) ou **la peur de la dépendance et de l'utilisation des données personnelles** (28 %).

Les enjeux réglementaires

Confidentialité et respect de la vie privée

Le défi majeur du développement de l'Internet des objets est **d'innover sans que ce processus se fasse au détriment de l'usager**, qui n'a pas le contrôle ni la connaissance de certaines utilisations de ses données personnelles (mise à disposition auprès de tiers, publicités ciblées, etc.).

La multiplication d'objets capables de collecter des données personnelles (en santé/bien-être notamment) pose des questions en termes de respect de la vie privée et de sécurité. **L'enjeu majeur est donc de protéger les citoyens comme les acteurs socio-économiques afin de garantir leur liberté individuelle et la confidentialité de leurs données, tout en exploitant ces dernières en tant que potentiel d'innovation.**

En France, la loi Informatique et Libertés (6 janvier 1978) énonce les principes relatifs à la protection des données personnelles, mais **il n'existe pour l'instant pas de cadre juridique qui soit adapté aux bouleversements**

11 –Arthur D. Little / FFT, 2014 : *Étude Économie des Télécoms*

12 –Observatoire des objets connectés, enquête auprès d'un échantillon de 2000 internautes représentatif de la population française (réalisée en septembre-octobre 2014)

engendrés par l'essor du numérique et l'échange de données massives. Si la Commission Européenne estime qu'il n'y a pas besoin d'établir de législation spécifique à l'Internet des objets pour faire face à ces enjeux, elle est en cours d'aménagement de la directive 95/46/CE relative à la protection des données à caractère personnel. Des clarifications devraient donc émerger du droit.

Clarification du cadre juridique

L'Internet des objets n'échappera pas au droit européen. Dans cette optique**, les autorités européennes de protection des données ont adopté les 16 et 17 septembre 2014 un avis sur l'Internet des objets**[13]**.** Le respect de la vie privée et la protection des données personnelles sont au cœur des préoccupations de l'Union Européenne.

Analyse AFOM

ATOUTS

Emergence de plusieurs entreprises de référence sur le marché des objets connectés, que ce soit dans l'offre d'objets, d'applications, de plateformes logicielles ou encore de réseaux dédiés

Culture du design et de l'innovation par les usages, couplée à une maîtrise des technologies

R&D dynamique sur les questions relatives à l'Internet des objets (entreprises, centres de recherche, tissu académique)

Structuration d'une Cité des objets connectés au sein d'Angers Technopole, en tant qu'outil de soutien et de développement de l'innovation et du savoir-faire français

Dynamisme de l'action publique : positionnement de cette technologie dans les priorités de la politique industrielle de la France, à travers trois des neuf Solutions industrielles : « objets intelligents », « confiance numérique » et « économie des données »

FAIBLESSES

Absence de système d'exploitation français (OS : *operating system*)

Retard sur les procédés et capacités de fabrication dans un environnement où la production se fait massivement dans les pays à bas coût (Chine par exemple).

Méconnaissance et freins au développement des objets connectés dans la sphère privée

OPPORTUNITÉS

Marché mondial en forte croissance, estimé à plus de 1 500 milliards d'euros en 2020

Des opportunités à la fois pour les filières industrielles « traditionnelles », pour les entreprises de services numériques et les collectivités/administrations

MENACES

Forte concurrence internationale

Risque de rejet de ces technologies jugées trop intrusives et/ou non sécurisées

Réglementation toujours en cours d'élaboration (mais qui pourrait également être source d'opportunités)

13 –CNIL, 2014 : *Communiqué G29, Avis sur l'Internet des objets*

La Commission Européenne prône notamment depuis 2009 sous forme de recommandation un « droit au silence des puces » qui aurait pour but de rendre à l'usager la maîtrise du partage de ses informations. Cette désactivation, possible mais non obligatoire pour les technologies d'Identification par Radio Fréquence (RFID), devant se faire sans frais. Cette éventualité devra donc être prévue par les fabricants lors de la conception de leur objet.

Aussi, se posent en France plusieurs questions[14], parmi lesquelles :

■ **La contractualisation :** les objets connectés ne sont à ce jour dotés d'aucun statut juridique. À ce titre, ils ne peuvent contractualiser directement avec un tiers dans le cadre de passage de commandes automatiques (ex : réfrigérateur connecté). Ils ne pourront pas non plus être considérés comme mandataires. C'est la réglementation de la vente en ligne qui s'applique, l'objet connecté n'étant considéré que comme un moyen de communication ;

■ **La défaillance de l'objet connecté** : afin de la corriger, une activation manuelle des fonctions de l'objet doit être prévue, ou bien l'objet doit être en mesure de détecter sa propre défaillance et de réagir en fonction (ex : voitures sans conducteur). Les transports connectés impliquent spécifiquement de réfléchir à la responsabilité du fait des choses ;

■ **La clarification dispositifs médicaux / objets connectés :** une clarification est nécessaire entre dispositifs médicaux et objets connectés de bien-être/santé. Les dispositifs médicaux sont soumis à une réglementation renforcée de protection des données de santé (loi Informatique et Libertés et Code de la santé publique), alors que les objets connectés de santé/bien-être sont dans un espace plus flou et en dehors du champ couvert par la réglementation actuelle.

Sécurité

L'article 34 de la loi Informatique et Libertés impose au responsable du traitement des données « *de prendre toutes les précautions utiles (…) pour préserver la sécurité des données et, notamment, empêcher qu'elles soient déformées, endommagées, ou que des tiers non autorisés y aient accès* » (sous peine d'emprisonnement et d'amendes).

D'un point de vue réglementaire, les enjeux majeurs sont donc de garantir la sécurité des utilisateurs et de leurs données et de déterminer l'acteur responsable en cas de défaillance.

Facteurs clés de succès et recommandations

Plusieurs **facteurs clés de succès** apparaissent ainsi pour le développement de l'Internet des objets en France ;

■ **Effort vers la standardisation des technologies et des protocoles de communication** pour faciliter l'interopérabilité des objets ;

■ **Développement de plateformes** de gestion des données personnelles et de communication entre objets **source d'avantage compétitif** face à la multiplication des objets connectés dans la société ;

■ Développement d'un avantage compétitif sur la **sécurisation et la protection des données** pour rassurer l'usager ;

■ **Facilitation de l'introduction et de la démocratisation des objets connectés** dans la sphère privée ;

■ Poursuite des **efforts de positionnement à l'international** ;

■ **Développement des capacités d'investissement** pour accélérer les entreprises existantes (dans la logique des accélérateurs de la French Tech notamment) ;

■ **Renforcement des partenariats grands groupes – start-up/PME** pour développer des offres intégrées et aller « en cordée » à l'international ;

■ **Garantie de la maîtrise des composants stratégiques et du maintien de briques essentielles** de la chaîne de valeur, en particulier sur le volet industriel.

14 –La semaine juridique, 2014 : *Les enjeux juridiques de l'Internet des objets*

Acteurs clés

Organisme de recherche et de formation

Parmi les principaux acteurs français de la recherche, on compte notamment : CEA-LETI, IRT B-Com, Inria, IEMN, IRCICA.

Plusieurs acteurs académiques proposent des formations dédiées à l'Internet des objets. Il s'agit notamment de l'École Polytechnique et de l'Université de Nantes (Polytech Nantes et l'IEMN-IAE) en association avec Télécom Bretagne…

Grands groupes

Les principaux groupes français dans le champ de l'Internet des objets sont Orange, Bouygues Telecom, Valeo, Airbus, Atos, Bouygues, Thales, Ineo, Veolia, Dassault, Eiffage, Seb, Archos, Alcaltel-Lucent, PSA Peugeot Citroën, Renault, Gemalto, Le groupe la Poste, Cisco France, Intel France, Axa, EDF R&D, Danone, Engie, Areva, ST Microelectronics et Legrand.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

Plusieurs ETI françaises sont présentes dans l'Internet des objets, à l'instar de Parrot ou Delta Dore.

PME et start-up

La France possède un écosystème de start-up et de PME actives dans les domaines de l'Internet des objets : Cityzen Sciences, Withings, Sigfox, Netatmo, Giroptic, MyFox, Sevenhugs, Airboxlab, Actility, SYS, Sen.se, Medissimo, Laster Technologies, Optinvent, Artefacto, Qowisio.

Organismes de soutien et d'interface

Ces entreprises sont soutenues et accompagnées par des structures de l'écosystème de l'innovation, à l'image des pôles de compétitivité Cap Digital, Images & Réseaux, Systematic et Minalogic.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

6 Infrastructures de 5ème génération

LOISIRS & CULTURE
ÉNERGIE, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
ENVIRONNEMENT, HABITAT, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Infrastructure, réseau mobile, fréquences radio, débit de données, latence, énergie, Internet des objets

© Fotolia

Définition et périmètre

Les infrastructures de 5ème génération désignent la **prochaine génération de réseaux mobiles 5G, qui succédera à la 4G vers 2020.**

La technologie 4G est efficace, mais ne pourra répondre seule à l'arrivée de nouveaux usages clients : l'Internet des objets, le M2M (*machine to machine*), l'implémentation « temps réel » d'applications innovantes, des services respectueux de l'environnement, une convergence fluide fixe-mobile partout, etc. Il s'agit principalement **d'assurer une couverture plus large et homogène du réseau,** de répondre au **défi de l'efficacité énergétique et d'assurer la connectivité avec les données massives de l'Internet des objets.** De tels usages requièrent une infrastructure très flexible, capable de déployer puis d'opérer très rapidement et facilement de nouveaux services. La 5G devrait aussi permettre d'assurer **la continuité et la qualité de l'expérience de l'utilisateur**, dans toutes les situations, quelle que soit sa localisation - au centre d'une grande agglomération, dans un village isolé ou encore à bord d'un train à grande vitesse.

Pour être un succès, la 5G doit aujourd'hui relever plusieurs défis afin de répondre aux attentes des citoyens et des entreprises :

- **Garantir la flexibilité nécessaire** pour que des innovations réseau soient déployées rapidement, à travers la généralisation d'approches logicielles (virtualisation des fonctions du réseau). Cette approche doit permettre de réduire le temps moyen de création d'un nouveau service de 90 heures à 90 minutes ;
- **Contribuer à réduire les coûts liés au réseau**, en particulier les coûts d'exploitation, en passant par des logiciels permettant des processus très automatisés ;
- **Accroître significativement l'efficacité énergétique** de l'économie numérique pour économiser jusqu'à 90 % d'énergie pour les différents services proposés ;
- **Accroître la capacité à acheminer efficacement le trafic de l'internet des objets, avec une vitesse de connexion pouvant dépasser 1 Gigabit par seconde.**
- **Créer un Internet sûr et fiable** qui accompagne toute la dynamique de la société numérique et permet un contrôle avancé de la sécurité pour les utilisateurs[1].

La 5G est toujours en cours de définition et de précision par les acteurs[2]. Un certain nombre d'éléments restent en effet à déterminer, comme par exemple l'identification et l'alignement de bandes de fréquence radio appropriées.

Si l'écosystème des acteurs du mobile ne s'est pas encore complètement accordé sur ce que sera la 5G, un consensus a été trouvé sur le fait qu'elle ne doit pas seulement être une technologie de réseau d'accès mais que le cœur de réseau devra également évoluer. Aujourd'hui, **deux visions coexistent[3],** dont l'association récurrente forme les prémices d'une définition de la 5G :

- **La vision hyper-connectée :** la 5G est ici considérée comme la combinaison de technologies existantes hétérogènes (Wifi, Bluetooth, interfaces radio…), dont l'association permet d'augmenter la qualité du service et de l'expérience pour l'usager (vitesse, couverture, disponibilité, densité et connectivité améliorées) ;
- **La technologie d'accès radioélectrique de nouvelle génération :** cette perspective fixe des objectifs quantifiés en priorité sur l'efficacité énergétique mais également sur le débit de données et la latence que de nouvelles interfaces radio doivent atteindre.

Ainsi, la 5G s'inscrira-t-elle **dans la continuité technologique de la 3G et de la 4G en cherchant à tirer le meilleur parti** de l'agrégation de plusieurs bandes de fréquences radio disjointes. Elle n'a pas vocation à remplacer la norme LTE-Advanced (norme de la 4G LTE-A) qui constitue au contraire un tremplin pour la 5G.

La 5G devra ainsi concilier une évolution des normes actuelles avec la mise au point de nouvelles technologies complémentaires. La 6G serait, elle, attendue pour 2030.

Une des ruptures de la 5G sera une utilisation du spectre au-delà des 5 GHz si elle est confirmée.

---

1 –Brigitte Cardinaël (Orange), 2015

2 –GSMA, 2014 ; *Understanding 5G: Perspectives on Future Technological Advancements in Mobile*

3 –GSMA, 2014 ; *Understanding 5G: Perspectives on Future Technological Advancements in Mobile*

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Caractère stratégique

L'enjeu de la standardisation des normes de télécommunication mobile à l'échelle mondiale est hautement stratégique et les équipementiers télécoms s'y préparent. L'acteur qui contrôlera l'accès aux technologies (et obtiendra le plus de *royalties*) sera aussi celui qui bénéficiera du meilleur espace d'innovation pour le marché de produits et services numériques associés. On observe néanmoins le développement de *l'Open Source* dans les technologies liées au réseau avec l'arrivée de la 5G, ce qui est susceptible de bouleverser la concurrence.

La 5G fait ainsi l'objet d'une compétition mondiale entre équipementiers télécoms[4]. **La Commission Européenne a mis en place le consortium *5G Infrastructure Public Private Partnership* (5GPPP)**[5] qui a pour objectif d'assurer le l*eadership* européen, de soutenir le développement de standards de 5G, de développer et d'exploiter au moins 20 % des brevets SEP[6], et de renforcer l'industrie européenne pour réussir la transition vers la 5G (**investissements de 1,4 milliards d'euros**[7] dont 700 millions apportés par l'UE). Parmi les membres du consortium, on retrouve notamment les industriels français Alcatel-Lucent, Atos, Orange Labs et Thales Alenia Space, ainsi que le centre de recherche CEA-LETI, et des PME, telles que Sequans Communications.

L'Union Européenne finance ou cofinance par ailleurs des programmes, tels que 5G now, IJoin, Tropic et METIS (*Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society*). Elle s'est associée avec plusieurs pays moteurs du très haut débit mobile, comme le Japon et la Corée du Sud, à travers la signature d'**accords permettant d'unifier les efforts en matière de recherche et développement, de standards globaux et d'interopérabilité des systèmes utilisés.** Un partenariat avec la Chine est également prévu.

Le chinois **Huawei** a pour sa part annoncé un investissement en France de **600 millions de dollars** (530 millions d'euros) dans le développement de la 5G. En janvier 2014, le gouvernement de la Corée du Sud a indiqué **investir 1,5 milliard de dollars** (1,3 milliard d'euros) pour soutenir le déploiement de services 5G.

Les activités mondiales de recherche et d'expérimentation sur la 5G sont au global estimées à près de **4,5 milliards d'euros**, avec un taux de croissance annuel de 40 % dans les cinq prochaines années[8]. **Ces investissements et manœuvres stratégiques illustrent la « bataille »** en cours autour de la maîtrise des infrastructures, des technologies, et donc du potentiel marché lié à la 5G.

Atouts de la France

Les acteurs français sont mobilisés, notamment *via* le 5G PPP.

Les grands groupes industriels des télécommunications sont engagés dans la course à la 5G. Alcatel-Lucent réalise plus de **2,2 milliards d'euros d'investissements annuels dans la recherche et le développement, parmi lesquels la 5G**.

Les équipes d'Orange sont elles aussi engagées dans la recherche et la définition de la norme 5G aux côtés d'autres opérateurs, équipementiers télécoms et centres de recherche[9], via sa division R&D **Orange Labs, dotée d'un budget global annuel de 820 millions d'euros**. Orange a également fondé, avec un groupement de PME, l'Inria, l'Insa de Rennes, Supélec, Télécom Bretagne, l'université de Rennes-I et le pôle de compétitivité Images&Réseaux, l'**IRT B-Com**, qui se consacre notamment aux réseaux mobiles très haut débit et dispose d'un **budget de 250 millions** d'euros sur 10 ans.

La France bénéficie également du dynamisme des activités de R&D d'autres groupes industriels, mais aussi de PME, start-up, centres de recherche et établissements académiques.

Certaines start-up et PME pourront jouer un rôle partenarial important auprès des opérateurs et équipementiers dans la définition de la norme 5G et le déploiement

4 –Les Echos, 24/12/2013 : *Equipementiers: la bataille de la 5G a déjà commencé*

5 –Commission Européenne, 2015 ; *5G Vision : The 5G infrastructure public private partnership : the next generation of communication network and services*

6 –Données de *5GPPP*

7 –Silicon, Ulrich Dropmann, NSN, 04/02/2014 : *L'Europe profitera de la 5G pour combler son retard*

8 –Radiant Insights, 2015 : *The 5G Wireless Ecosystem: 2015 - 2025 - Technologies, Applications, Verticals, Strategies & Forecasts*

9 –Site d'Orange : *La 5G: vers l'Internet mobile du futur*

des infrastructures. En 2015, **Eblink a réussi à lever 30 millions d'euros** pour développer et commercialiser sa technologie *wireless fronthaul* (technologie de réseau sans fil pour les architectures de réseaux mobiles), **dont 3 millions auprès d'Alcatel-Lucent.**

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Internet des objets :** la 5G présente un lien fort et direct avec l'Internet des objets, puisqu'elle y trouve une de ses justifications. La 5G est en effet pensée pour l'Internet des objets et permettra ainsi de connecter entre eux d'innombrables objets. Elle contribuera à supporter les données de milliards d'objets connectés en réseau dont le nombre croîtra significativement dans les cinq prochaines années[10] ;

■ **Capteurs :** en lien avec le développement de l'Internet des objets, la 5G devra relever le défi de supporter des milliards de connexions à bas débit entre capteurs connectés ;

■ **Valorisation et intelligence des données (*Big Data*)** : le développement de la 5G permettra de soutenir les solutions de collecte et de traitement Big Data grâce à la possibilité offerte par ces nouvelles infrastructures de traiter un volume de données très important en un temps restreint ;

■ **Réseaux électriques intelligents (*Smart grids*)** : ces réseaux électriques, qui fonctionnent grâce à des technologies informatiques, permettent notamment d'offrir un service optimal à des régions rurales éloignées. La 5G permettra d'augmenter davantage leur qualité de service et leur surveillance.

Les marchés

La 5G sera un des **facilitateurs clés du monde numérique de demain**. Elle accompagnera l'**évolution des processus** et l'**augmentation de la demande**, liés au développement de l'Internet des objets en particulier. On estime qu'il y aura en 2020 trente fois plus de trafic Internet mobile qu'en 2010[11].

Cette multiplication des objets connectés dans un nombre croissant de champs d'application (en santé, domotique, textile, transport, agroalimentaire, *etc.*) et les apports de la 5G en termes d'accélération de la vitesse de traitement des données (débit plus important, délai de latence réduit) **laissent entrevoir des opportunités de nouveaux débouchés en termes de services dans tous les secteurs économiques**.

La Commission européenne a plus particulièrement identifié **certaines des applications que la 5G devrait faciliter et améliorer** grâce à ses capacités et sa fiabilité[12] :

■ **E-santé** : télé-chirurgie ;

■ **Maisons connectées (domotique)** : pilotage des équipements à distance ;

■ **Transport sécurisé** : sécurité routière et anticipation des dangers, voitures connectées et autopilotées, systèmes de freinage automatiques ;

■ ***Smart grids***, ou réseaux d'énergie intelligents ;

■ **Divertissement** : amélioration du service dans un stade de 50 000 personnes (à titre d'exemple).

En attendant l'arrivée de la 5G, les **revenus des services LTE** sont estimés à **150 milliards d'euros**, et devraient **croître de 30 % par an** dans les cinq prochaines années[13].

Le marché de la LTE pourrait représenter **plus de 20 % des connexions mobiles d'ici 2020**[14].

Les défis technologiques à relever

Alors que la 4G a été conçue pour favoriser l'Internet mobile, la 5G devra traiter et supporter les données de milliards d'objets connectés qui feront partie de notre quotidien dans les années à venir. Les infrastructures réseaux devront donc être en mesure de subvenir aux besoins et à la demande d'une digitalisation mondiale toujours croissante. **Le challenge global est donc de fournir la capacité suffisante à des milliards de dispositifs, à un coût abordable, dans une optique durable, afin d'assurer une qualité de service et une couverture optimale.**

10 –15 milliards d'objets connectés en 2014, 50 à 80 milliards en 2020 selon les estimations (IDATE)

11 –Commission Européenne, 24/02/2014: *What 5G can do for you*

12 –Ibid

13 –ReportsnReports, 2015 ; *LTE, LTE-Advanced & 5G Ecosystem: 2015 – 2020 – Infrastructure, Devices, Operator Services, Verticals, Strategies & Forecasts*

14 –Gartner, 2013 : *4G and 5G, a market update*

Les solutions optiques, cellulaires et satellitaires de la 5G s'appuieront principalement sur des technologies émergentes déjà commercialisées[15], telles que :

- Network Functions Virtualization (NFV) ;
- Software Defined Networking (SDN) ;
- Heterogeneous networks (HetNets) ;
- Mobile Edge Computing (MEC) ;
- Fog Computing (FC) ;

En particulier, **les technologies NFV et SDN devraient jouer un rôle clé** pour répondre aux exigences de la 5G en termes de capacité et de réactivité. Ces technologies facilitent la gestion du réseau pour les administrateurs (automatisation) et promettent de nouveaux services pour les opérateurs[16]. Elles permettent en outre de réaliser des économies substantielles en termes d'investissements et en coûts de maintenance.

Élargissement de la capacité du réseau, passage à une nouvelle échelle

Les données sont transmises par des ondes radio, divisées en bandes de différentes fréquences. **Des connexions fonctionnant sur différentes fréquences radio seront établies afin de répondre à la demande croissante**. **Cette réallocation des fréquences radio est un des éléments clés de la 5G.** Afin d'ouvrir la voie à la 5G, l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) repense actuellement l'allocation du réseau radio utilisé pour transmettre les données, tout en permettant aux réseaux existants (3G et 4G) de continuer à fonctionner.

Cyber sécurité

Par ailleurs, la virtualisation et l'utilisation de normes hétérogènes (Wifi, Bluetooth, protocoles à bas débit, etc.) dans la future 5G **renforceront le besoin d'assurer la sécurité du réseau et donc de ses infrastructures**. La cyber sécurité devra être prise en compte de bout en bout avec des **processus adaptables aux exigences de sécurité de chaque appareil connecté**, en fonction du risque corrélé (accru avec les voitures connectées, par exemple).

Intégration des satellites, ballons stratosphériques et drones au déploiement de la 5G

Les satellites pourraient jouer un rôle majeur en s'intégrant aux autres réseaux pour assurer le déploiement de la 5G dans toutes les régions du monde, en permanence, et à un coût compétitif. **Ils contribueraient ainsi à augmenter la capacité de service de la 5G** (gestion du trafic de données, couverture, communication M2M...) tout en permettant aux utilisateurs finaux de bénéficier de la 5G à un coût abordable.

Les ballons stratosphériques et drones figurent également parmi les solutions envisagées pour offrir une couverture réseau à toutes les régions du globe, même les plus reculées, **et renforcer l'efficacité des réseaux existants**. Google a ainsi expérimenté, en partenariat avec le CNES, la mise en place d'un réseau de ballons, Loon, à vingt kilomètres au-dessus de la Terre. La phase de test a commencé en 2013. Les drones pourraient également jouer le rôle d'antennes relais, notamment ceux de la marque Titan, rachetée par Google.

Femtocell

La technologie Femtocell (antenne résidentielle reliée à l'Internet fixe) **s'avère également opportune** pour les réseaux entreprises ou domestiques. Elle permet de créer un mini-réseau sur son lieu de travail ou chez soi et ainsi d'offrir un service plus efficient à ceux qui rencontrent des difficultés de connexion dans des zones moins bien couvertes. Cette technologie pourra servir de transition dans des zones peu couvertes en attendant un déploiement plus exhaustif de la 5G.

5G verte et moindre consommation d'énergie

La 5G devra relever le défi de gérer l'augmentation du nombre d'objets connectés, du trafic de données, et des hétérogènes **sans augmenter de façon majeure la consommation d'énergie[17]. La mise en œuvre d'un réseau optimisé économe en énergie constitue donc un vrai challenge,** en travaillant sur l'architecture et le déploiement du réseau, les transmissions radio, et les solutions d'accès. L'intégration d'antennes massives (drones, satellites, ballons stratosphériques) pourrait construire un réseau à la fois plus efficient et économe en énergie.

15 –Commission Européenne, 2015 ; *5G Vision ; The 5G infrastructure public private partnership ; the next generation of communication network and services* (+ site Internet du cluster Systematic)

16 –Silicon, 02/09/2014 : *SK Telecom et Ericsson-LG préparent la 5G à coup de SDN*

17 –Commission Européenne, 2015 ; *5G Vision : The 5G infrastructure public private partnership : the next generation of communication network and services*

L'enjeu de ces économies d'énergie **est également de moins solliciter les batteries des *Smartphones* et objets connectés, et d'augmenter leur autonomie jusqu'à plusieurs jours voire plusieurs années pour certains objets connectés**. Les usagers seront sensibles à la prise en compte du développement durable dans le domaine du numérique.

Exigences techniques et fiabilité

La 5G devra comprendre un plus fort déploiement de la fibre optique, qui permet un plus grand volume de bande passante afin d'éviter les pertes et saturations que l'on constate encore à l'heure actuelle sur les réseaux mobiles.

Les principaux enjeux technologiques à relever pour la 5G sont ainsi **d'assurer l'homogénéité de la couverture du réseau** et de concevoir des architectures de réseau en mesure de traiter des volumes de données de plus en plus élevés et des débits importants en s'assurant de délais de latence (transit) réduits**.** La latence de la 5G sera imperceptible pour l'humain et environ 50 fois plus rapide qu'avec la 4G.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Implémentation commerciale de la 5G

Alors que le très haut débit et la latence réduite de la 5G laissent présager de **nouvelles opportunités de services optimisés, sûrs et efficaces** dans de nombreux domaines d'application, avec une **expérience usager globale et inédite**, il n'en reste pas moins à apporter la preuve de son utilité et de sa légitimité. En effet, la 4G et la 4G+ offrent encore aux acteurs de l'écosystème des télécoms et du numérique des opportunités significatives de développement.

La 4G ne représente qu'environ 5 % des connexions mobiles mondiales à l'heure actuelle, et seulement 2 % dans les pays en développement[18]. La 4G+ comptait, fin 2014, 100 millions d'utilisateurs dans le monde, avec un potentiel estimé de 1 milliard dans les trois prochaines années[19].

Tant que cette phase de développement n'a pas commencé, le coût de la 5G est difficile à évaluer pour les industriels des technologies de l'information et de la communication. En Corée du Sud, Samsung espère lancer un réseau d'essai 5G temporaire pour les Jeux Olympiques d'Hiver de 2018, et Huawei pour la Coupe du Monde de Football en Russie la même année, ainsi qu'un *smartphone* compatible.

Gestion de la croissance de la demande (clients, usages) : quality of service (QoS), quality of experience (QoE)

Le réseau devra faire face à une **importante augmentation de la demande en communications et relever le défi de l'Internet des objets** en permettant de connecter un nombre exponentiel d'objets.

Dans le cas des voitures connectées par exemple, la 5G devra permettre d'élaborer de véritables systèmes de prévention des accidents, avec une transmission des données suffisamment rapide et un temps de réponse suffisamment faible pour que le véhicule prenne les bonnes décisions. **Les réseaux actuels ne sont pas encore assez fiables ni solides.**

La 5G devra être suffisamment ouverte et simple d'utilisation pour permettre de créer facilement de nouveaux produits ou services compatibles.

Les enjeux réglementaires

Ambition européenne

La création d'un **marché unique du numérique** figure parmi les priorités européennes.

L'Union Européenne devrait ainsi poser les bases d'un cadre réglementaire assoupli pour sécuriser son leadership sur la 5G face aux géants asia-

18 –GSMA, 2014 ; *Understanding 5G, Perspectives on Future Technological Advancements in Mobile*

19 –Econocom, 03/03/2015 : *Au #MWC15, on parle aussi d'antennes-relais stratosphérique*

tiques et américains. Les objectifs seront de favoriser l'accélération de la R&D et l'attractivité pour les investisseurs, de garantir la standardisation des normes et la refonte des règles de la concurrence pour voir émerger de grands groupes au niveau européen puis mondial.

Neutralité du web

Après des années de débat aux États-Unis, **la neutralité des réseaux a été adoptée en 2015 par une décision de la Federal Communications Commission (FCC) américaine**[20]**,** et ce malgré un important lobby des opérateurs de télécommunication contre cette évolution.

Ce principe **vise à garantir l'égalité de traitement de tous les flux de données Internet sur le territoire américain**, considérant ainsi Internet comme un « bien public ». Ce principe exclut toute discrimination à l'égard de la source, de la destination ou du contenu de l'information transmise sur le réseau.

Le gouvernement français a également annoncé en juin 2015 vouloir faire de la neutralité du web un axe majeur de son projet de loi sur le numérique, annoncé pour la fin 2015 et soumis au débat public[21].

Analyse AFOM

ATOUTS

Innovation technologique des grandes entreprises

Développement de plusieurs PME et start-up françaises

Excellence des filières académiques

FAIBLESSES

Retard de l'UE dans le déploiement de la 4G

OPPORTUNITÉS

Développement soutenu de l'Internet des objets

Ambition de l'Union Européenne sur la 5G et création d'un marché unique du numérique

Accord entre l'Union Européenne et la Corée du Sud, le Japon et la Chine pour des partenariats industriels

Enjeux sur la 5G verte et la réduction des consommations d'énergie / *green mobile networks*

MENACES

De grands industriels internationaux positionnés sur le marché de la 5G tels que Samsung (Corée du Sud) et Huawei (Chine)

4G sous-utilisée aujourd'hui en Europe (10 % des européens) et active jusqu'en 2030 (pouvant ainsi retarder le démarrage commercial de la 5G)

Incertitude sur les coûts de développement et de déploiement de la 5G

20 –Le Monde, 26/02/2015 : *États-Unis : victoire cruciale pour la neutralité du Net*

21 –La Croix, 18/06/2015 : *Manuel Valls dévoile la stratégie numérique du gouvernement*

Facteurs clés de succès et recommandations

Plusieurs **facteurs clés de succès** apparaissent ainsi pour saisir au plus tôt les opportunités qu'offre la 5G et se positionner en tant que leader dans sa définition, notamment aux côtés d'autres acteurs européens :

- Intégration dans des projets de recherche conjointe avec d'autres acteurs européens (grands groupes, PME, centres de recherche…) afin de peser sur la scène mondiale et se placer aux avant-postes de la mise en place des standards 5G ;
- Prise en compte des principes du développement durable et recherche d'économies d'énergie ;
- Proposition de solutions de cyber sécurité flexibles et adaptables selon les situations, dans un contexte de virtualisation des réseaux ;
- Développement de produits, services et applications qui respectent les deux exigences techniques fondamentales de la 5G (débit supérieur à 1 gigabit/seconde et latence inférieure à 1 milliseconde) ;
- Poursuite des investissements des grands opérateurs télécoms dans le développement des infrastructures.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

Parmi les principaux acteurs français de la recherche, on compte notamment : IRT SystemX, IRT B-Com, Inria, LINCS, NOVEA, Institut Mines-Télécom, IRISA, CEA-LIST, le CNES

Dans le champ académique, il s'agit notamment de Supélec, Eurecom, Telecom ParisTech, Université Pierre et Marie Curie, Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes Insa de Rennes.

Grands groupes

Orange, Free, Bouygues Telecom, Alcatel-Lucent, Numéricâble-SFR, Sagem, Hub One, TDF, Thales, Airbus, Alten, Atos, Bull et Sequans Communications comptent parmi les principaux groupes français dans le domaine des infrastructures 5G.

Start-up et PME

Plusieurs start-up et PME françaises sont présentes dans ce domaine, en particulier Sigfox, Siradel, Amarisoft, Eblink et Simpulse.

Organismes de soutien et d'interface

Ces entreprises sont soutenues et accompagnées par des structures de l'écosystème de l'innovation : Systematic, Images&Réseaux, Cap Digital, Elopsys, Minalogic, Smart-Grids France, Aten et Solutions Communicantes Sécurisées

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

7 Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs

Loisirs & culture
ÉNERGIE, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
ENVIRONNEMENT, HABITAT, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Sécurité, systèmes embarqués, fiabilité, robustesse, sûreté de fonctionnement, architecture distribuée, parallélisme, système de systèmes

© THALES B. Rousseau

Définition et périmètre

Les systèmes embarqués sont définis comme des ensembles matériels / logiciels intégrés dans le but d'effectuer des tâches fonctionnelles précises. Les systèmes et logiciels embarqués jouent un rôle majeur dans la quasi-intégralité des secteurs industriels et sont très présents au sein d'industries historiques : les transports terrestres et l'aéronautique, le nucléaire, la défense et l'espace, les télécommunications (téléphones portables, assistants personnels, applications internes chez les opérateurs).

Ils jouent et joueront un rôle de plus en plus important dans de nombreux autres secteurs comme :

- la production, la distribution et la gestion de l'utilisation de l'énergie,
- la production industrielle (automatique, systèmes discrets et continus),
- l'instrumentation médicale,
- le bâtiment (domotique),
- l'électronique grand public (terminaux mobiles, multimédia, jeux et loisirs numériques),
- la logistique (commerce et distribution),
- les infrastructures urbaines (eau, trafic, captation de la qualité de l'air),
- la sécurité (vidéosurveillance, moyens d'identification)
- les transactions bancaires et commerciales (terminaux de paiement, cartes à puce).

Les prochaines générations de systèmes embarqués regrouperont deux natures d'innovation:

- **Dans les systèmes embarqués** : adoption de processeurs à très haute performance programmables, connectivité à Internet, haut niveau de systèmes d'exploitation et autres intergiciels
- **Dans le réseau global digital** : adaptation à l'émission / réception de données et de services issus d'Internet

Santé

La sécurité constitue un enjeu fort, de la protection des données à la manipulation à distance des objets connectés. La majorité des équipements (IRM, scanners et autres) n'ont pas été conçus en faisant de la sécurité une priorité. La connectivité des composants des systèmes embarqués avec des couches supérieures ou d'autres systèmes (configuration « Systèmes de systèmes ») implique de sécuriser ces différentes couches. Pour exemple, il a été démontré en 2011 que les pompes à insuline pouvaient faire l'objet d'attaques à distance et délivrer une dose létale d'insuline au patient via la modification de ses paramètres d'injection.

Sécurité

Dans le domaine de la sécurité, la criticité de certaines applications demande un haut niveau de sécurité et de sûreté de fonctionnement tels que dans l'aéronautique (pilotage automatique), le nucléaire (contrôle-commande), l'aérospatiale et autres applications militaires (communications)… La connectivité à Internet, de plus en plus présente, demande de revoir les techniques de sécurité pour se prémunir de prises de contrôle à distance. Des failles ont été montrées quant aux communications échangées entre les stations de contrôle et des aéronefs. En 2015, le FBI enquête sur une éventuelle introduction d'un hacker sur un avion de ligne commerciale. Bien que faiblement probable à l'heure actuelle, l'interconnexion grandissante des systèmes informatiques à bord des avions de ligne augmente ce risque de scénario. À l'image du *Smart Specialization Platform* (S3P) « android industriel », des groupes de travail étudient les architectures permettant de maximiser la sécurité du logiciel de contrôle de vol, comme notamment les hyperviseurs de sûreté et de sécurité.

Énergie

De la production à la distribution, les technologies de l'embarqué sont présentes sur l'ensemble de la filière énergie (Contrôle-commande des centrales nucléaires, conversion d'énergie dans les éoliennes, supervision des réseaux de transport d'électricité). L'émergence des Smart Grids (réseaux intelligents) demandera de déployer de nombreux instruments déportés capables d'interagir avec des systèmes de supervision amont pour maîtriser la production et la fourniture d'énergie.

Mobilité

Les systèmes embarqués sont déjà présents dans les véhicules au travers de l'assistance au freinage (système ABS), des régulateurs de vitesse et autres fonctionnalités (Électronique de contrôle dans les systèmes de châssis, dans l'électronique des chaînes de traction, dans le corps électronique et de sécurité des systèmes).

Les nouvelles générations de véhicules en émergence, et déjà en développement chez Google, GM et

Nissan par exemple, sont de plus en plus connectés et communicants avec leur environnement (technologie V2I : *Vehicle to Infrastructure*) favorisant ainsi le développement de nouvelles applications ITS (*Intelligent Transport System*) pour l'amélioration de la gestion du trafic, de la sécurité routière et des services de mobilité et de confort. Cette révolution automobile engendre de nouveaux défis technologiques et économiques ; la conception de véhicules coopératifs interopérables, un système de management de la sécurité pour les communications, ainsi que la préparation de systèmes fiables et sécurisés pour les futurs véhicules autonomes connectés. Ces systèmes communicants V2V/V2I auront donc besoin de sécurité et confiance numérique ainsi qu'une définition fiable et robuste du partage des données qui seront générées.

Trains, tramways, métros et bus constituent aussi un autre terrain de prédilection pour les technologies de l'embarqué. Le système Traintracer d'Alstom, par exemple, permet de récupérer à distance les données de fonctionnement des rames pour optimiser leur maintenance. L'aviation civile et militaire embarque également un grand nombre de systèmes embarqués (pilotage automatique, connectivité internet, infotainment…).

■ Télécommunications

Les systèmes embarqués sont présents sur l'ensemble des infrastructures de communication et appareils terminaux (box Internet ou stations de base de réseaux mobiles). La sécurité des communications est un enjeu fort. Pour plus de détails, se référer à la fiche n°7 « Communications sécurisées ».

■ Loisirs & culture

Les systèmes embarqués se retrouvent dans un grand nombre d'articles électroniques (décodeurs), terminaux finaux d'accès à internet (tablette, *smartphone*), électroménager, matériel audio – vidéo. Bien que moins critiques, la sécurisation de ces éléments n'en demeure pas moins importante.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les Systèmes embarqués distribués sécurisés et sûrs sont :	
2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
13	Communications sécurisées
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
34	Authentification forte

Les technologies influencées par les systèmes embarqués distribués sécurisés et sûrs sont :	
2	Capteurs
5	Internet des objets
10	Cobotique et humain augmenté
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées
22	Réseaux électriques intelligents
31	Dispositifs bio-embarqués
40	Systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment

Les marchés

Selon le cabinet International Data Corporation, le marché des systèmes embarqués intelligents (tout équipement architecturé autour d'un microprocesseur, d'une interface de connectivité et d'un système d'exploitation et/ou d'une interface utilisateur de haut niveau, à l'exception des PC, des *smartphones*, des serveurs et des tablettes) dépassera les 1 000 milliards de dollars en 2019[1] pour 8,5 milliards d'unités vendues (plus d'un quart du volume total adressable par les systèmes embarqués).

Les segments de marché à forte croissance attendue sont :

■ l'assistance à la conduite et la gestion de consommation d'énergie dans le domaine des transports,

1 – https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS25204914

■ les dispositifs portés sur soi et les systèmes d'éclairage intelligents dans le domaine de l'électronique grand public,

■ les systèmes de pathologie numérique et de métrologie virtuelle dans le secteur de la santé,

■ les passerelles dédiées dans le secteur industriel.

En France, en 2013, les systèmes embarqués représentaient un marché de 73,3 milliards d'euros (3,7 % du PIB)[2] avec une croissance annuelle prévisionnelle de 3,3 % jusqu'en 2017 (soit 83,6 milliards d'euros) selon une étude de l'OPIIEC (Observatoire Paritaire des métiers de l'Informatique, de l'Ingénierie, des Études et du Conseil).

Figure 1: Rapport complet sur le développement des systèmes embarqués - OPIIEC 2014

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le caractère fortement diffusant de la solution, s'étendant à la quasi-intégralité des autres technologies, fait des systèmes embarqués une technologie clé. L'internet des objets accentue la place des systèmes et logiciels embarqués dans le quotidien et accroît plus que jamais la maîtrise des technologies de ces systèmes pour en faire un élément clé de la compétitivité industrielle.

Les défis technologiques à relever

Le caractère communicant des systèmes embarqués remet en cause les techniques actuelles de conception et de validation et conduit à de nouveaux défis, sur la sécurité en particulier[3].

Les principaux défis à relever sont:

■ **La sécurité et sûreté:** elles sont aujourd'hui traitées dans un environnement d'ingénierie des exigences, de modélisation des propriétés fonctionnelles et non fonctionnelles et d'approches formelles (ingénierie d'analyses statiques, preuves formelles, vérification, génération automatique de codes, de tests, analyse pour diagnostic). Les prochains défis seront de réussir à considérer l'incertitude de comportements, à réaliser des simulations hybrides mixant événements discrets et continus et à disposer de preuves de bons fonctionnements. L'évolution des règles et des pratiques de certification seront donc deux challenges à relever. La modélisation et le développement d'outils permettant de traiter conjointement la sécurité et la sûreté de fonctionnement deviennent nécessaires. Les nouveaux domaines d'application (informatique embarquée, intelligence ambiante, Internet des objets) et les nouvelles architectures (informatique dans les nuages, *Software as a Service* ou système de systèmes) font émerger de nouvelles propriétés ou contraintes (architectures reconfigurables, dynamique de l'environnement, évolution des usages), en plus des propriétés classiques. Un défi majeur consiste alors à revoir les méthodes de Validation et de Vérification (V&V) pour prendre en compte ces nouvelles architectures et les nouvelles propriétés associées, notamment par la simulation des systèmes cyberphysiques (Hardware in the Loop, Software in the Loop et Processor in the Loop – cf. Nouvelles intégrations matériel-logiciel). Dans ce cadre, la sécurisation des communications et l'authentification sont deux axes prioritaires. Il convient de développer les

2 – http://www.fafiec.fr/images/contenu/menuhaut/observatoire/etudes/2013/systemes-embarqu %C3 %A9s/SE-Developpement_economique_des_SE_-_20140606.pdf

3 – http://www.systematic-paris-region.org/sites/default/files/ROADMAP %20OCDS %20F %C3 %A9vrier %202015.pdf
https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/embedded-systems
https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/cyberphysical-systems-0
https://artemis-ia.eu/embedded-cyber-physical-systems.html
http://www.ecsel-ju.eu/web/index.php
http://www.smart-systems-integration.org/public/documents/presentations/presentations-at-the-ssi-2015-in-copenhagen-11-12-march-2015

algorithmes, outils ou méthodes permettant de les garantir, au niveau de ces infrastructures ;

■ La détection des attaques, la mise en place de modes résilients, autoréparables,

■ La gestion de l'hétérogénéité et de l'interopérabilité sécuritaire intra et inter-réseaux.

■ **L'Open source** représente une poche de productivité. Elle se développe depuis près de 25 ans mais reste en général minoritaire, toutefois pas en nombre d'utilisateurs, dans l'informatique et encore plus dans les systèmes et logiciels critiques embarqués à l'image d'OpenModelica, OpenCompute, OpenStack ou encore Android. L'ouverture peut être un facteur important de fiabilité et de sécurité : une utilisation à plus grande échelle des codes et la diversité des vérifications réalisées par des équipes aux techniques différentes contribuent à rendre optimale la détection de failles. Elle permettrait aux développeurs de disposer de bases communes ayant prouvé leur efficacité pour leur nouveaux développements. L'Open Source pourrait ainsi devenir un gage en termes de qualité et de sécurité des systèmes critiques.

■ **Le management des architectures distribuées et l'autonomie des systèmes** : La complexité croissante de notre environnement produit de très grands systèmes, le plus souvent concurrents, distribués à grande échelle et parfois composés d'autres systèmes appelés « Système de Systèmes » (résultat de l'intégration de plusieurs systèmes indépendants et interopérables, interconnectés dans le but de faire émerger de nouvelles fonctionnalités). La conception et la simulation de grands systèmes logiciels multi-niveaux et multi-échelles sont deux forts enjeux.

Le traitement en temps réel: la mise à disposition d'outils de développement pour les architectures orientées service et connectées au web permettra le traitement et la simulation en temps réel. Également présentes dans S3P, des recherches ont déjà été menées dans ce sens par le CNRS pour le compte de Schneider Electric (dont la valorisation des travaux est réalisée par la start-up Krono Safe[4]).

■ **Virtualisation, architecture multi-cœurs et algorithmes embarqués ;** la plupart des systèmes embarqués informatiques, des *smartphones* jusqu'aux accélérateurs de calculs (GPUs, FPGA, supercalculateurs) sont pourvus de systèmes multi-cœurs. Ces matériels mettent le parallélisme à portée de tous les acteurs bien qu'il reste d'une grande complexité. La mise en place de plateformes de plus en plus hétérogènes accroît cette complexité et le gain en performance se fait en utilisant des processeurs dédiés à des tâches définies. Il devient nécessaire de revisiter les langages (parallèles), mais également les moyens de construire les logiciels, tout en respectant des contraintes liées à l'espace et au temps et à la consommation de l'énergie en vue de diminuer les coûts de développement. Les systèmes embarqués devront également faire face à une demande de tolérance aux pannes de plus en plus exigeante et permettant une adaptabilité et une dégradation contrôlée des systèmes qu'ils régissent. L'évolution des principes de partitionnement, de reconfiguration, de dynamicité et d'évolutivité en sont donc les principaux enjeux.

■ **Le management de l'énergie** : certains secteurs opèrent dans des contraintes spécifiques dans lesquelles l'accès à l'énergie est limité. La consommation des systèmes embarqués est en grande partie due au mouvement et au stockage des données. Pour s'adapter à cette problématique, les compilateurs doivent prendre en compte la trace mémoire et les mouvements de données qui s'effectuent sur des unités de calcul différentes. La compilation à performances prédictives rend ce problème d'autant plus complexe et nécessite d'être abordé dans le futur.

■ **Les algorithmes embarqués** : ce sont des bibliothèques génériques utiles pour le traitement de signal et de l'image, le contrôle et la gestion de l'énergie embarquée. Cet axe prend place dans un contexte

4 – http://www-list.cea.fr/images/stories/decouvrir-le-cea-list/qui-sommes-nous/rapport-dactivite/Rapport-dactivite-CEA-2013_web.pdf
https://www.bitkom.org/files/documents/ES_Symposium_2011_Vortrag_Petrissans_IDC.pdf

d'exécution des algorithmes sur machines cibles. Les algorithmes doivent traiter de manière intensive les données générées dans des contextes variés (architectures homogènes ou hétérogènes, multi-cœurs), dans un contexte de tolérance aux pannes et de résistance au vieillissement. Les principaux défis sont d'obtenir la meilleure adéquation possible des algorithmes et des architectures de calcul et de garantir les propriétés opérationnelles : estimation exacte ou approchée des temps de réponse, gestion de l'énergie, mécanismes d'auto-surveillance et de reconfiguration inspirés des systèmes d'information, exploitation au niveau applicatif des mécanismes de bas niveau, tolérance aux SEU (*Single Event Upset*) et vieillissement avec dégradation contrôlée.

Les défis commerciaux à relever

Pour les secteurs « historiques » (défense, aéronautique, spatial, nucléaire...) : il s'agira d'effectuer la rénovation des solutions existantes. Pour les secteurs « Internet des objets »: l'exploitation de la croissance du secteur permettra d'accroître l'empreinte des acteurs français et européens dans les technologies de base.

La protection des éditeurs de technologies cœur présente ainsi un énorme effet levier sur les emplois indirects : elle permettrait l'éclosion d'usines pour logiciels embarqués sur des milliards de puces électroniques et la relocalisation des productions. En Europe il y a peu d'acteurs de taille moyenne (Kalray par exemple) mais on note la présence de startups avec des ambitions en France faisant de cet axe un enjeu stratégique.

Les mouvements participatifs fleurissent sur Internet et l'Open Source fait partie intégrante de ce nouveau modèle. Ce système économique permet de partager les coûts de développement, offrant ainsi un moyen à l'industrie de réduire ses dépenses en mutualisant les compétences. Cependant, le partage des sources demande de repenser les modèles économiques pour pallier la perte de l'avantage technologique d'un acteur sur son concurrent. Un des challenges est donc de trouver un business model viable pour les éditeurs de logiciels spécialisés dans ce type de développement puisqu'ils seront privés de licences propriétaires et de brevets.

Les enjeux réglementaires

Les architectures logicielles embarquées sont soumises à un processus de certification qui nécessite un développement très rigoureux pour assurer des fonctions critiques soumises à des contraintes très fortes. L'intégration des fonctionnalités de plus en plus complexes dans les logiciels embarqués rend à présent difficile la mise en œuvre des méthodes formelles. Les techniques de vérification souffrent également du problème d'explosion combinatoire du nombre de comportements des modèles, induite par la complexité interne du logiciel qui doit être vérifié. Les méthodes de preuve ou de vérification de programmes devront évoluer vers des certifications garantissant qu'un logiciel fournit les services attendus et définis par les utilisateurs, et pouvant prendre en compte, le cas échéant, la dimension « temps-réel » des systèmes embarqués.

Analyse AFOM

ATOUTS

Grand nombre d'acteurs français expérimentés

Excellence de l'école mathématique française

Pôles de compétitivité de référence

Association Embedded France

Leader mondial dans l'embarqué critique temps réel

FAIBLESSES

Décloisonnement des acteurs en cours

Excellence en langage distribué à renforcer

Passage d'une R&D industrielle à la production

Poids de l'écosystème national pour influencer les standards internationaux

OPPORTUNITÉS

Dialogues entre acteurs au travers de l'association Embedded France

Secteurs émergents (médical, bâtiments intelligents, objets connectés, usine du futur)

Relocalisation des productions

MENACES

Pénurie de talents disponibles

Concurrence des éditeurs américains, GAFA (Google, Apple, Facebook, Amazon)

Gestion de la diversité et de la variabilité à grande échelle

Sécurité des systèmes communicants

Facteurs clés de succès et recommandations

Réduire la pénurie de talents : une étude conjointe du Syntec Numérique et de l'OPIEEC publiée en 2013 indiquait que 40 000 emplois n'étaient pas pourvus dans la filière des systèmes embarqués. L'excellence reconnue de l'école mathématique française peut contribuer à la fuite de cerveaux vers l'étranger accentuant d'autant plus le manque de personnes compétentes. La formation initiale est une recommandation à considérer pour réduire cette pénurie.

Transposer l'excellence entre domaines d'applications: la France est leader mondial dans l'embarqué temps réel critique mais est moins présente dans l'embarqué non critique. Il est nécessaire de développer la recherche sur les langages pour la programmation distribuée et étendre le leadership sur le temps réel critique à des applications plus distribuées et vers des domaines plus variés.

Intégration des technologies liées à la sécurité : il s'agit en particulier d'aller vers des progiciel de gestion intégré (PGI) – *enterprise resource planning* (ERP) - de sécurité complets, assurant convergence de la sécurité dite « Physique » et « Logique » et la virtualisation de l'ensemble des composants de l'architecture, y compris capteurs et opérateurs.

Sécuriser le Cloud : n'étant applicables que sur des systèmes plutôt stables, statiques et fermés, les solutions techniques existantes ne sont plus du tout adaptées à ces nouvelles applications et nécessitent d'être repensées.

Renforcer l'ingénierie de « systèmes de systèmes » : la recherche de méthodes formelles pour la résilience des systèmes à logiciels prépondérants est un enjeu majeur de la prochaine décennie. À l'image de TrustinSoft, il s'agit de faire émerger des approches scientifiques mettant en œuvre des méthodes formelles et permettant de garantir sur ces logiciels le nombre grandissant de leurs propriétés de sécurité critiques.

Acteurs clés

Entreprises	Actia, Airbus, AKKA, Alstom Transport, Alten, Altran, Assystem, CapGemini, Dassault Aviation, Orange, Renault Technocentre, STMicroelectronics, Thales Research and Technology, Thales Communications & Security, Schneider Electric - Electropôle, Valéo…
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX, IRT NanoElec, Railenium, IRT Saint-Exupéry…
Instituts Carnot	CEA LETI, CEA LIST, ESP, IRSTEA, INRIA, Logiciel et Systèmes Intelligents, M.I.N.E.S., LAAS CNRS, ONERA, TSN…
Autres centres de recherches	ENSTA, IFPEN, INSA, ISIR, LORIA, Mines ParisTech, UTC…
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, Images et Réseaux, Minalogic, Systematic, TES…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Cap'Tronic, CITC EuraRFID, Embedded France…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

8 Procédés relatifs à la chimie verte

Loisirs & culture
ÉNERGIE, **MOBILITÉ**, Numérique
ENVIRONNEMENT, **HABITAT**, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Chimie verte, chimie du végétal, recyclage, procédés de fabrication économes, fermentation, biocatalyse, agromatériaux, biosolvants, biotechnologies industrielles, biocarburants, bioplastiques, biosourcé.

© Fotolia

Définition et périmètre

Définition et objectifs

La chimie verte (ou chimie durable) est une approche qui vise à **diminuer, voire éliminer les impacts sanitaires et environnementaux des pratiques chimiques** et qui contribue également à **réduire ceux des autres industries ou secteurs applicatifs**[1]. Cette approche a été théorisée par deux chimistes américains en 1998 sous la forme de douze « principes fondateurs »[2].

Dans ce cadre, les procédés de la chimie verte visent à « *limiter l'empreinte environnementale de l'industrie chimique elle-même*[3] ». Bien que l'industrie chimique française ait diminué de 50 % ses émissions de CO_2 depuis 1990, l'enjeu reste important, puisqu'elle représentait encore près de 25 % des consommations en énergie de l'industrie en France[4].

Technologies et applications

Si les standards de la chimie verte amènent parfois à revoir un procédé chimique dans sa totalité, dans le cas par exemple de la fermentation[5], de la biocatalyse[6] ou des réactions sans solvant, l'innovation au sein de la chimie verte reste principalement **incrémentale**[7].

Les procédés de la chimie verte couvrent aussi bien des technologies dans le domaine de la chimie des procédés[8] (nouvelles catalyses, nouveaux schémas de synthèse, etc.), du génie des procédés[9] (microréacteurs, réacteurs tubulaires, intensification des procédés, etc.) que de la métrologie et des méthodes (modélisation, contrôle, etc.). Parmi ces technologies, deux offrent le potentiel de progression le plus significatif : la **catalyse**, avec notamment l'optimisation des biotechnologies blanches[10], et **l'intensification des procédés**[11].

Chimie biosourcée

Au sein du large périmètre de la chimie verte, la **chimie des produits biosourcés**[12] amène les bouleversements les plus profonds par rapport à la chimie traditionnelle, reposant essentiellement sur le pétrole. Plus précisément, cinq types de produits issus de la chimie du biosourcé se développent : les agromatériaux, les biocarburants, les produits simples biosourcés (solvants, tensioactifs, résines, etc.), les produits formulés biosourcés (peintures, cosmétiques, lubrifiants, etc.) et les matières premières « vertes » de la chimie utilisées comme intermédiaires. La fabrication de ces produits s'appuie sur des biotechnologies industrielles[13], les plus utilisées d'entre elles étant la biocatalyse et la fermentation[14].

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La **préservation de la santé et de l'environnement** apparaît comme une préoccupation de plus en plus centrale pour les consommateurs et fabricants de biens de consommation. Les chimistes sont donc tenus d'adapter leurs pratiques à ces **nouvelles exigences**, d'autant plus dans un contexte de tension sur les ressources fossiles.

L'Union Européenne investit en outre dans des projets de chimie verte, à travers notamment les financements octroyés par le programme-cadre de l'Union européenne pour la compétitivité et l'innovation (CIP). Ainsi par exemple en 2014, elle a

1 – La chimie verte étend ses applications dans les cinq principaux champs de la chimie (chimie minérale, chimie organique, parachimie, pharmacie, produits chimiques de consommation), et par extension dans toutes les industries qui y ont recours. En santé, elle consistera par exemple à utiliser des bactéries pour produire sans effluents certaines molécules comme l'insuline

2 – Paul T. Anastas, John C. Warner, Oxford University Press, New York, 1998 ; *Green Chemistry: Theory and Practice.*

3 – PIPAME, 2010 : *Mutations économiques dans le domaine de la chimie*

4 – UIC, 2013 : *Contribution des industries chimiques au débat national sur la transition énergétique*

5 – Utilisation de micro-organismes comme moyen de fabrication

6 – Production au moyen d'un catalyseur naturel (vitamine, enzyme, hormone, oligo-élément)

7 – Entretien de Pascal Juery, directeur général adjoint du groupe Rhodia, publié dans ParisTech Review en décembre 2011

8 – La chimie des procédés couvre les travaux relatifs aux modalités réactionnelles

9 – Le génie des procédés cherche à améliorer / optimiser l'efficacité énergétique et la consommation de ressources de l'industrie chimique

10 – Utilisation de bactéries pour la fabrication, transformation ou dégradation de molécules

11 – PIPAME, 2010 : *Mutations économiques dans le domaine de la chimie*

12 – Elle consiste à utiliser des molécules issues de ressources renouvelables pour mettre au point des produits aux propriétés similaires à ceux issus de ressources fossiles. Les produits biosourcés peuvent également proposer de nouvelles fonctionnalités. Leur périmètre est encadré par la norme NF EN 16575 Produits biosourcés – Vocabulaire.

13 – Elles permettent d'extraire les molécules de produits issus de source végétale ou animale en utilisant les éléments du vivant

14 – UIC, IAR, Apec, 2014 : *Chimie du végétal et biotechnologies industrielles ; quels métiers stratégiques ?*

contribué à hauteur de 15 millions d'euros au programme *Emertec 5* dont l'objectif est de prendre des participations dans des projets des domaines de l'énergie, de la chimie verte et de l'environnement.

Cinquième industrie chimique mondiale et seconde au niveau européen, la France dispose d'**atouts considérables** pour devenir un pays leader[15] de la chimie verte : des structures de recherche d'excellence dans les biotechnologies, des chimistes « historiques » de réputation mondiale, des grands groupes dans l'agro-industrie leader pour la valorisation des matières premières agricoles et un vivier de PME / start-up innovantes.

Liens avec d'autres technologies clés

Les **produits** issus de la chimie verte ont une influence sur les technologies clés suivantes :

- **Dans le domaine de l'énergie** (influence faible) **: batteries électrochimiques de nouvelle génération, solaire photovoltaïque, technologies de l'hydrogène.** Les produits de la chimie verte peuvent être utilisés pour ces différentes technologies ;
- **Matériaux avancés et actifs** (influence faible) ; une composante clé de la chimie verte est le développement de matériaux biosourcés.

Les technologies clés suivantes ont une influence sur les **procédés** de la chimie verte :

- **Microfluidique** (influence faible) : la microfluidique ouvre des perspectives prometteuses pour l'intensification des procédés ;
- **Matériaux avancés et actifs** (influence faible) : ces matériaux interviennent dans le génie des procédés ;
- **Ingénierie génomique** et **métaomique** (influence faible) ; en améliorant la connaissance sur les ressources de la biomasse, ces 2 sciences contribuent à renforcer l'efficacité des procédés de la chimie biosourcée ;
- **Recyclage des métaux critiques et des terres rares/Technologies de récupération de chaleur à basse température** (influence faible) : ces deux technologies peuvent contribuer à réduire l'impact environnemental des procédés de la chimie.

15 – Les entreprises leaders du secteur sont américaines (Cargill, DuPont, Metabolix, Genencor…) ou issues d'autres pays européens (Novozymes - Danemark, BASF - Allemagne, DSM – Pays-Bas…)

Les marchés

Pour répondre aux besoins de l'accroissement démographique sur la période 2012-2020, le Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (PNUE) a estimé la croissance de l'industrie chimique à 25 % en Amérique du Nord/Europe occidentale, à 35 % dans les économies européennes émergentes et à 45 % pour l'Asie et le Pacifique. Représentant 5 à 10 % de l'industrie chimique[16], la chimie verte devrait connaître la **même dynamique positive**. Sur la même période, le marché des produits biosourcés pourrait même connaître plus qu'un doublement de son chiffre d'affaires, passant de 135 milliards à 340 milliards d'euros[17].

Les biotechnologies industrielles connaissent **l'un des plus rapides développements[18].** Selon le Ministère de l'Éducation et de la Recherche allemand, ces technologies pourraient passer d'un chiffre d'affaires mondial de 50 milliards d'euros en 2012 à 300 milliards d'euros en 2022.

Au niveau des produits issus de la chimie verte, les **bioplastiques** ont connu une progression plus rapide que le marché de la chimie dans son ensemble. La dynamique inverse peut être constatée pour les emballages biodégradables, les solvants aqueux ou encore le blanchiment du papier sans chlore. À moyen terme, le marché mondial devrait notamment être tiré par les **intermédiaires chimiques** et la **production de biopolymères[19].** Le chiffre d'affaires de ce dernier segment pourrait passer de 2,2 milliards en 2013 à 4,3 milliards d'euros en 2018.

En France, la croissance annuelle du marché de la chimie verte pourrait s'élever à **8 % en 2016 et 2017[20].** Par ailleurs, l'Union des Industries Chimiques, qui regroupe 2 600 entreprises françaises de la chimie et 230 000 employés, s'est engagée à porter la proportion de matières biosourcées[21] dans la fabrication

16 – Le Figaro, 24/05/2013 : « Le spectaculaire essor de la chimie verte »

17 – Estimations de Joël Barrault et François Jérôme, chercheurs à l'Institut de chimie de Poitiers, cités dans l'article suivant : « Le spectaculaire essor de la chimie verte », Le Figaro, 24/05/2013

18 – OCDE, 2012 : *Environment Directorate*

19 – Ibid

20 – Xerfi, 2015 : *La chimie verte en France - Perspectives du marché de la chimie du végétal à l'horizon 2017 et analyse du jeu concurrentiel*

21 – Ces matériaux incluent par exemple les amidons, le glucose, les huiles végétales ou la biomasse lignocellulosique.

de produits chimiques[22] à 15 % en 2017 et à 20 % en 2020. La filière des produits biosourcés pourrait ainsi représenter 13 000 nouveaux emplois directs et 32 000 emplois indirects à l'horizon 2020[23].

Les défis technologiques à relever

Comme le soulignait le Commissariat Général au Développement durable en 2013[24], les capacités d'investissement des industriels français de la chimie demeurent incertaines, alors même que l'innovation technologique est clé pour le développement de la chimie verte.

Faire progresser les procédés catalytiques

Les **procédés catalytiques** sont au cœur de la chimie verte[25]. Leur amélioration ouvre de nombreux chantiers, par exemple :

- L'usage de solvants « verts » comme l'eau ou le CO_2 supercritique ;
- L'optimisation des quantités de catalyseurs utilisés ;
- Le développement de la catalyse hétérogène[26], dans l'optique notamment de récupérer les catalyseurs métalliques ;
- L'exploration de nouvelles voies de synthèse avec l'utilisation d'enzymes (biocatalyse).

22 – Celle-ci s'élevait à 14 % en 2014

23 – ADEME, 2012 : *Emplois actuels et futurs pour la filière chimie du végétal*

24 – CGDD, 2013 : *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*

25 – L'utilisation de catalyseurs figure parmi les 12 principes de la chimie verte

26 – Utilisation de métaux catalyseurs pouvant être extraits aisément du milieu réactionnel

Répondre aux enjeux techniques posés par la chimie biosourcée

La chimie biosourcée en particulier génère des enjeux sur le plan technologique[27]. Les procédés chimiques classiques sont encore en **phase d'adaptation** pour réaliser des produits à base de nouvelles matières renouvelables (production du butadiène à partir de bioéthanol, biocarburants à base de déchets, etc.). En particulier, le traitement des atomes d'oxygène présents dans les molécules extraites de ces bioressources représente un véritable enjeu.

Le besoin d'adaptation est également sensible au niveau de **l'outillage de la chimie**. Par exemple, les outils de compoundage[28] sont rarement adaptés aux produits intermédiaires d'origine végétale, les produits biosourcés étant souvent peu connus des plasturgistes et transformateurs.

Surmonter ces enjeux apparaît essentiel pour améliorer la qualité des produits biosourcés et leur valeur ajoutée par rapport aux produits existants, dont dépend leur développement. À titre d'exemple, dans le champ des agromatériaux, la performance des bioplastiques est souvent perçue comme plus faible (au niveau de la longévité, la résistance, l'élasticité par exemple) que celle des plastiques issus de la pétrochimie, même s'il est possible de s'affranchir de ces difficultés, réelles ou perçues, grâce à l'apport de fonctionnalités supplémentaires ou plus pointues (biodégradabilité, meilleure résistance, amélioration de la recyclabilité, etc.).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Synonyme d'économies d'échelle, la mise en œuvre de procédés de chimie verte à une échelle industrielle est essentielle pour garantir la compétitivité de l'industrie française face aux procédés chimiques conventionnels et à la concurrence internationale. Elle nécessite en particulier de relever deux défis à l'horizon 2020 : la montée en compétences et la structuration de la filière.

Renforcer les expertises au sein des entreprises

La **montée en compétences de l'industrie chimique** représente un premier enjeu. Pour la chimie biosourcée,

27 – ADEME, 2011 : *Feuille de route R&D de la filière Chimie du végétal*

28 – Mélange par fusion de matières plastiques et d'additifs

pas moins de 32 métiers ont été identifiés comme stratégiques à l'horizon 2018-2020 au sein d'une étude publiée par l'Apec en 2014[29]. Les équipes de R&D doivent se doter de compétences spécialisées dans l'analyse du cycle de vie d'un produit et au croisement de la biologie et de la chimie[30].

Par ailleurs, le **management de l'innovation** occupera un rôle de plus en plus central au sein des entreprises de la chimie verte, en particulier pour passer le cap de l'industrialisation, souvent compliqué. Malgré une offre innovante, de nombreuses PME et start-up doivent céder leur licence faute de n'avoir pu mobiliser des compétences en valorisation de l'innovation pour déployer leur produit à une échelle industrielle (levée de fonds, sécurisation par un brevet, etc.)[31].

Un manque de fluidité au sein de la filière

Le développement des procédés de la chimie verte est également complexifié par **l'absence d'une chaîne de valeur structurée** en France :

- L'approche d'économie circulaire inhérente à la chimie verte appelle des **coopérations renforcées entre les chimistes et les acteurs de la collecte des déchets**. Ces derniers deviennent essentiels pour récupérer les produits en fin de vie qui seront exploités en tant que matière première dans le cadre de procédés chimiques. Toutefois, un enjeu de profitabilité subsiste à ce niveau[32]. Si les filières de recyclage se mettent progressivement en place, elles restent encore complexes et peu optimisées. En conséquence, la valorisation chimique des déchets souffre encore d'un déficit de compétitivité vis-à-vis d'autres matières premières ;
- Pour la chimie biosourcée, les **circuits d'approvisionnement en biomasse** sont peu structurés pour la mobilisation de ressources émergentes, en particulier la biomasse lignocellulosique (exploitation forestière, coproduits exploitation du bois, etc.)[33]. Améliorer la structuration de la filière apparaît également comme un levier fort pour diminuer le coût des produits biosourcés, généralement peu compétitifs par rapport aux produits issus de ressources fossiles.

L'enjeu consiste également à renforcer les liens entre les **maillons de la recherche et ceux du développement industriel**. La plupart des procédés de la chimie verte développés en France sont ensuite industrialisés dans des usines implantées à l'étranger.

- Les enjeux réglementaires

Une réglementation aux effets contraires

En France, la réglementation a un **impact contrasté** sur le développement des procédés de la chimie verte. La réglementation française applicable aux plateformes chimiques[34] en constitue une bonne illustration. Fixant des standards environnementaux et sanitaires plus stricts que dans d'autres pays européens comme l'Allemagne[35], elle a pour effet de tirer les pratiques de l'industrie vers le haut. Toutefois, elle est également considérée comme un frein majeur[36] pour sa compétitivité. L'Union des Industries Chimiques a estimé entre 1,3 et 3,9 milliards d'euros le surcoût qu'elle représentera pour les industriels d'ici 2020 par rapport à des pays faiblement réglementés[37].

En réponse à cette situation, plusieurs mesures sont avancées par les industriels français pour l'assouplir : gestion de la sécurité au niveau des plateformes chimiques, plafonnement des taxes relatives à la réglementation sismique selon le niveau de valeur ajoutée des entreprises, etc.[38] La **circulaire du**

29 – UIC, IAR, Apec, 2014 : *Chimie du végétal et biotechnologies industrielles ; quels métiers stratégiques ?*

30 – Actu-environnement, 25/03/2015 : « Chimie du végétal ; des métiers stratégiques en mutation »

31 – Xerfi, 2015 : *La chimie verte en France - Perspectives du marché de la chimie du végétal à l'horizon 2017 et analyse du jeu concurrentiel*

32 – CGDD, 2013 : *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*

33 – L'approvisionnement des industries françaises agroalimentaires est toutefois bien structuré autour de plateformes huile, sucre et amidon. La structuration de circuits d'approvisionnement apparaît un enjeu d'autant plus crucial qu'elle permet de faire face à la volatilité des prix des matières premières. La mobilisation de ressources agricoles à des fins chimiques est toutefois sujette à débat. Elle pourrait en effet générer des tensions sur d'autres usages, comme l'alimentation qui consomme actuellement plus de 60 % des ressources agricoles

34 – La réglementation inclue par exemple la réalisation d'études sismiques, des obligations d'audits de performance énergétique et des Plans de prévention des risques technologiques (PPRT)

35 – Les standards de ces pays sont indexés également sur la réglementation européenne, réputée déjà comme l'une des plus contraignantes au monde. Le règlement REACH en particulier, entré en vigueur en 2007, oblige les industriels à déclarer les substances chimiques qu'ils fabriquent et utilisent, de manière à écarter du marché celles jugées dangereuses pour la santé et l'environnement. L'objectif est de recenser plus de 30 000 substances d'ici 2018

36 – PIPAME / DGE / UIC, 2014 : *Benchmark européen sur les plateformes chimiques, quels sont les leviers pour améliorer la compétitivité des plateformes françaises ?*

37 – Ibid

38 – Ibid

25 juin 2013 relative au traitement des plates-formes économiques dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) va dans ce sens, puisqu'elle permet d'adapter les règles d'élaboration des PPRT au cas par cas pour une vingtaine de plateformes sur le territoire, sous supervision des préfets. Elle préconise par ailleurs la mise en place de systèmes de gouvernance collective entre les entreprises présentes sur les plateformes, avec pour objectif une meilleure coordination et mutualisation des moyens sur les questions de sécurité.

Le fonctionnement de la propriété industrielle, frein à l'innovation

Le **système actuel de propriété industrielle (PI)** représente un autre verrou important. En plus d'un déficit de connaissance des chercheurs et industriels, il est actuellement possible de breveter des procédés dès la conception du projet, ce qui empêche toute nouvelle initiative jusqu'à l'obtention hypothétique de résultats finaux. Au sein de la feuille de route pour la R&D de la chimie biosourcée publiée en 2011, l'ADEME appelait à faire évoluer la réglementation pour ne pouvoir breveter les procédés qu'à la réalisation du projet.

Analyse AFOM

ATOUTS

Une industrie chimique puissante au niveau mondial et européen

Un tissu industriel important, y compris dans les secteurs « connexes » de la chimie comme l'agroalimentaire

Des structures et partenariats de R&D de qualité

Des ressources naturelles importantes pour le développement des produits biosourcés

FAIBLESSES

Des procédés développés en France mais généralement transposés à une échelle industrielle au sein d'usines d'autres pays

Des déficits de compétences pour la valorisation de l'innovation (levée de fonds, dépôt de brevet, industrialisation, etc.), en particulier pour les PME et les start-up

Une filière des produits biosourcés peu structurée, notamment sur le plan de l'approvisionnement

OPPORTUNITÉS

Des préoccupations croissantes en matière de développement durable des usagers comme des fabricants de biens de consommation

Des standards réglementaires au niveau français et européen toujours plus exigeants

MENACES

Une concurrence forte des pays leaders de la chimie verte (États-Unis, Allemagne, etc.)

Pour la chimie biosourcée, des conflits potentiels pour la mobilisation des ressources agricoles avec les usages alimentaire et énergétique

Un cours du pétrole bas

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

■ Soutenir le changement d'échelle des PME et des start-up de la chimie verte, tant sur le plan du financement, de la montée en compétences que de l'industrialisation ;

■ Engager une réflexion sur la propriété industrielle ;

■ Sensibiliser le grand public à la chimie verte. L'industrie chimique souffre d'un déficit d'image, comme le révélait un sondage réalisé en 2010 par l'Union des Industries Chimiques[39].

Aux entreprises :

■ Renforcer les partenariats PME-Grands groupes-Instituts de recherche pour contribuer à la structuration des filières de la chimie verte ;

■ Mettre en place collectivement des circuits garantissant un approvisionnement stable pour la chimie biosourcée.

Aux académiques :

■ Consolider les recherches dans le domaine du biosourcé avec l'objectif d'améliorer le rapport qualité-prix des produits par rapport aux produits conventionnels.

Acteurs clés

En France, la chimie verte implique une **grande diversité d'acteurs**. Elle se situe à l'interface entre les industries chimiques, les agro-industries pour la chimie biosourcée, les sociétés de biotechnologies et les acteurs de l'environnement, qui regroupent aussi bien des groupes de dimension internationale que des PME et start-up innovantes :

■ Grands groupes de l'industrie chimique et pharmaceutique : Arkema, Solvay, Novacap, Sanofi, Pierre Fabre, Silab, Axens, Novasep, Adionics, etc. ;

■ Grands groupes de l'agro-industrie : Roquette, Sofiproteol, Limagrain, Adisseo, Tereos, etc. ;

■ PME / start-up principalement issues des biotechnologies : Fermentalg, Deinove, Metabolic Explorer, LibraGen, Global Bioénergies, Carbios, Polymaris, Id-Bio, etc.

La France dispose par ailleurs d'un écosystème de la recherche particulièrement dynamique. L'innovation est aussi bien portée par les équipes des entreprises citées ci-dessus que par des unités mobilisées au sein du CNRS, de l'INRA, du CEA, de l'IFP, des universités et de certains Centres techniques industriels (ITERG et le CVG notamment). Un vivier de structures fait le lien entre la recherche et le développement, comme les pôles de compétitivité Axelera, IAR et Plastipolis et les Instituts pour la Transition Energétique P.I.V.E.R.T, IDEEL et IFMAS.

La structuration d'une filière de la chimie verte est soutenue par les pouvoirs publics. La chimie verte est ainsi au cœur de la solution « Nouvelles ressources : matériaux biosourcés et recyclés », l'une des neuf Solutions Industrielles. Elle fait l'objet de deux objectifs : un doublement d'ici 2020 du volume de matières premières d'origine végétale dans l'industrie chimique et la création de 5 000 emplois directs.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

39 – UIC, novembre 2010 : *Industries chimiques et produits chimiques ; état de l'opinion, attitudes et comportements*, enquête réalisé auprès d'un échantillon de 2 519 personnes

9 Fabrication additive

LOISIRS & CULTURE
Énergie, **MOBILITÉ,** Telecommunications
Environnement, **HABITAT,** **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE,** Sécurité
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Fabrication additive, fabrication rapide, impression 3D, fabrication directe, prototypage rapide, production de pièces, pièces complexes

© Fotolia

Définition et périmètre

La fabrication additive ou impression 3D est un procédé de fabrication de pièces par ajout de matière (en opposition aux techniques historiques par soustraction de matière comme l'usinage). La fabrication est réalisée à partir de fichiers numériques.

La fabrication additive s'applique à un grand nombre de matériaux tels que plastiques, métalliques ou céramiques. Plusieurs procédés peuvent être employés pour mettre en forme les pièces. Le comité international de l'ASTM sur les technologies de fabrication additive les classe comme suit : extrusion de matière, jet de matière, jet de liant, photopolymérisation en phase liquide, fusion sur lit de poudre, dépôt via faisceau d'énergie.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les deux grands avantages de la fabrication additive par rapport à d'autres procédés de production de pièces sont la réalisation de pièces aux formes complexes (permettant la réduction de la masse des pièces et la réduction du nombre de pièces au sein d'une structure induisant ainsi un gain au niveau de l'assemblage) et la possibilité de réaliser de très petites séries flexibles, favorisant ainsi la personnalisation.

Grâce aux possibilités offertes par la fabrication additive, de nombreuses perspectives industrielles s'ouvrent à l'échelle internationale et le marché croit chaque année de plus de 20 %. Il est clé que la France reste dans la compétition par rapport à cette technologie.

Les secteurs pour lesquels la fabrication additive est d'ores et déjà bien installée sont l'aéronautique et le médical. Cette technologie est clé également pour les secteurs du luxe, de l'automobile, du spatial, du bâtiment.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent la fabrication additive sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
8	Procédés relatifs à la chimie verte
10	Cobotique et humain augmenté
12	Robotique autonome
15	Procédés relatifs à la chimie du pétrole
26	Ingénierie génomique
38	Systèmes de rénovation du bâti existant
39	Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf

Les technologies influencées par la fabrication additive sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
10	Cobotique et humain augmenté
12	Robotique autonome
26	Ingénierie génomique
29	Ingéniérie cellulaire et tissulaire
30	Nouvelles modalités d'immunothérapie
31	Dispositifs bio-embarqués
32	Technologies d'imagerie pour la santé
33	Exploitation numérique des données de santé
45	Technologies pour la propulsion

Les marchés

La fabrication additive adresse trois principaux segments de marché : le prototypage, la fabrication de pièces « grand public » et la fabrication de pièces industrielles. Les enjeux actuels de développement concernent essentiellement le troisième volet qui est actuellement moins mature. Un enjeu de développement de marché complémentaire concerne la création de filières dans le domaine de la maintenance afin de pouvoir fabriquer sur mesure des pièces de remplacement.

Les principaux enjeux de développement de la fabrication additive concernent en particulier la santé (prothèses auditives et dentaires, mais aussi de manière plus prospective les organes artificiels) et la mobilité (prototype rapide pour des pièces de véhicules automobiles, production de pièces en aéronautique notamment) et de manière générale les pièces mécaniques comme l'outillage. Le secteur du luxe est pressenti comme le prochain secteur fortement influencé par la fabrication additive, appuyée notamment par la personnalisation des pièces produites.

En nutrition, l'impression 3D séduit car elle permet une plus grande flexibilité sur la forme sous laquelle les aliments sont présentés.

Pour l'habitat, la fabrication additive pourra permettre de fabriquer des maisons en kit ou des maisons d'un bloc directement sur site. La faisabilité de ce type de construction a déjà été démontrée au niveau international.

Concernant les applications loisirs & culture, l'impression 3D facilitera la fabrication d'objets publicitaires et marketing, de produits dérivés (figurines…). Elle pourra également être utilisée pour la fabrication de pièces pour le modélisme, les collections et les jeux de plateau. Elle pourrait également être exploitée pour réaliser des copies d'œuvres d'art ou de la restauration d'œuvres et de monuments.

La répartition du marché actuel de la fabrication additive en fonction du secteur d'application est présentée à la Figure 2.

Figure 2 : Répartition du marché mondial de l'impression 3D par débouchés[1]

1 – Xerfi, 2014 : *L'impression 3D en France et dans le monde*, repris par Erdyn et Xerfi, Crédit Suisse

Le marché mondial de la fabrication additive en termes de revenus associés à la commercialisation des produits et services représente 3,07 Md $ en 2013, soit une croissance de 34,9 % par rapport à 2012[2]. Les estimations pour 2020 s'élèvent à 21 Md $ au niveau mondial[3].

À l'échelle mondiale, les produits (machines et consommables) et services avaient une part égale en 2013 d'environ 1,5 Md $. Les consommables représentaient 0,53 Md $.

En 2013, 21 % des machines sont produites en Europe[4]. Une grande majorité des machines européennes sont produites en Allemagne par Envisiontec ainsi qu'en Irlande par la société Mcor Technologies et en Italie par la société DWS. En termes d'utilisation, l'Europe regroupe 29 % des machines installées[5].

Les compétences et le matériel spécifique à la fabrication additive ont aussi amené des sociétés de service à se développer sur la fabrication de pièces en sous-traitance. Cette activité croît régulièrement de plus de 20 % par an depuis 2010, générant un chiffre d'affaires mondial de 967 M $ en 2013 (chiffre d'affaires des pièces finales, hors conception et modélisation). Les entreprises peuvent être des sous-traitants de la mécanique qui ont fait évoluer leur parc de machine, ou des entreprises spécialisées dans la fabrication additive uniquement, nouveaux entrants dans le secteur. Dans cette dernière catégorie, les leaders sont Shapeways (USA), i. materialise (Belgique), Sculpteo (France), Prodways (France). On notera que Prodways dispose du plus grand parc de production européen en 2014. Contrairement aux trois autres, la société travaille essentiellement pour l'industrie. Il faut aussi citer les très nombreuses initiatives de fablab, qui comptent généralement un équipement d'impression 3D, au milieu d'autres équipements de production. Début 2015, l'international Fablab association compte 355 fablab adhérant à leur charte, sachant que d'autres organismes proches non adhérents existent, dont 230 en Europe et 86 en France.

2 – Caffrey T., Wöhlers T., 2014 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry, Fort Collins, Wöhlers Associates

3 – Idem

4 – Idem

5 – DIRECCTE Centre, 2014 : *L'impression 3D : état des lieux et perspectives*

En 2014, la France représente moins de 2 % de part du marché mondial. La figure 3 illustre la répartition mondiale de l'ensemble du marché de l'impression 3D. Le marché français devrait suivre la même évolution que le marché mondial d'ici 2020 soit une multiplication par un facteur 7 entre 2013 et 2020.

Figure 3 : Répartition mondiale de l'impression 3D par zone géographique[6]

Au niveau mondial, la vente de matériaux pour la fabrication additive représentait 529 M$ en 2013, en croissance de plus de 20 % par an depuis 2010. La même croissance est attendue d'ici à 2020. Les matériaux sont le plus souvent vendus par les fabricants de machines qui peuvent fabriquer eux-mêmes ou sous-traiter. Il existe aussi des fabricants « indépendants », toutefois l'accès au marché est difficile car encadré par les fournisseurs de machines (cf. défis commerciaux).

Les défis technologiques à relever

La fabrication additive, jusque là réservée à des applications de prototypage rapide, tend à se développer vers la fabrication de pièces fonctionnelles ce qui augmente le niveau d'exigence sur plusieurs points.

Des développements doivent être réalisés afin d'augmenter la taille des pièces réalisables par impression 3D et d'adapter le procédé pour la fabrication de pièces multimatériaux. La fiabilité des procédés de fabrication doit être augmentée afin d'assurer des pièces de qualité constante et élevée. Le développement des contrôles non destructifs adaptés aux procédés de fabrication additive permettra de répondre à ces défis. Il est aussi nécessaire de développer des procédés

6 – Xerfi, 2014 : *L'impression 3D en France et dans le monde*

permettant l'amélioration de l'état de surface des pièces afin de s'affranchir au maximum des étapes de post-traitement.

De plus, l'un des grands défis de la technologie est d'adapter le design des machines et les procédés de fabrication à des contraintes de production industrielle de marchés de masse. Il est notamment nécessaire d'augmenter la cadence de production.

L'approvisionnement en matières premières standardisées dans des qualités optimales et à des coûts compétitifs est également un enjeu technologique fort. D'une part, il y a un fort enjeu de caractérisation des matières premières afin d'identifier les propriétés clés permettant d'optimiser les procédés. D'autre part, les matières premières employées sont spécifiquement adaptées à un procédé et jusqu'ici leurs spécifications sont la propriété gardée des fabricants de machines. Ainsi, une phase de standardisation sera nécessaire afin de permettre à plusieurs entreprises de commercialiser les matières premières et ainsi de réduire les prix de vente des matières premières.

Les logiciels de CAO et d'ingénierie devront eux aussi être adaptés à ces nouveaux procédés de fabrication, en y intégrant les contraintes mécaniques spécifiques à chaque procédé de fabrication additive et à chaque matériau choisi.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'une des difficultés commerciales majeures pour le développement de la fabrication additive en production est la nécessité de réaliser des investissements conséquents pour mettre en place une solution de production en fabrication additive. Le retour sur investissement est long car les coûts fixes sont élevés et il faut atteindre une taille critique pour les amortir.

Le paysage industriel est dominé par deux gros acteurs internationaux (Stratasys {USA et Israël} et 3D Systems {USA}) qui mettent en œuvre une politique active de rachat, empêchant de nombreux acteurs nationaux d'atteindre une taille critique. Par exemple, Phenix Systems a été racheté par 3D Systems, à hauteur de 80 % du capital de l'entreprise. Ainsi, on voit peu de nouveaux entrants émerger au niveau de la fabrication de machines de fabrication additive. Prodways Group, fort d'une croissance très importante et d'une levée de fonds réussie en juin 2015, affiche néanmoins l'ambition de se positionner à l'échelle mondiale comme concurrent européen de Stratasys et 3D Systems par une stratégie de croissance interne et externe.

Les acteurs qui contrôlent la distribution de matières premières se ménagent une position dominante[7]. Notamment, les fabricants de machines cherchent à monopoliser l'approvisionnement en matières premières en inscrivant par exemple dans leurs contrats de maintenance des clauses obligeant à utiliser certaines matières premières dont ils sont souvent les seuls distributeurs. Ainsi les utilisateurs des matières premières pour la fabrication additive sont soumis à des prix artificiellement hauts et doivent assumer des risques liés à la garantie d'approvisionnement.

Aujourd'hui, ces contraintes sont susceptibles de se relâcher du fait de la croissance du secteur qui attire de nouveaux acteurs pour la fourniture de matières premières. Notamment, les fournisseurs de matières premières historiques (chimistes, métallurgistes, producteurs de céramiques) pourront entrer sur ce marché.

Une autre problématique forte est celle des ressources humaines et des compétences. En effet, les personnes possédant déjà une expérience en fabrication additive sont peu nombreuses et recherchées. Pourtant, des compétences spécifiques doivent être développées, en conception, méthodes, production, maintenance, hygiène et sécurité des poudres, etc. pour tous les types de postes. En particulier, la fabrication additive nécessite de prendre en compte les règles spécifiques de conception dans les outils de CAO et de simulation. Ainsi, il y a un vrai enjeu à pouvoir recruter des personnes compétentes et à pouvoir former ses équipes

7 – Fornea D., Van Laere, D., Comité économique et social européen, 2015 : *Vivre demain. L'impression 3D, un outil pour renforcer l'économie européenne*

au fur et à mesure des avancées technologiques de la fabrication additive.

Les enjeux réglementaires

La construction d'un cadre de normalisation est en cours. La normalisation et la certification des procédés et matériaux utilisés accélérera la diffusion de la fabrication additive pour des applications industrielles[8]. En effet, les principaux secteurs d'application ciblés aujourd'hui sont l'aéronautique et la médecine, des domaines dans lesquels le cadre normatif est très développé et nécessaire à la commercialisation.

Au niveau international, le comité ASTM F 42 en charge des technologies de fabrication additive gère le processus de normalisation. Il est crucial que les industriels utilisateurs et fabricants de machines ou de matières premières soient intégrés aux discussions de normalisation afin de maximiser l'efficacité du cadre normatif.

En termes de propriété intellectuelle, la fabrication additive pose question. La diffusion des fichiers numériques pour l'impression 3D augmente le risque de contrefaçon. Il s'agit d'un phénomène similaire à celui observé pour la musique et l'industrie cinématographique, même s'il devrait toucher un public moins large. La sécurité des échanges et la protection des fichiers numériques et des objets créés représenteront un enjeu fondamental pour l'industrie de la fabrication additive de sorte que l'innovation ne soit pas freinée mais que la protection de la propriété industrielle soit bien réelle[9].

Analyse AFOM

ATOUTS

Une filière aéronautique forte qui peut être moteur de l'industrialisation de la fabrication additive et du développement d'entreprises.

La filière du luxe fortement présente en France est aussi un relais pressenti pour la fabrication additive. De bonnes compétences académiques

Des leaders de la sous-traitance de fabrication additive sont présents en France et en Europe.

FAIBLESSES

Peu de fabricants de machines en France.

Les compétences sur la fourniture de matières premières existent mais ont du mal à s'imposer commercialement.

OPPORTUNITÉS

Nombre d'applications important laissant de la place à un grand nombre d'acteurs

Forte tendance à la personnalisation et au « Do It Yourself »

MENACES

Acteurs étrangers fabricants de machines s'implantant sur le territoire français et menant une politique de rachat agressive

Risque accru de contrefaçons de données et de modèles

8 – Fornea D., Van Laere, D., Comité économique et social européen, 2015 : *Vivre demain. L'impression 3D, un outil pour renforcer l'économie européenne*

9 – Fornea D., Van Laere, D., Comité économique et social européen, 2015 : *Vivre demain. L'impression 3D, un outil pour renforcer l'économie européenne*

Facteurs clés de succès et recommandations

Le soutien au développement de nouvelles technologies (notamment : machines à cadence de production élevée, fiabilisation des machines, matières premières de très haute qualité, élargissement de la gamme des matériaux concernés et développement de procédés multimatériaux) au stade recherche et industrialisation est clé pour assurer à la France une position forte au sein du paysage de la fabrication additive. Plusieurs projets de recherche sont en cours, il faudra veiller à transformer ces projets en valeur industrielle et commerciale ainsi qu'à renouveler les sujets de recherche pour viser une position de pointe.

Dans la continuité des travaux de recherche, le soutien des acteurs industriels français est clé. Leur développement pourra notamment s'appuyer sur les filières fortes telles que l'aéronautique pour se déployer en France puis à l'international.

La poursuite de la normalisation et la participation des acteurs français à cette démarche sont également essentielles afin d'éviter que les acteurs français ne soient exclus en raison de choix normatifs qui leur seraient défavorables.

Enfin, la fabrication additive apporte de nouveaux métiers pour lesquels il faudra assurer un personnel qualifié. Ainsi, des formations aussi bien continues qu'initiales doivent être mises en place pour répondre aux besoins des industriels sur tous les nouveaux postes de la fabrication additive (conception, méthodes, production, maintenance, etc.) et accompagner leur développement.

Acteurs clés

Fabricants de machines ; Prodways (groupe Gorgé), BeAM (spin off de l'Irepa), Phenix System (détenue à 80 % par l'américain 3D systems), CADVision

Sociétés de services autour de la fabrication additive (sous-traitance de production, aide à l'industrialisation…) : Spartacus3D, Sculpteo, Cirtes, 3A, Exceltec, GM Prod

Fournisseur de matières premières : Arkema, Rhodia, Air Liquide, Erasteel (groupe Eramet), Poudmet

Fournisseurs de logiciels CAO : AutoDesk, SpaceClaim, Cadlink, SolidThinking, Dassault Systems

Industriels utilisateurs : Thalès, Snecma, Dassault Aviation, MediCréa, One Ortho, Gemmyo

Acteurs de la recherche et centres techniques : École Centrale de Nantes, IRCCyN (Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes), CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers), PEP (Centre technique de la plasturgie et des composites), CTTC (Centre de Transfert de Technologies Céramiques), Labex CEMAM (Centre d'Excellence sur les Matériaux Architecturés Multifonctionnels), Inserm (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale), Irepa Laser, UTBM (Université Technique de Belfort Montbéliard)

Institut Carnot : ICEEL, MICA, M.I.N.E.S., ARTS, CEA LIST ; MICA, CIRIMAT, Énergies du Futur, CETIM (CEntre Technique des Industries Mécaniques)

Pôles de compétitivité : Materalia, Viaméca, EMC2, Aerospace Valley

Clusters : i-Care

IRT : M2P, Jules Verne

Associations : AFPR (Association Française du Prototypage Rapide)

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

10 Cobotique et humain augmenté

LOISIRS & CULTURE
Énergie, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
Environnement, Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Cobot, humain augmenté, prothèses, orthèses, réalité augmentée, préhension, manipulation, robotique industrielle, robotique collaborative, capacités sensorimotrices.

© RENAULT Antoine LA ROCCA 3

Définition et périmètre

Le terme cobotique fait référence aux dispositifs dits de robotique collaborative ou encore de robotique interactive, dans l'industrie ou dans le monde professionnel. Le principe du « cobot » consiste à faire interagir le système robotique avec les humains pour obtenir un comportement synergique afin d'assister l'homme dans une tâche ou sur une mission par des apports de :

- Puissance : soulever des charges, compenser l'effort, etc., tout en laissant à l'humain l'exécution du geste ;
- Précision : apporter à l'opérateur de la précision et de la sûreté dans le geste ;
- Perception : augmenter la perception de l'humain par des apports tactiles, visuels, auditifs, etc. (cf. technologie clé « Technologies immersives ») ;
- Cognition : guider la tâche de l'humain dans une tâche complexe…

Au-delà de cette définition, la notion d'humain augmenté fait référence à l'extension des capacités de l'humain par des technologies intégrées à son anatomie sous forme de prothèses ou d'orthèses pour pallier un handicap (comme par exemple les articulations ou membres robotisés pour personnes amputées[1]) ou encore des interfaces de perception intégrant des moyens de détection ou de pilotage neuronal.

- Santé et bien-être

Les dispositifs robotiques comme le Locomat ou le MIT-Manus font aujourd'hui partie des outils utilisés pour la rééducation fonctionnelle. Des orthèses, ou encore des exosquelettes robotisés, sont envisagés pour assister ou suppléer les fonctions motrices. Les prothèses médicales, qu'il s'agisse d'organes artificiels tels que le cœur artificiel Carmat ou les rétines artificielles, ou de lunettes intégrant des caméras, permettent déjà de recouvrer des fonctions biologiques élémentaires défaillantes. La robotique offre des voies pour reconstruire et commander sous une forme artificielle des membres entiers (bras, jambe, main). Hugh Herr, ingénieur américain, professeur au MIT et lui-même amputé des deux jambes a mis au point la prothèse BiOM T2 System, alliant bionique et biomimétique. La cheville bionique est adaptée sur-mesure à chaque patient à l'aide d'un logiciel qui programme les paramètres déployés à toutes les étapes de la marche lors des premiers essais – le *Personal Bionic Tuning*.

Les robots de chirurgie minimalement invasive comme ceux d'Endocontrol constituent des évolutions sous des formes cobotiques de robots télé-opérés comme le Da Vinci de la société américaine Intuitive Surgical.

- Mobilité

Les techniques et les technologies de la robotique interactive peuvent contribuer à l'autonomie des personnes handicapées notamment pour constituer des aides à la mobilité à travers des commandes avancées de déambulateurs ou des fauteuils roulants énergisés. Les orthèses énergisées sont des moyens envisagés pour l'augmentation des capacités humaines notamment pour le transport de charges. La fonction de déplacement de biens ou d'équipements aux côtés des humains dans des environnements contraints fait l'objet de nombreux développements. La maîtrise de ces interactions physiques ou non physiques ouvrira des perspectives importantes à l'assistance à la manipulation mobile, la téléprésence et la télémédecine mais aussi plus largement à la robotique d'assistance aux personnes.

- Industrie

Le secteur de l'industrie restera incontestablement le plus fort débouché de la cobotique à moyen terme. Les ambitions d'*Industrie du futur* constituent un effet de levier considérable pour le développement des robots collaboratifs, et ouvrent la voie à de nombreuses nouvelles applications. Les cobots permettent avant tout d'apporter une aide dans des activités professionnelles pour des besoins relatifs à la dextérité (précision, amplitude), la puissance, la perception humaine (complémentaire à la perception visuelle, tactile, sonore, etc.). De nombreux produits voient le jour en ce moment, venus de fournisseurs étrangers de robots industriels comme Kuka, Yaskawa ou ABB mais aussi de nouveaux acteurs comme Rethink Technologies ou Kawada.

En France, le fabricant auxerrois de robots collaboratifs et d'exosquelettes RB3D a déjà installé ses cobots dans plusieurs entreprises industrielles françaises. D'une manière générale, la France industrielle est plus que jamais impliquée sur l'Usine du Futur comme en témoignent les industriels aéronautiques Figeac, qui investit plus de 35 M€ en 2015 pour construire une usine entièrement robotisée, ou encore Airbus, qui s'affiche comme

1 – Cf. cheville robotisée de BiOM.

véritable pilote industriel sur plusieurs projets robotiques : Omnirob (projet Valeri) qui vise à intégrer davantage de robots sur les lignes d'assemblages aéronautiques, et le robot Asimov qui contribue à déployer davantage de machines collaboratives et intelligentes dans les usines Airbus de Nantes, Saint-Nazaire et Hambourg d'ici 2016, notamment pour l'assemblage de l'A380 et de l'A350 et la réalisation de tâches pénibles : peinture, soudage, portage de pièces lourdes.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

■ Elle est un facteur de compétitivité pour l'industrie manufacturière

Les robots collaboratifs sont incontestablement un levier de compétitivité pour les industriels et les usines de production. Fortement liés à la robotique autonome, leur capacité d'adaptation et d'interaction avec l'homme et leur environnement leur offre beaucoup plus de flexibilité et leur permettra de réaliser des tâches à faible valeur ajoutée en assistance à un opérateur humain sans nuire à sa sécurité.

Bien que faiblement automatisée (par rapport à l'industrie automobile), l'industrie aéronautique présente un grand potentiel pour les applications des robots collaboratifs, en raison de séries plus restreintes et d'un usage moins ancré de la robotisation « traditionnelle ». Il en est de même pour l'industrie agro-alimentaire ou la logistique où les besoins en termes de manipulation et de mobilité sont importants avec une très grande diversité de tâches et des environnements « humains ».

Par ailleurs, le cobot est vu favorablement comme un outil permettant de diminuer la pénibilité du travail et les troubles musculosquelettiques. Reportant sur la machine la partie pénible de la tâche (le poids, les vibrations, etc.) et laissant un rôle de contrôle à l'opérateur, le cobot est par ailleurs mieux perçu en entreprise que le robot autonome car moins « menaçant » pour l'emploi.

La robotique collaborative est un marché en devenir qui présente un potentiel très important, comme nous venons de l'évoquer dans bon nombre de secteurs industriels et artisanaux mais aussi dans le domaine médical et de l'assistance à la personne. La France peut prendre une part importante dans ce marché compte-tenu de son potentiel d'innovation tant sur les aspects matériels que logiciels de cette nouvelle forme de robotique et s'appuyer sur son réseau d'intégrateurs pour multiplier les expérimentations de déploiement.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent la technologie Cobotique et humain augmenté sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs
9	Fabrication additive
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées

Les technologies influencées par la technologie Cobotique et humain augmenté sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
9	Fabrication additive
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale

Les technologies clés qui influencent la technologie Cobotique et humain augmenté sont :	
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
32	Technologies d'imagerie pour la santé
34	Authentification forte
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les technologies influencées par la technologie Cobotique et humain augmenté sont :	
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
33	Exploitation numérique des données de santé
46	Nanoélectronique

Les marchés

Les premières applications des cobots ont été envisagées au niveau industriel comme robots de production. Toutefois, au-delà des industriels, les professionnels misent également sur la force du collectif humain-robot, voire robot-robot.

■ Robots industriels : un marché de plus en plus tiré par l'Asie

Les ventes mondiales de robots de production ont progressé de 12 % en 2013 et atteignent leur plus haut niveau jamais enregistré pour une année à 178 132 unités[2]. Les ventes se sont élevées à 225 000 unités en 2014, soit +27 % par rapport à 2013 (contre +15 % initialement prévu). La Chine et la Corée du Sud sont les plus gros acquéreurs de robots industriels en 2014 avec respectivement 56 000 robots (24,8 %) et 40 000 robots (17 %). Le taux de croissance annuel moyen estimé entre 2015 et 2017 est de +12 % au niveau mondial.

Au sein de ce marché, la part naissante de la cobotique est difficile à évaluer à 5 ans, mais il est raisonnable de penser qu'elle sera significative, tirée par la nécessité de lutter contre la pénibilité et les troubles musculo-squelettiques dans les entreprises industrielles et de manutention (en partage avec la robotique autonome) : BTP, logistique, industrie mécanique et industries d'assemblage, artisanat à plus long terme. Le moteur essentiel sera le gain de compétitivité des entreprises.

2 – Chiffres de l'International Robotics Federation, *World Robotics 2014*

■ Robots collaboratifs médicaux : vers plus de précision et d'assistance

Les ventes de robots médicaux ont quant à elles chuté de 2 % et atteignent 1 300 unités dont 1 000 robots d'assistance au chirurgien. Les ventes ont cependant augmenté en valeur et atteignent 1,45 Md$ en 2013. Les 300 robots restants sont essentiellement des petites tables médicalisées mobiles et autonomes et quelques exosquelettes.

■ Prothèses - Dispositifs Médicaux d'Implantation (DMI)

- Prothèses orthopédiques
- Prothèses cardio-vasculaires
- Prothèses neurologiques
- Autres segments

■ Orthèses

Les défis technologiques à relever

Fortement lié à la fiche technologies clés « robotique autonome », les défis technologiques à relever sont essentiellement axés sur la capacité des robots à interagir de manière sûre avec l'homme et réaliser des fonctions variées souvent à faible cadence dans des environnements relativement dynamiques. Il leur est nécessaire pour cela d'intégrer des composants leur permettant de comprendre les activités humaines et les anticiper. Le robot doit aussi avoir un comportement déterministe et prédictible par l'homme.

Dans ces objectifs, la perception de l'environnement y compris humain, les lois de commande assurant des

mouvements sûrs ainsi que l'adaptation du comportement et les capacités d'apprentissage sont des dimensions essentielles.

■ La perception

Un des enjeux forts autour de la perception est l'utilisation de capteurs bas coûts pour rendre possible le déploiement des robots dans un modèle économique contraint (entreprise, système de santé…). Ces capteurs doivent au-delà fournir une information robuste (par fusion de données notamment) dès lors qu'elle engage des questions de sûreté de fonctionnement.

Les informations nécessaires à la mise en œuvre de robots collaboratifs sont relatives à la localisation des personnes situées dans l'environnement du robot et à leur mouvement. La perception des efforts d'interaction physiques par des capteurs répartis dans la structure ou localisés aux interfaces de manipulation doit permettre de commander les mouvements du robot en réponse à une interaction physique.

■ L'intelligence

On attend de ces robots qu'ils puissent être programmés de manière plus intuitive et plus interactive. À ce titre l'apprentissage par démonstration et les autres techniques d'apprentissage constituent des voies de développement de cette adaptation continue du comportement du cobot ou de la prothèse à son contexte d'emploi, mettant en œuvre des technologies relevant de l'intelligence artificielle (autre technologie clé).

■ La planification et la commande

La commande de tels robots doit permettre de réaliser des trajectoires spécifiées directement au niveau de l'objectif de la tâche. La construction des enchaînements des mouvements élémentaires doit bénéficier de moyens permettant la prise en compte des incertitudes et des aléas. En outre, les lois de commande doivent pouvoir prendre en compte des contraintes ainsi que des objectifs de manière dynamique et surtout robuste. Pouvoir produire des mouvements s'adaptant à des environnements dynamiques et sûrs pour les personnes est une propriété essentielle au déploiement de ces systèmes.

■ Préhension

Le caractère « orienté industrie » des cobots implique la capacité à manipuler des pièces ou objets de différentes tailles, rigides et souples et plus ou moins fragiles. La fonction de préhension est dans ce contexte absolument critique. Disposer de préhenseurs dextres pouvant saisir une grande variété d'objets placés dans des configurations variables constitue un enjeu majeur. Aujourd'hui les systèmes de préhension offrent des capacités d'adaptation trop limitées. Les préhenseurs articulés disponibles sur le marché sont beaucoup trop complexes et fragiles. Il est essentiel de pouvoir doter les systèmes de robotique collaborative de préhenseurs articulés et instrumentés de capteurs d'effort et de vision qui soient à la fois légers et robustes à l'usage.

■ Interface cerveau-machine : vers le pilotage par la pensée

Du fauteuil roulant robotisé aux prothèses et orthèses de membres, le secteur de la santé affiche de nombreux progrès technologiques. Le contrôle de ces systèmes par des interfaces neuronales afférentes est aujourd'hui envisagé via des technologies de capteurs invasifs et non invasifs en exploitant les signaux corticaux. Après classification, les signaux cérébraux sont traduits en consignes pour produire des actions ou moduler des paramètres de commande. Il ne s'agit à ce jour que d'un domaine de recherche dans lequel de nombreux laboratoires de l'INSERM, de l'INRIA et du CNRS sont particulièrement actifs. Les perspectives offertes par ces technologies dépassent le domaine du handicap et peuvent concerner d'autres domaines dans lesquels elles constitueront des systèmes de pilotage alternatifs ou complémentaires à ceux engageant des modalités physiques.

Les défis commerciaux et d'usages à relever

Les défis commerciaux sont fortement liés à ceux de la technologie clé robotique autonome, mais se complètent de certains verrous propres aux secteurs d'application.

■ Industrie et PME

Permettre aux industriels de s'équiper d'un robot collaboratif, capable d'effectuer de nombreuses tâches et de s'adapter plus rapidement aux aléas et aux changements de missions s'avèrerait être un levier considérable pour la compétitivité des entreprises. De nombreux soutiens à la robotisation ont été mis en place en France depuis 2012 (Robot StartPME, etc.) à destination des entreprises, principalement des PME.

Néanmoins, l'adoption de cobots dans les processus de l'entreprise repose sur une remise en question d'une partie de ces processus d'une part, de la place de l'opérateur d'autre part. Les impacts sont donc d'ordre organisationnel et social, que seuls les grands groupes industriels et ETI savent aujourd'hui appréhender.

■ Secteur médical

Si, comme pour les robots autonomes, l'arrivée de solutions intelligentes pousse à changer les habitudes et à revoir les modèles économiques, la cobotique pour la santé s'inscrit dans un cadre de financement et de qualification complexe ; les acteurs intervenant alors dans les modèles économiques sont nombreux : assurance maladie, mutuelles, établissements de santé, collectivités, familles… Le principal défi commercial pour tous les dispositifs liés à la santé sera donc dans le modèle économique et dans l'homologation des systèmes qui seront considérés comme relevant du dispositif médical. Dans ce dernier cas, l'absence d'homologation globale au niveau européen constitue un facteur de risque pour les entreprises françaises face à leurs concurrentes des États Unis disposant d'un marché intérieur suffisant pour leur développement initial.

Les enjeux réglementaires

Au-delà des homologations pour les dispositifs médicaux citées ci-dessus, le premier enjeu adressé par la normalisation (plus que par la réglementation), concerne la sécurité des personnes évoluant dans l'environnement du cobot ou en collaboration avec lui. Le groupe de travail ISO/TC 184/SC 2 travaille sur ces questions autour des normes publiées ou en cours d'élaboration : ISO 10-218 pour les robots industriels, ISO 13482 pour les robots d'assistance personnelle, IEC/NP 80601 pour les robots médicaux…. Les cobots sont par ailleurs soumis à la directive Machine 2006/42/CE, notamment pour les questions de sécurité et de responsabilité du fabricant pour mener une évaluation du risque.

Autre enjeu, réglementaire celui-ci, les risques faisant peser sur la vie privée les interfaces de vision augmentée (lunettes) utilisées sur l'espace public : des recours ont déjà été déposés à l'encontre des Google Glass. Ces recours n'ont cependant pas d'incidence sur les systèmes pour milieu professionnel (cf. fiche Technologies Immersives).

Analyse AFOM

ATOUTS

Une excellence de la recherche autour des compétences de la robotique, notamment sur l'intelligence artificielle, la perception et le traitement de l'information.

Le système français d'amorçage facilitant la création de startups (mais pas toujours leur développement)

FAIBLESSES

La robotisation des industries françaises est très en retard, et elle souffre toujours d'un déficit chronique d'investissements.

OPPORTUNITÉS

Le développement de fonds d'investissement spécialisés dans la robotique et le fort intérêt des fonds corporate.

Les évolutions attendues des systèmes de production (industrie 4.0)

MENACES

Les États-Unis, l'Allemagne et l'Asie sont très en avance et continuent leur forte croissance de même que certains pays comme l'Italie ou la Suisse.

Le mouvement amorcé de consolidation des acteurs de robotique qui poussent les grands acteurs internationaux (GAFA) à racheter les pépites.

Facteurs clés de succès et recommandations

La cobotique et l'humain augmenté, s'ils partagent des verrous et solutions technologiques, présentent des caractéristiques de marchés différentes :

- Dans les deux cas, le seul marché français est insuffisant pour porter le développement d'une offre commerciale. Pour une startup, il est donc essentiel de s'intéresser très rapidement à l'export en fonction de son ambition.
- La cobotique suppose également, en général, des changements dans les habitudes de travail qu'il convient de prendre en compte dans les démarches commerciales et de déploiement (conduite du changement).
- Les systèmes d'assistance font face à des enjeux importants de modèle économique, comme décrit précédemment. La prise en compte de ce modèle est en l'occurrence d'une importance égale à la levée des verrous techniques pour le développement de l'activité des entreprises.

La cobotique est un domaine dans lequel la France doit être présente et a la capacité d'offrir des produits qui combinent matériels et logiciels. La cobotique constitue aussi une opportunité pour la France de se positionner sur certains nouveaux créneaux de la robotique industrielle, en s'appuyant sur le haut niveau académique de sa recherche, sur un tissu dense de startups et l'implication de grands prescripteurs dans les actions liées à l'Industrie 4.0. Un but du programme Industrie du futur de la Nouvelle France Industrielle est de constituer une offre française de robotique interactive et de veiller à l'appropriation de ces nouvelles technologies par les intégrateurs.

Le premier concours français sur la collaboration homme/robot et la cobotique en milieu

professionnel a eu lieu en février 2015. Ce concours a permis de récompenser 3 consortiums autour de projets de micro assemblage compact, d'assistants et instruments cobotiques de chirurgie, et d'assistance et de désherbage mécanique pour les agriculteurs. Ce concours a suscité beaucoup d'intérêt et a permis de stimuler techniquement les différents acteurs de la robotique collaborative pour le développement de nouvelles applications. Renouveler et développer ce type de concours constitueraient un moyen efficace pour rapprocher les fabricants et les utilisateurs, stimuler l'innovation et attirer les financeurs.

Acteurs clés

Entreprises	Aldebaran Robotics, Akeo+, Balyo, Naio Technologies, Neoditech, RB3D, Wandercraft…
IRT, ITE, IHU	IRT Saint-Exupéry, SystemX…
Instituts Carnot	CEA LIST, CEA LETI, INRIA, IRSTEA, I@L, LAAS CNRS, ONERA, TSN…
Autres centres de recherches	CRISTAL, CAOR/Mines ParisTech, ENSC, IRCCyN, ISIR, UTC…
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, CapDigital, EMC2, IDforCAR, I-Trans, LUTB, Mov'eo, Novalog, Picom, Systematic, Véhicule du futur, Viaméca…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	CITC EuraRFID, FPDC, GdR Robotique, SYMOP, SYROBO…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

11 Intelligence artificielle

LOISIRS & CULTURE
Énergie, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
Environnement, Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Apprentissage automatique; Reconnaissance vocale et gestuelle; Robotique de service; Aide à la prise de décision ; Perception, Systèmes multi-agents

© LAAS-CNRSGepetto

Définition et périmètre

Définition

L'intelligence artificielle (IA) a pour objectif la construction d'entités « douées » d'intelligence. L'intelligence peut être décomposée en briques élémentaires pouvant être reproduites par une machine : l'IA tente donc de recréer ou « imiter » certaines aptitudes de l'intelligence humaine, comme la mémoire, le raisonnement, la prise de décision et la résolution de problèmes ou la perception. L'approche peut être empirique, en se basant sur le domaine interdisciplinaire des sciences cognitives, ou rationnelle, en combinant des outils mathématiques et informatiques pour modéliser le processus de la pensée et du comportement humain[1].

Sous-domaines de l'IA

Face à la diversité des facultés de l'intelligence humaine que l'IA est amenée à reproduire, il existe plusieurs sous-domaines :

■ **Représentation des connaissances et raisonnement automatique.** Il s'agit de représenter des données qui peuvent être incomplètes, incertaines, ou incohérentes et de mettre en œuvre un raisonnement.

■ **Résolution de problèmes généraux.** L'objectif est de créer des algorithmes généraux (recherche heuristique) pour résoudre des problèmes concrets comme la résolution d'un jeu d'échecs par exemple. Ce sous-domaine fait notamment appel à la théorie des jeux, à la théorie des graphes, etc.

■ **Traitement du langage naturel**. Ce sous-domaine vise à la compréhension, la traduction, ou la production du langage (écrit ou parlé).

■ **Vision artificielle**. Le but est de créer des systèmes capables de comprendre les images et les vidéos pour reconnaître des objets, des véhicules, des personnes, des visages ou des chiffres par exemple.

■ **Apprentissage automatique**. Cette branche de l'IA s'attache à concevoir des programmes capables de s'auto-modifier en fonction de leur expérience.

■ **Les systèmes multi-agents.** Il s'agit de systèmes dans lesquels des agents artificiels opèrent collectivement et de façon décentralisée pour accomplir une tâche.

Il existe des liens très forts entre ces disciplines mais aussi avec la psychologie, les neurosciences, les sciences cognitives, la linguistique et l'économie. L'IA repose sur de très nombreux principes : la logique floue, la logique booléenne, le test de Turing, les algorithmes, les réseaux neuronaux, le pathfinding, ….

Figure 1 : Ramifications de l'IA selon l'AFIA IA et aide à la prise de décision

IA et aide à la prise de décision

Les IA actuelles fonctionnent en trois étapes : perception de l'environnement, décision qui fait appel au raisonnement et à l'apprentissage, action tournée vers l'environnement. Elles procurent souvent des éléments clés d'aide à la décision dans le diagnostic médical[2] ou la prise de décision comme sur les marchés financiers où les algorithmes du trading à haute fréquence (THF) génèrent seuls, sans intervention humaine, une bonne partie (40 %) des transactions sur les marchés boursiers. Cette aide à la prise de décision se retrouve dans le secteur de la robotique de service avec Nao et Pepper de la compagnie Aldebaran ou la famille de robots de l'entreprise française HAAPIE qui regroupe une série de compagnons domestiques polyvalents et interactifs, sociaux et cognitifs, capables d'apprendre et de comprendre les préférences des utilisateurs afin d'agir en fonction de leurs habitudes. Ils sont également utilisés dans le monde professionnel, afin de faciliter la recherche d'information et fournir une aide à la décision grâce à leur capacité à ingérer des grandes quantités de données. À titre d'exemple, l'algorithme VITAL est membre du conseil d'administration de DEEP KNOWLEDGE VENTURES et participe aux décisions d'investissement en analysant les bilans comptables des entreprises potentiellement intéressantes, la propriété intellectuelle…

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Il y a un réel renouveau des recherches sur l'IA dû à la démocratisation de moyens de calculs puissants, à l'accès à des données massives (*Big Data*) et aux progrès enregistrés dans la conception et la fabrication de puces électroniques qui imitent le fonctionnement du cerveau[3]... On assiste également à une prise de conscience du besoin de confronter les systèmes IA au monde physique avec le domaine de la robotique[4]. L'ANR estime que son aide sur le sujet s'élève, depuis sa création en 2005, à plus de 100 M€, ce qui correspond à un volume de recherche de l'ordre de 250 M€[5].

Le déploiement de l'analyse prédictive grâce au Big Data et à l'IA

L'apparition de nouvelles technologies d'apprentissage automatique (machine learning) rend possible l'analyse et la corrélation de données massives par les machines capables d'en tirer des conclusions. Le «Deep Learning » a été classé parmi les dix technologies d'avenir en 2013 par le MIT (Massachusetts Institute of Technology)[6]. L'IA, associée au Big Data, amorce le déploiement de l'analyse prédictive, qui consiste à anticiper les phénomènes politiques, économiques et sociaux et répond à des enjeux de sécurité forts. Skynet, l'algorithme « intelligent » de surveillance de la NSA, utilise les données mobiles pour identifier de potentiels terroristes. Au-delà de cette application controversée, la recherche applique l'IA à la prédiction et l'amélioration de la gestion de catastrophes humaines, naturelles et technologiques comme les séismes[7], les feux de forêts[8], les déraillements de train, … La National Science Foundation, la Japan Science et la Technology Agency financent d'ailleurs un programme

1 – TSCHIRHART F., 2009 ; *Réseaux de neurones formels appliqués à l'IA et au jeu, Mémoire de recherche, Paris, École Supérieure de Génie Informatique*, 90 p.

2 – Paristech review. Systèmes experts: jusqu'où peut-on automatiser l'intelligence? [en ligne]. <http://www.paristechreview.com/2014/04/29/systemes-experts/> [12 juin 2015].

3 – USINE DIGITALE. Deep learning, big data, réseaux de neurones... pourquoi l'IA revient-elle maintenant. [en ligne]. <http://www.usine-digitale.fr/editorial/deep-learning-big-data-reseaux-de-neurones-pourquoi-l-intelligence-artificielle-revient-elle-maintenant.N327758> [12 juin 2015].

4 – Industries & Technologies. Homme-robot ; les outils d'une relation réussie [en ligne]. <http://www.industrie-techno.com/homme-robot-les-outils-d-une-relation-reussie.33087> [12 juin 2015].

5 – ANR. [en ligne]. Les cahiers de l'ANR n°4. IA et robotique «Confluences de l'Homme et des STIC». <http://pages.isir.upmc.fr/~gas/pam/img_auth.php/4/4c/1340774899_Cahier-ANR-4-Intelligence-Artificielle.pdf> [12 juin 2015].

6 – La revue européenne des médias et du numérique. IA et machine learning [en ligne]. <http://la-rem.eu/2014/09/02/intelligence-artificielle-et-machine-learning/> [12 juin 2015].

7 – Azam, F., Sharif, M., Yasmin, M., Mohsin, S. (2014). *Artificial intelligence based techniques for earthquake prediction: a review*. Science International Lahore, vol. 4, 1495-1502.

8 – Castelli, M., Vanneschi, L., & Popovic, A. (2015). *Predicting burned areas of forestry fires: an artificial intelligence approach*. Fire Ecology, vol 11(1), 106-118.

de recherche dédié à l'amélioration de l'analyse du Big Data pour le management des catastrophes. Le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) a d'ailleurs fait appel à IBM pour construire un réseau de supercalculateurs et de stockage consacré à la prévision météorologique. Les météorologues pourront ainsi offrir de nouvelles prévisions plus précises. Les techniques du marketing et de la publicité ciblée sont également visées puisque l'IA permettra d'anticiper avec une précision sans précédent les comportements des acheteurs potentiels.

Un intérêt européen fort vis-à-vis de l'IA

Le projet Human Brain Project, porté par l'EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) témoigne de l'intérêt fort de l'Union Européenne (UE) pour l'IA. Human Brain Project[9] (HBP) est un projet scientifique lancé fin 2013 qui vise à réaliser une simulation numérique complète du fonctionnement d'un cerveau humain grâce à des superordinateurs. Ce projet, doté de 1,2 milliard d'euros sur dix ans, est l'un des deux FET Flagships («programmes phares de recherche») de l'UE et couvre à la fois des problématiques relatives aux neurosciences, à la médecine (thérapies pour les maladies neurodégénératives) et aux technologies de l'information (conception d'ordinateurs fonctionnant sur le modèle des connexions neuronales). Le projet HBP trouve ses origines dans le projet suisse Blue Brain[10][10] qui a débuté en 2005 avec pour objectif la construction d'un cerveau virtuel à l'aide d'un supercalculateur afin de générer des modèles qui serviront de « briques » pour la construction d'un cerveau virtuel complet. Porté par l'EPFL, le projet s'appuie sur BlueGene, un supercalculateur fourni par IBM pour construire ce cerveau virtuel. La puissance de calcul nécessaire est colossale: la simulation d'un neurone nécessite l'équivalent d'un ordinateur portable, sachant qu'un cerveau humain contient deux millions de colonnes corticales, avec environ 100 000 neurones chacune.

Des chercheurs français sollicités par des groupes internationaux

Facebook a ouvert en juin 2015 son premier laboratoire hors du territoire américain et a choisi de l'implanter à Paris sous la direction du Français Yann LeCun[11]. Ce choix s'explique en raison de l'existence d'un « domaine d'excellence en France en matière

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent l'intelligence artificielle sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs
10	Cobotique et humain augmenté
12	Robotique autonome

Les technologies influencées par l'intelligence artificielle sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
10	Cobotique et humain augmenté
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées

9 – European Commision. Human Brain Project [En ligne] <https://www.humanbrainproject.eu/discover/the-project/overview;jsessionid=qzwwcl7o5hu0v96vu6jyv7j5> [30 juin 2015].

10 – EPFL. L'Institut des Neurosciences & le projet Blue Brain. [En ligne] <http://sv.epfl.ch/neurosciences> [30 juin 2015].

11 – Sciences & Avenir. IA ; Facebook ouvre un labo à Paris [en ligne]. <http://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/20150602.OBS0017/a-paris-un-laboratoire-de-facebook-sur-l-intelligence-artificielle.html> [12 juin 2015].

de vision par ordinateur». De son côté, MICROSOFT RESEARCH a noué un partenariat de recherche avec l'INRIA. Un défi pour l'avenir de cette technologie consistera notamment à limiter la « fuite » des ingénieurs IA. Par ailleurs, la maîtrise de ces technologies est indispensable pour rester un acteur qui compte sur le secteur des jeux vidéo. 1er marché mondial des industries culturelles, le chiffre d'affaires du secteur des jeux vidéo représente en 2014 environ 66 milliards d'euros au niveau mondial et 2,9 milliards d'euros pour la France[12].

Les technologies clés qui influencent l'intelligence artificielle sont :	
13	Communications sécurisées
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
21	Supercalculateurs
33	Exploitation numérique des données de santé
46	Nanoélectronique

Les technologies influencées par l'intelligence artificielle sont :	
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
21	Supercalculateurs
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les marchés

Exemples d'applications de l'IA

Plusieurs applications de l'IA sont d'ores et déjà omniprésentes dans la vie quotidienne. En voici quelques exemples :

- **Les assistants personnels numériques présents dans les smartphones** dotés d'une interface vocale et capables d'anticiper les besoins de l'utilisateur grâce à son intelligence artificielle couplée à un accès direct aux données personnelles de l'utilisateur (messages, emails, carnet d'adresses, calendrier, localisation…)

- **Les agents conversationnels qui sont de plus en plus présents dans** les domaines du support client et du télémarketing sous la forme de fenêtre de chat sur un site web ou de serveur vocal. Ces « chatterbots » permettent de répondre aux questions les plus simples grâce à l'utilisation du langage naturel et l'accès à de vastes bases de données.

- **La reconnaissance faciale** issue de la vision artificielle est utilisée dans les appareils photos pour détecter automatiquement les visages ou sur Facebook pour reconnaître les personnes présentes sur les photos.

- **La recherche par le contenu** (visuel, multimédia…).

- **Les caméras intelligentes** (smart sensors).

- **Les moteurs de recherche** qui sont basés sur des systèmes intelligents d'extraction, d'analyse et de classification de données pour produire un résultat pertinent à la requête de l'utilisateur.

- **Les moteurs de recommandation** sont des technologies prédictives qui s'appuient sur les données issues de la navigation et des achats d'un utilisateur pour lui conseiller des produits similaires.

- **La traduction automatique** qui repose sur des algorithmes de modélisation statistique du langage naturel en intégrant les règles de construction de chaque langue.

- **Les véhicules autonomes.** Des briques d'intelligences artificielles sont déjà intégrées dans les voitures capables de se garer toutes seules, de freiner par anticipation, et bientôt de rouler en autonomie dans certaines conditions de circulation[13]. L'IA est aussi

12 – SNJV : Baromètre 2014 du marché du jeu vidéo

13 – Industries & Technologies. Inspiration Truck ; le premier camion autonome autorisé à rouler dans le Nevada [en ligne]. <http://www.industrie-techno.com/inspiration-truck-le-premier-camion-autonome-autorise-a-rouler-dans-le-nevada.38140> [12 juin 2015].

présente dans le pilotage automatique des avions et la gestion de trajectoire des véhicules spatiaux. Comme le soulignait Philippe Crist, économiste au Forum International des Transports, lors du sommet 2015 de l'organisation, les données seront le carburant de la mobilité urbaine du 21ème siècle.

■ **Les jeux vidéo** où l'IA concerne entre autres les prises de décision des personnages non joueurs gérés par le jeu qui doivent être capables d'avoir un comportement crédible lorsqu'ils s'adaptent à des situations non prévues. Au-delà du rôle de l'IA dans l'expérience joueur, elle participe à la conception des contenus, elle permet aux *game designers* de tester la pertinence des réglages du système en jouant un nombre astronomique de parties pour mettre en avant des déséquilibres ou des stratégies dominantes.

■ **L'entraînement et la formation.**

■ **La robotique**

Au-delà du secteur loisirs et culture, l'intelligence artificielle est présente dans les secteurs de l'énergie, de la santé, de l'urbanisation…

Quelques chiffres sur le marché de l'IA

Le marché global de l'IA a été chiffré à 900 millions de dollars en 2013 par Research and Markets. Le marché mondial des outils et des applications basés sur l'IA croît rapidement et devrait passer de 700 millions d'euros en 2013 à 27 milliards d'euros en 2015 selon une étude du *Business Innovation Observatory* de la Commission européenne. Les évaluations de l'étude de Tractica prévoient que le marché mondial des systèmes basés sur l'IA dédiés aux applications de l'entreprise, passera de 202,5 millions de dollars en 2015 à 11,1 milliards de dollars en 2024[14]. Dans une étude publiée en mai 2014, BCC Research évalue le marché mondial des machines intelligentes à 15,3 milliards de dollars d'ici à 2019[15]. Ces chiffres englobent les systèmes experts, les robots autonomes, les systèmes d'assistance numériques, les systèmes embarqués intelligents et les systèmes neuronaux. Les systèmes experts représentent la plus grosse part de marché suivis par les robots autonomes qui devraient passer devant d'ici à 2024.

Le marché de l'IA devrait croître notamment grâce à l'apprentissage automatique appliqué à l'industrie pour réduire les coûts de production, grâce aux systèmes d'assistance numériques et aux systèmes experts. Les systèmes dits «experts», capables de reproduire la capacité de prise de décision humaine pour une opération spécifique, sont de plus en plus utilisés dans l'aviation (simulateur de vol), la défense (cyberdéfense, téléguidage d'avions et de missiles) et la finance. Les secteurs les plus porteurs devraient être la finance, le divertissement, la défense, les transports, la santé, l'industrie et l'éducation[16]. On assiste à une tendance forte d'acquisition de la part des grandes entreprises pour renforcer leur positionnement sur le secteur de l'IA.

Selon une étude de *Transparency Market Research*, le marché des logiciels d'analyse prédictive représentait 2 milliards de dollars en 2012 mais devrait représenter 6.5 milliards de dollars en 2019. Une étude Gartner prédit qu'au moins 10 % des activités mettant en danger la vie des personnes seront prises en charge par des systèmes intelligents d'ici à 2024. À titre d'exemple, les systèmes avancés d'assistance à la conduite représenteront 16 milliards d'euros en 2019[17], et les systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile pour les personnes âgées représentent déjà un marché d'1 milliard de dollars[18].

Les défis technologiques à relever

Les défis et les segments porteurs selon l'ANR[19] concernent :

■ **L'évolution indispensable vers le Web sémantique** soulève des défis de représentation de

14 – Tractica. Artificial Intelligence for Enterprise Applications to Reach $11.1 Billion in Market Value by 2024. [En ligne]. <https://www.tractica.com/newsroom/press-releases/artificial-intelligence-for-enterprise-applications-to-reach-11-1-billion-in-market-value-by-2024/> [30 juin 2015].

15 – BCC RESEARCH. Global Market for Smart Machines Expected to Reach $15.3 Billion in 2019; Autonomous Robots Moving at 22.8 % CAGR.[En ligne] <http://www.bccresearch.com/pressroom/ias/global-market-smart-machines-expected-reach-$15.3-billion-2019> [30 juin 2015].

16 – TRANSPARENCY MARKET RESEARCH. Artificial Intelligence Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2014 – 2022. [En ligne]. <http://www.transparencymarketresearch.com/artificial-intelligence-market.html> [30 juin 2015].

17 – STRATEGY ANALYTICS. Advanced Driver Assistance Systems Euro NCAP gives $2.8 Billion Boost to Demand. [En ligne].<https://www.strategyanalytics.com/access-services/automotive/powertrain-body-chassis-and-safety/reports/report-detail/advanced-driver-assistance-systems-euro-ncap-gives-$2-8-billion-boost-to-demand?Related#.VZYuIUZ7vNk> [30 juin 2015]

18 – SIEMENS. Facts and Forecasts: Boom for Learning Systems. [En ligne]. <http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/digitalization-and-software/artificial-intelligence-facts-and-forecasts.html> [30 juin 2015]

19 – ANR. Les cahiers de l'ANR n°4. IA et robotique «Confluences de l'Homme et des STIC».[En ligne].<http://pages.isir.upmc.fr/~gas/pam/img_auth.php/4/4c/1340774899_Cahier-ANR-4-Intelligence-Artificielle.pdf> [12 juin 2015].

l'information et des connaissances, de langages pour exprimer ces connaissances et les traitements à effectuer, de manipulation et de visualisation de réseaux liant les concepts sémantiques et de développement des ontologies, modèles partagés de représentation d'un domaine.

■ **La quantité d'information sur Internet** ne cesse d'augmenter. Selon IBM, la production de données numériques en 2014 se mesure en exaoctets, soit 10^{18} octets et on estime que tous les deux ans, il se crée autant de données que depuis le début de l'humanité, ce qui amène les prévisionnistes à parler de 40 zettaoctets (10^{21}) pour 2020[20]. Ce «data déluge» selon le terme consacré, pose des défis de performance et de passage à l'échelle des outils et méthodes, de prise en compte de structures et formats spécifiques, d'hétérogénéité des contenus et l'absence de référentiel commun, de répartition sur des serveurs distants. **La fouille des données, non structurées et non homogènes, sur les réseaux sociaux constitue un challenge d'intérêt économique** qui nécessite de concevoir des algorithmes adaptés… Au niveau national, EXALEAD/DASSAULT SYSTEMES sont fortement impliqués sur ces sujets à travers des programmes comme QUAERO ou KXEN.

■ La possibilité de concevoir un système capable de faire face à toutes les situations qu'il rencontrera au cours de son existence a été abandonnée tant la diversité des situations est importante et imprévisible. Il est donc devenu essentiel de **concevoir des systèmes capables de s'auto-adapter. Cette faculté d'adaptation peut être obtenue grâce à des techniques d'apprentissage automatique**, soit à partir d'un ensemble de données représentatif des situations possibles que connaîtra le système, soit dynamiquement à partir de données captées lors de son fonctionnement. Cet apprentissage peut être supervisé ou non.

■ **La répartition des fonctions et des connaissances sur un ensemble de systèmes mis en réseau** peut fournir une réponse adaptée aux défis de complexité et de taille des applications. Les défis des systèmes intelligents distribués, multi-agents, sont nombreux: définition du rôle de chaque sous-système et structuration en sous-groupes, répartition des connaissances, optimisation des communications, définition des vocabulaires et langages utilisés pour la communication, planification et synchronisation des actions communes, prise en compte des plans et intentions des autres agents, etc. L'ingénierie et la mise au point de plates-formes d'exécution de ces systèmes distribués posent également des défis méthodologiques et pratiques importants.

■ **Les systèmes intelligents d'aujourd'hui se doivent d'être capables de raisonner dans le temps et dans l'espace**. Des formalismes de représentation du temps et de l'espace ont été établis par les chercheurs mais il s'agit maintenant de raisonner efficacement sur ces représentations, la problématique du raisonnement étant évidemment bien plus complexe que pour des grandeurs scalaires ou symboliques, en raison du caractère dynamique et distribué spatialement de l'information.

■ Par ailleurs, l'intégration de la physique quantique dans l'informatique révolutionnerait l'IA en permettant la résolution d'algorithmes qui actuellement nécessiteraient plusieurs dizaines d'années mais des verrous technologiques majeurs restent à lever comme celui de l'architecture de l'ordinateur quantique.

Les défis commerciaux et d'usages à relever

Le développement de la robotique personnelle passe par la réponse à un besoin

La recherche ne cesse de développer de nouvelles techniques d'IA et le défi consiste à trouver des applications commerciales répondant à un réel besoin. À titre d'exemple, le robot compagnon Pepper de la société Aldebaran Robotics a ainsi trouvé son application dans l'accueil des clients en boutique. En ce qui concerne le marché de la robotique personnelle et de services, il est nécessaire de travailler sur l'acceptabilité vis-à-vis du robot compagnon qui devrait être facilitée par la proposition d'une nouvelle expérience utilisateur, de nouveaux usages grâce à l'IA. Les premières applications devraient être avant tout ludiques, informatives ou formatrices afin de créer le lien indispensable entre la personne et le robot. Ensuite il sera possible de développer des applications plus réglementées ou complexes dans la mesure où l'usager aura su donner une place au robot domestique. L'adaptabilité réciproque sera primordiale pour l'interaction robot – humain.

20 – IBM. Guide du Big Data. [en ligne]. <http://www.bigdataparis.com/guide/Guide_du_Big_Data_2013_2014.pdf> [12 juin 2015].

Les freins à l'adoption de l'IA par les entreprises

L'adoption massive de l'IA par les entreprises est entravée par le montant des investissements à long terme, la compréhension limitée du potentiel des données générées par l'entreprise et l'hésitation à se tourner vers des technologies potentiellement perturbatrices selon une étude du *Business Innovation Observatory* de la Commission Européenne. Les entreprises qui ont un intérêt pour des technologies d'IA ont tendance à reporter leur projet d'investissement en raison de ROI trop longs et de la nouveauté des technologies qui rend difficile l'analyse coûts/bénéfices. Les avantages de l'IA pour l'analyse de données massives ne sont pas évidents pour les entreprises qui manquent de visibilité sur la quantité de données qu'elles génèrent et l'usage qu'elles peuvent en faire. Par ailleurs, l'introduction de solutions IA dans une entreprise peut être synonyme d'une refonte des structures et des processus, susceptible de décourager les entreprises. Enfin, l'adoption d'une solution IA nécessite la prise en compte d'un risque technologique fort en cas de dysfonctionnement. L'enjeu pour les développeurs de solutions IA est de rendre la « technologie accessible simplement en gardant en toile de fond les impératifs métier et [le] manque de temps pour se former à de nouveaux outils » comme l'explique Jean Rauscher, PDG d'Yseop, une entreprise française qui propose des solutions IA dédiées aux entreprises. C'est également une des voies de valorisation choisies par IBM pour son supercalculateur Watson.

L'intégration de l'IA, une condition *sine qua non* pour perdurer dans l'univers du jeu vidéo

Enfin, appliquer les concepts de l'IA au jeu vidéo est un biais indispensable pour renforcer la crédibilité des personnages virtuels et surtout proposer une expérience nouvelle au joueur. Maîtriser l'intégration des technologies de l'IA dans les jeux vidéo est une condition *sine qua non* pour les acteurs français déjà implantés sur les jeux vidéo pour conserver leur position de « leader ». Il leur appartient donc de parfaitement maîtriser cette technologie de l'IA et ses évolutions pour séduire toujours davantage les joueurs, leur proposer de nouvelles expériences utilisateur dans un univers de plus en plus réel.

Les enjeux réglementaires

Plusieurs problèmes d'ordre éthique sont soulevés par les progrès rapides de l'IA. Parmi ses détracteurs, on peut citer le fondateur de Microsoft Bill Gates, Elon Musk le dirigeant de Tesla ou encore le physicien Stephen Hawking qui s'inquiète de la capacité des machines à évoluer plus rapidement que « les humains, limités par une lente évolution biologique, [qui] ne pourraient pas rivaliser et seraient dépassés [21]». L'intelligence artificielle est assimilée par certains acteurs à une rupture technologique qui engendrerait une croissance exponentielle de la connaissance jusqu'à un point au-delà duquel il ne serait plus possible de l'appréhender selon le concept de la singularité technologique. L'AAI (Association for the Advancement of Artificial Intelligence) a d'ailleurs réalisé une étude en 2009 sur les impacts sociétaux de l'explosion de l'intelligence artificielle sur le long terme. Au-delà de ces considérations qui contribuent à alimenter la réflexion quant à la nécessité d'un encadrement des recherches sur l'IA, les deux principaux risques sont les bugs et les cyber-attaques qui impliquent une démarche de certification de la qualité de logiciels. Les capacités de l'IA associées à la collecte d'informations et au Big Data posent également des problèmes de confidentialité et d'utilisation des données personnelles d'un point de vue réglementaire. La généralisation d'applications militaires comme les drones, de plus en plus autonomes, souligne la nécessité de poser un certain nombre de limites à ce qu'on accepte qu'une machine fasse, dont la prise de décision comme l'autorisation de tirer sur un être humain. Elon Musk a d'ailleurs fait un don de 10 millions de dollars au *Future of Life Institute*, «*pour financer un programme mondial de recherche visant à garder l'IA bénéfique pour l'humanité* » en évaluant notamment son impact sur la société. Dans le cadre du Flagship HBP, l'un des douze sous-projets s'intitule « éthique et société ». Ses objectifs sont d'explorer les implications sociales, éthiques et philosophiques du projet, promouvoir l'engagement avec les décideurs et le grand public, favoriser la recherche et l'innovation responsables par la sensibilisation sociale et éthique des participants au projet, et veiller à ce que le projet soit conforme aux normes juridiques et éthiques pertinentes.

Dans le cas de la robotique de loisirs, il existe peu de contraintes réglementaires, facilitant ainsi un accès au marché plus rapide. Les règles qui s'appliquent sont

21 – LE MONDE. Hawking ; « L'IA pourrait mettre fin à l'humanité » [En ligne] <http://www.lemonde.fr/pixels/article/2014/12/03/hawking-l-intelligence-artificielle-pourrait-mettre-fin-a-l-humanite_4533135_4408996.html> [30 juin 2015]

celles autour du contenu et de leur adaptabilité à l'âge de l'utilisateur. Au même titre que pour le jeu vidéo qui dispose d'une réglementation européenne (PEGI) et de pictogrammes sur les boîtes de jeux de consoles, Il sera sûrement utile de définir quelques règles autour des contenus qui seront disponibles pour les robots de loisirs. Bien évidemment, il sera toujours délicat d'être derrière chaque enfant ou adolescent et la solution passera comme toujours par un travail pédagogique des parents autour du contenu et de l'usage de ces nouveaux outils.

En ce qui concerne la mise en service des voitures autonomes, cela dépendra certes des développements technologiques mais surtout des exigences juridiques associées. Pour l'instant, le code de la route international s'appuie sur la Convention de Vienne (1968) qui prévoit que le conducteur est responsable de son véhicule et doit avoir les deux mains sur le volant. Selon François Peyret, directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), « tant qu'on reste dans la «délégation de conduite» où le conducteur peut reprendre à tout instant la main sur le véhicule », la réglementation actuelle suffit. Mais des vides juridiques vont apparaître avec le développement de véhicules de plus en plus autonomes, notamment en ce qui concerne la responsabilité en cas d'accident : est-ce qu'il faut incriminer le propriétaire du véhicule autonome, l'autre conducteur impliqué, le développeur qui a conçu l'algorithme, le constructeur... L'intégration d'une « boîte noire » dans les véhicules devrait permettre d'apporter des éléments de réponse. La question de la présence d'un conducteur pour reprendre les commandes en cas de défaillance du système nécessitera une révision des réglementations en profondeur. Le Forum International des Transports (organisation internationale liée à l'OCDE) plaide pour une approche commune de l'encadrement réglementaire du véhicule autonome entre pays voisins, comme l'a rappelé son secrétaire général, M. Viegas, lors du sommet annuel 2015 de l'organisation.

Analyse AFOM

ATOUTS

Centres de R&D de référence sur le sujet

Foisonnement de start-ups

Plan Robotique efficace, Plans «Logiciel et Systèmes embarqués » ; « Big Data » et « supercalculateur »

FAIBLESSES

Peu de leaders affirmés dans le secteur « Loisirs et Culture » mais des acteurs clés dans les secteurs des environnements supercalculateurs et des logiciels embarqués

Approche des nouveaux usages freinée par l'appréhension des dérives possibles. Le jeu vidéo est moins concerné par ces inquiétudes.

OPPORTUNITÉS

Développement des usages liés à la robotique personnelle et de services

Marché mondial du jeu vidéo en progression

Logique de « gamification» dans beaucoup de secteurs

Marché de la conduite assistée

Croissance du marché de l'analyse prédictive associée à l'augmentation des données massives (finance, sécurité,…)

MENACES

La plupart des grands acteurs sont américains

Facteurs clés de succès et recommandations

Le développement de l'IA va conduire à une augmentation de la demande en main-d'œuvre qualifiée, en particulier pour les informaticiens et les mathématiciens mais aussi en neuroscience. Ce développement en Europe comporte un certain nombre de moteurs parmi lesquels une main-d'œuvre hautement qualifiée, la flexibilité des solutions développées et les programmes publics français et européens de soutien à l'innovation (FUI, PIA, Horizon 2020, COSME,…). Mais ce développement fait face à de nombreux obstacles à savoir la difficulté d'attirer des fonds pour l'entreprise à la fois lors de sa création et lors du désinvestissement financier, la lourdeur des démarches administratives ainsi qu'un environnement fiscal défavorable. L'étude du *Business Innovation Observatory* de la Commission Européenne souligne un manque de soutien de la part des gouvernements européens pour la promotion des entreprises positionnées sur l'IA. Cependant, des avancées significatives récentes ont déjà été constatées, pour améliorer l'accès aux financements et les systèmes fiscaux, pour promouvoir l'innovation, la réglementation de l'emploi, la politique d'immigration et pour encourager l'interaction université-industrie…

L'intégration de l'IA soulève également la question de son impact sur l'économie et l'emploi. Les machines intelligentes devraient s'intégrer massivement dans les entreprises au cours des prochaines décennies et bouleverser certains métiers. On peut citer l'exemple du journalisme où des algorithmes comme celui de Syllabs interviennent de plus en plus en support aux journalistes pour chercher et analyser l'information mais aussi rédiger les articles. Des robots rédacteurs ont ainsi rédigé pour Le Monde des articles locaux sur les résultats des élections départementales de 2015 pour 34 000 communes et 2 000 cantons. Libéré des contraintes de recherche d'informations fastidieuses, le métier de journaliste est voué à muter pour se concentrer sur des articles à plus forte valeur ajoutée avec davantage d'analyse pendant que les robots agrégateurs voire rédacteurs permettent de couvrir davantage d'évènements en temps réel. Ces évolutions supposent aussi de la part des rédactions le recrutement de plus en plus de développeurs pour concevoir les algorithmes, les adapter au style et à la ligne éditoriale du journal… Une réflexion est donc nécessaire comme le souligne une étude Gartner pour sensibiliser les entreprises à ces changements et les accompagner dans la redéfinition des postes concernés.

Pour les entreprises susceptibles de bénéficier de l'IA, il sera indispensable d'avoir une bonne connaissance et une bonne compréhension des données disponibles afin d'accélérer l'acceptation de l'IA. L'IA porte la promesse d'une productivité améliorée de l'entreprise et des individus grâce à des moteurs de recherche plus performants (capitalisation des connaissances, relation client) et aux assistants virtuels personnels (gestion automatisée de l'agenda, réservation de moyens de transports, d'hôtels, de salles de réunion).

L'utilisation de moteurs de recherche plus performants suppose cependant de mieux appréhender la compréhension automatique des contenus c'est-à-dire le passage de la langue naturelle aux représentations logiques pour alimenter divers types de moteurs d'inférences pouvant être appliqués à différents usages (recherche intelligente, diagnostic, simulation, ...). L'ambition des acteurs français dans ce domaine reste limitée alors que les acteurs comme Google, Facebook ou Microsoft en ont fait leur priorité. Le développement de la compréhension automatique des contenus suppose notamment la transcription des contenus audiovisuels en texte en amont. Cela implique de produire (ou favoriser l'émergence d'acteurs et de services à même de produire) des ressources linguistiques (thésaurus, grammaires, frames, taxonomies) et des corpus documentaires annotés en particulier pour le français. Cela implique également de faciliter l'accès par les acteurs technologiques du marché aux contenus de la connaissance (livres, presse, vidéos, TV ou émissions radio à caractère pédagogique) pour exploiter économiquement ces ressources.

Pour les trois marchés principaux concernés que sont la robotique de loisirs et de services, les jeux vidéo et la conduite assistée qui s'appuient sur des

sous-domaines de l'IA sur lesquels la France est bien positionnée, l'IA est perçue comme une aide à la prise de décision. Il s'agit donc de faire l'apprentissage d'un comportement, de comprendre l'activité d'un humain c'est-à-dire son métier. Nous sommes au cœur d'un environnement dynamique dans lequel on perçoit l'environnement.

Les technologies existent souvent et il est primordial de favoriser l'effort d'intégration. Il faut donc accompagner les start-ups dans cette volonté de faire, et d'en forcer l'usage. Au sein des SATT qui sont en proximité des pôles de compétitivité (Cap Digital, Systematic, Aerospace Valley et Imaginove) et également dans les structures de valorisation des laboratoires, il est impératif de favoriser les transferts de technologies vers le marché, d'aider à la création d'applications marché avec une volonté claire d'associer plus rapidement l'innovation et le business modèle.

L'utilisateur final sera au cœur de cette réflexion avec la nécessaire « discrétion » de la technologie au service de nouveaux usages et de nouveaux contenus à inventer pour alimenter le quotidien en matière d'information ou de divertissement. À ce titre, le plan France Robot Initiative est un appui précieux pour le développement de ces usages.

Acteurs clés

Entreprises	Airbus, Alcatel-Lucent, Dassault Systemes, 3DEXPERIENCE Platform - Dassault système, Dynamixyz, Orange Labs, PSA Peugeot Citroën, Sagem, Schneider Electric, Smart me up, Snips, Spirops, Technicolor, Tellmeplus, Thales Communications & Security, Yseop…
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX …
Instituts Carnot	ARTS, CEA LIST, LAAS CNRS, TSN…
Autres centres de recherches	CMLA, CPE Lyon, GREYC, ISIR, LIP6 (UPMC), LITIS - INSA ROUEN, LTCI…
Pôles de compétitivité	CapDigital, Images et Réseaux, Imaginove, Systematic…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	AFIA CITIA, PARIS ACM SIGGRAPH…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
Dans la moyenne	

22 – ACM (The Association for Computing Machinery) SIGGRAPH. [En ligne]. < http://www.siggraph.org/> [16 juin 2015].

12 Robotique autonome

LOISIRS & CULTURE
Énergie, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
ENVIRONNEMENT, Habitat, Santé et bien-être, SÉCURITÉ
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Charge utile, drones, robotique, capteurs, intelligence artificielle, raisonnement, driverless, autonomie, aide à la décision, internet des objets, données, data, vision, perception, apprentissage, réseaux, essaim…

© Photo H Raguet

Définition et périmètre

Initialement un des 34 plans pour la Nouvelle France Industrielle de 2013, la robotique est intégrée à l'Industrie du futur et est considérée comme une technologie à fort enjeu pour les objets intelligents, qui figurent parmi les 9 nouvelles Solutions Industrielles françaises[1].

On peut définir un robot comme un dispositif mécanique et électronique ayant la capacité de traiter de manière autonome de l'information pour effectuer une action appropriée. Le terme *d'autonomie* renvoie alors à une autonomie de décision, d'action, de mouvement ou énergétique.

L'autonomie constitue l'un des enjeux majeurs pour la robotique et correspond à une grande part des activités du domaine. Elle s'adresse à des engins terrestres, aériens, marins, sous-marins et évoluant dans des environnements naturels (intérieurs et extérieurs) ou en regard de situations variables (industrie). Elle concerne également les systèmes destinés aux environnements de la vie quotidienne. La France compte un grand nombre d'acteurs industriels qui sont des offreurs de technologies dans ce cadre et les domaines d'applications se déploient dans tous les champs de l'activité humaine.

La robotique autonome, qu'elle soit terrestre, aérienne ou navale, consiste en des systèmes ou sous-systèmes intelligents – intégrant des **moyens de perception, d'interaction** et des programmes applicatifs opérés dans un **système d'exploitation robotique** (*Robot Operating System*) – offrant une capacité **de modélisation,** d'**analyse,** de **planification,** de **prise de décision** et d'**action** dans la réalisation d'une tâche. Le principe même d'un système autonome est d'être en mesure de traiter une situation non prévue dans son plan initial, nécessitant une capacité d'adaptation à son environnement ou à la situation de travail.

Les systèmes robotiques, considérés jusqu'il y a peu comme des objets techniques à la disposition des ingénieurs, sont aujourd'hui pensés autour de leur usage. Le système robotique tend à devenir de plus en plus « apprenant » et nécessite de moins en moins d'être programmé, tirant partie des avancées sur la perception de l'environnement, sur le recueil et l'analyse des données. Ces capacités d'apprentissage rendent possibles une représentation de l'environnement ou de la situation rencontrée à différents niveaux sémantiques par l'expérience acquise ou l'enseignement.

■ Alimentation

L'industrie agroalimentaire est un champ de développement pour la robotique. L'automatisation des procédés de transformation des aliments est un enjeu économique important pour les industriels du secteur, notamment pour des raisons de compétitivité en termes de prix. L'autonomie d'action du robot doit permettre alors d'appréhender des situations rendues variées par la diversité de forme ou de masse des matières premières manipulées. Notons que le déploiement de robots dans les chaines peut se heurter à de véritables verrous techniques liés à l'hygiène ou à la conservation de la chaine du froid.

■ Environnement

D'un petit robot mobile à un grand drone aérien, les applications pour l'environnement sont variées : robots indoor pour le monitoring et la purification de l'air intérieur (Diya One du français Partnering Robotics), ou à l'image de la startup montpelliéraine Cyléone qui conçoit des systèmes aériens plus ou moins autonomes pour l'étude des sols, la cartographie et l'observation environnementale. À titre d'exemple, l'entreprise française Xamen a dévoilé en avril 2015 un drone de surveillance, certifié ATEX (atmosphère explosive), pour l'inspection de sites et d'installations industrielles, notamment les sites SEVESO. D'autres entreprises françaises, comme RedBird, Delair-Tech ou encore VisioDrones sont également à citer. Enfin, des applications autour de la prévention des risques environnementaux comme la surveillance d'un départ d'incendie et de son évolution dans une forêt sont également porteuses.

L'agriculture est un segment fortement réceptif aux nouveaux usages de robots autonomes, particulièrement en France où le secteur reste une source de croissance économique avérée. Aujourd'hui l'essentiel du marché est constitué par les robots de traite des vaches. Mais l'introduction des drones (aériens et terrestres) ouvre la voie à l'**agriculture de précision et durable** et à ses nombreux usages comme le diagnostic de la santé des récoltes et des besoins des parcelles agricoles, ou encore la détection de maturité d'une récolte. La clé de réussite des systèmes autonomes

1 – Industrie du futur, réunir la Nouvelle France Industrielle, MINEFI, 18 Mai 2015.

dans l'agriculture est leur capacité à **aider à la décision** d'un exploitant dans la gestion raisonnée de ses cultures. Les robots d'entretien des cultures et d'assistance aux récoltes devraient également se développer de façon importante.

L'autonomisation de ces systèmes, aujourd'hui téléopérés, constituera une forte valeur ajoutée pour les utilisateurs et devrait fortement se développer dans les années à venir (cf. enjeux règlementaires « voir et éviter »).

© iRobot

■ Habitat

Ces robots répondent pour l'instant, en général, à des fonctions simples et très spécialisées. Les robots aspirateurs constituent aujourd'hui l'essentiel du marché. Cependant, LG a développé un robot aspirateur intégrant une caméra, permettant la reconnaissance des personnes et ouvrant la voie à des robots plus polyvalents.

Au-delà de ces fonctions simples, de nouveaux concepts arrivent sur le marché, portés par des acteurs comme Bluefrog Robotics ou Awabot : les robots sont ouverts à de nouvelles applications et sont entièrement programmables. Chez Bluefrog par exemple, le robot Buddy est piloté par un système d'exploitation ouvert, permettant d'en rendre les usages évolutifs selon un modèle de plateforme de services popularisé par les environnements iOS ou Android.

■ Santé et bien-être

Les premiers développements phares autour des robots autonomes, essentiellement au Japon, ont été les robots humanoïdes. À l'image de Nao, le robot humanoïde d'Aldebaran conçu en France, ces robots ont vocation à pouvoir communiquer avec les humains et à les accompagner au quotidien. Les usages évoluent et les robots commencent en 2015 à assister les personnes au quotidien, les aider dans leur déplacement (fauteuil roulant automatisé), les surveiller, les aider dans la posologie et la prise des traitements (table médicalisée autonome), etc. en prenant des formes semi-humanoïdes ou non humanoïdes.

■ Sécurité

Ici sont principalement fléchées les applications de sécurité et de défense (Nexter Robotics, ECA, etc.). Beaucoup étant encore téléopérés, les drones sont de plus en plus utilisés pour des missions de surveillance militaire et d'exploration. Cependant, dès lors que la réglementation le permet, certaines parties des missions sont automatisées.

Des robots professionnels et civils font leur apparition sur plusieurs marchés, à l'image du français EOS Innovation qui conçoit des robots gardiens pour la surveillance de sites ou d'entrepôts. Enfin les robots peuvent également être déployés sur des sites sinistrés en cas de catastrophes pour des missions de sauvetage.

■ Mobilité

Le secteur de l'automobile s'ouvre à de nombreuses innovations technologiques grâce notamment aux systèmes avancés d'aide à la conduite (ou ADAS – Advanced Driver Assistance Systems) : aide au stationnement (Valeo), stationnement robotisé (Stanley Robotics), changement de voie automatique (Valeo), etc. Ces systèmes sont aujourd'hui de plus en plus de série sur les véhicules et sont, à l'aube du véhicule autonome, une première amorce de l'intelligence et de l'autonomisation. Outre les transports, le domaine de la logistique est également propice à l'innovation, grâce aux nouveaux usages des robots et drones. Des entreprises françaises comme BA Systèmes, Stanley Robotics ou Balyo sont en pointe dans ce domaine. Des entreprises comme Amazon et DHL sont des prescripteurs importants au niveau mondial et innovent dans les usages comme le montre le projet futuriste de livraison de colis par drones, ou l'inventaire et l'approvisionnement robotisés (Kiva Systems, Balyo, etc.).

■ Numérique

Un robot autonome est considéré comme une machine intelligente capable de percevoir et de communiquer avec son environnement. On peut alors envisager un réseau de robots ou de drones en équipe ou essaim, capables de se relayer des informations et de les diffuser. La dimension multi-robots est essentielle pour de nombreux domaines comme la logistique, la surveillance ou la prospection (exemple : CGG/Total).

La coopération entre des robots constitue un enjeu important pour couvrir les besoins liés à des opérations complexes nécessitant le déploiement de moyens

complémentaires en nombre important. La mise en œuvre de tels systèmes suppose un haut niveau d'autonomie de chacun des agents et au-delà l'utilisation d'environnements de programmation, de planification et de supervision des missions appropriés à la maîtrise de la complexité des missions à accomplir.

■ Loisirs & culture

Ce marché est notamment caractérisé par le succès des drones aériens grand public. Parrot est une entreprise française qui connaît un succès mondial en commercialisant des drones de loisir à destination du grand public. Il est possible de les contrôler via un *smartphone* ou une tablette et de voir ce que le drone perçoit à l'aide d'une caméra embarquée. Les applications autour de la prise de vue, photographique ou vidéo, à la fois dans le cadre domestique et professionnel (télévision, tournage vidéo/film, documentaires) à des fins commerciales sont aujourd'hui fortement répandues et matures.

■ Industrie

La robotique industrielle de manipulation tend également à être de plus en plus autonome, notamment pour la réalisation de tâches pénibles répétitives et de bas niveau. Elle nécessite l'intégration de capteurs et de la capacité de raisonnement pour l'adaptation à la variabilité des tâches.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La robotique autonome, au même titre que la cobotique, est au cœur du développement de l'Industrie 4.0, sujet majeur de l'évolution à court et moyen terme de l'industrie française en général et de l'industrie des transports et de la mécanique en particulier, et axe transversal de la politique de la Nouvelle France Industrielle. Elle est la clé de gains de compétitivité permettant éventuellement le renouveau de l'industrie et limitant les délocalisations.

L'introduction de la robotique autonome dans les produits et services est un facteur de développement commercial : robotisation de la conduite ou des déplacements, drones pour l'observation environnementale, robotisation des systèmes d'assistance (conjointement avec la cobotique) aux personnes, etc.

Doter les systèmes d'intelligence, de haute capacité de perception et d'interaction s'avère essentiel. Cette intelligence permettra, dans le cadre professionnel, d'assister et de remplacer l'homme dans des missions pénibles ou dangereuses pour, *in fine*, replacer l'homme au cœur d'une expertise métier, et de faciliter son quotidien dans le cadre domestique.

La France tient une position avancée dans la maîtrise technologique de ces compétences clés

■ Une recherche nationale de très haut niveau ;

■ Une position de leader technologique sur les drones civils.

Enfin, la robotique autonome doit également contribuer à relever un certain nombre de grands défis sociétaux : mobilité, aide aux personnes dépendantes, sécurité, protection de l'environnement…

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent la robotique autonome sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs

Les technologies influencées par la robotique autonome sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
9	Fabrication additive
10	Cobotique et humain augmenté

Les technologies clés qui influencent la robotique autonome sont :	
9	Fabrication additive
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
13	Communication Sécurisée
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
34	Authentification forte
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les technologies influencées par la robotique autonome sont :	
11	Intelligence artificielle
13	Communication Sécurisée
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
35	Gestion intelligente de l'eau
36	Technologies de diagnostic rapide (eau, air et sol)
45	Technologies pour la propulsion
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les marchés

Le marché des robots autonomes est assez délicat à aborder du fait de sa forte segmentation et de son hétérogénéité. En effet, il faut savoir différencier le marché des robots et des technologies/compétences qui rendent ces robots/systèmes autonomes.

■ Robotique de service

De 2008 à 2014, le taux de croissance annuel moyen de la robotique de service a été de 29,4 % et pourrait tripler d'ici à 2020[1].

Le chiffre d'affaires des entreprises françaises spécialisées dans la robotique de service (*)

Unité : indice de valeur base 100 en 2008

(*) Y compris drones aériens et entreprises de distribution spécialisées dans la robotique, hors *technoproviders*

Traitement, estimation et prévision **Xerfi** / Source : **Xerfi** d'après Greffes des Tribunaux de Commerce

Au niveau mondial, le parc de robots de services est estimé à 18 millions d'unités à horizon 2020 et atteindrait 20 Md$[3], soit un taux de croissance annuel moyen de 21 % à partir de 2014. Les projections à moyen terme sur les différents segments sont aujourd'hui peu fiables, notamment quant aux échéances de développement des marchés. Les paragraphes qui suivent donnent cependant quelques éclairages.

■ Robotique de service professionnelle

Les ventes mondiales de robots professionnels se sont élevées à 21 000 unités en 2013 (+4 % par rapport à 2012) et représentent 3,6 Md$. Les ventes se sont fortement dynamisées ces dernières années : 63 500 unités ont été vendues entre 1995 et 2007 et plus de

2 – Xerfi « La robotique en France », Mars 2015.

3 – Analyse Grand View Research « Global Service Robotics Market by Application", 2014.

100 000 entre 2008 et 2013. 45 % de ces ventes sont pour des applications militaires et de défense dont 8 500 drones volants téléopérés (-12 % par rapport à 2012), 700 robots/drones terrestres (+80 % par rapport à 2012). 300 autres robots ont été vendus pour la surveillance aérienne, robots démineurs et robots de sauvetage. La valeur globale des ventes mondiale des robots militaires est de 800 M$.

Les **robots agricoles** quant à eux montrent un fort potentiel marché. 5 100 robots de traite ont été vendus en 2013 (+6 % par rapport à 2013) et 760 robots pour la gestion de parcelle et de bétail (+46 % par rapport à 2013). Ils représentent au total 28 % des ventes unitaires de robots de service et leur valeur totale s'élève à 883 M$.

Les ventes de **robots médicaux** ont quant à elle chuté de 2 % et atteignent 1 300 unités dont 1 000 robots d'assistance au chirurgien. La valeur de vente a cependant augmenté et atteint en 1,45 Md$ en 2013. Les 300 robots restants sont essentiellement des petites tables médicalisées mobiles et autonomes.

Enfin, les ventes de **robots logistiques** ont fortement augmenté de 37 % en 2013 et atteignent 1 900 unités, 1 300 unités pour la logistique industrielle et 450 à 600 unités pour la logistique (+32 %). Cette tendance se confirme et fait de la logistique un des marchés les plus porteurs à terme pour la robotique. Le BTP est un secteur dans lequel les applications émergent, avec des ventes recensées qui ont dépassé les 600 unités en 2013 ;

Le nettoyage, l'inspection et la sécurité sont ensuite les segments porteurs de la robotique de service.

■ Robotique de service personnelle

Près de 4 millions de robots personnels se sont vendus en 2013, en hausse de 28 % par rapport à 2012 et élève la valeur des ventes à 1,7 Mds $. Les deux grandes familles d'usages prédominantes sont les **robots domestiques**, allant des robots ménagers : aspirateur, nettoyage, tondeuse à gazon, au **divertissement** et au **multimédia**. Le marché des robots domestiques **d'assistance à la personne** est en pleine effervescence avec une hausse de 345 % en 2013, soit 700 unités vendues.

■ Drones

En France, le marché des drones civils, qui représente près de 3 000 emplois, regroupe 1 300 PME et ETI, dont 45 fabricants et plus de 1 200 opérateurs, et a généré en 2013 un chiffre d'affaires évalué entre 50 et 100 M€[4] dont 90 % est constitué de prestations de prise de vue aérienne. Le marché mondial, selon le cabinet américain Teal Group, est évalué à 6,4 milliards d'euros, également fortement basé sur la prise de vue. Il devrait passer à 12 milliards de dollars d'ici à 2025.

Les défis technologiques à relever

Le concept d'autonomie de déplacement implique la capacité de déployer des systèmes robotiques dans des environnements naturels en s'appuyant sur des moyens de planification de missions fondés sur des connaissances a priori ou acquises. Ces moyens enchaînent dynamiquement, à partir d'un système de supervision, les commandes dites «orientées tâche» pour permettre l'adaptation du comportement aux variations de l'environnement en s'appuyant sur des informations extraites de capteurs.

Il faut pour cela disposer d'environnements logiciels pour la génération de plans et la supervision de leur exécution. Ces environnements autorisent notamment la planification de trajectoires optimales sur la base de divers critères et vis-à-vis des caractéristiques des systèmes.

Ces plans d'action peuvent ensuite être réalisés par des commandes orientées par les tâches, conditionnées par des contraintes intrinsèques au système, et par celles de l'environnement. Ces commandes présentent des formes génériques exploitant différentes techniques de commande comme la commande référencée capteur, voire multi-capteurs, sous des formes adaptatives et prédictives pour tenir compte des contraintes.

Ainsi, un système robotique intègre un ensemble de capteurs dont les données capturées sont traitées à bord par des calculateurs embarqués pour élaborer une représentation de son état, de l'environnement, ainsi que pour la mise en œuvre d'algorithmes de commande référencée capteur, ou pour évaluer l'avancement dans la tâche et déterminer les actions à réaliser pour progresser dans la mission.

4 – Colloque International « Présent et futur des drones civils », Novembre 2014 DGAC.

Les aspects d'autonomie décisionnelle sont d'une importance majeure pour le déploiement de ces systèmes dans des missions complexes. Les interactions naturelles avec ces systèmes et d'une manière générale la coopération de l'homme et de la machine sont également des dimensions essentielles, quoique moins prégnantes que pour celles de la cobotique. Certaines sources parlent – abusivement en 2015 – de « capacités de raisonnement » des robots. Ce verrou est en lien fort avec la technologie clé Intelligence artificielle. Le récent challenge DARPA est un exemple qui situe les limites actuelles dans l'autonomie des robots

L'actuation soulève également deux défis techniques que sont la préhension d'une part (capacité à manipuler des objets variés), l'autonomie énergétique d'autre part.

La question de l'interopérabilité constitue également un défi à mi-chemin de la technique, du normatif et du déploiement commercial. La question du système d'exploitation robotique, adapté au champ d'application, est clé pour le déploiement massif des dispositifs.

Enfin, la question générale de l'intégration des robots est centrale dans le développement de ces marchés. Alors que de nombreuses applications émergent et laissent place à l'automatisation, il faudra être capable de déployer ces systèmes dans différents types d'environnement tout en ayant la garantie du bon fonctionnement du système (sûreté et sécurité) : intégration dans un environnement froid (agroalimentaire par exemple), à fort rayonnement, etc.

En définitive, la clé de la réussite d'un point de vue technologique réside dans l'expertise et la maîtrise des **compétences métiers** du secteur d'application, et dans une parfaite interopérabilité du robot avec les éléments de son environnement (dont le système d'information). L'acquisition des données à l'aide de **capteurs (thermiques, caméras, optiques, etc.) actifs ou passifs** et leur modélisation/exploitation grâce à une combinaison **d'algorithmes apprenants et d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, *Deep Learning*)** conduira le robot à mener un panel d'**actions** qu'il aura lui-même décidé et à corriger son action en cas d'aléa. Les technologies embarquées à développer sont alors : algorithmes de planification, modélisation 3D de l'environnement, localisation par fusion des mesures de capteurs actifs ou passifs, détection, reconnaissance ou encore tracking de cibles.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le secteur est aujourd'hui en pleine expansion. Au cœur de ce dynamisme figurent les GAFA (Google, Apple, Facebook et Amazon). Ces quatre géants du high-tech (au sens large du terme) sont depuis les années 2010 très actifs dans l'acquisition de startups et PME spécialisées dans ou plusieurs compétences clés de la robotique. L'acquisition en 2012 de Kiva Systems – fabricant de robots logistiques totalement autonomes – par Amazon pour 775 M$ ou encore Google qui, fin 2013, rachète en l'espace d'une semaine 8 sociétés de robotique (Boston Dynamics (Alphabet), Schaft Inc., Industrial Perception, Redwood Robotics, Meka Robotics, Holomni, Bot & Dolly, Autofuss et Deep Mind Technologies) en sont les exemples les plus significatifs.

L'arrivée de solutions intelligentes pousse à changer les habitudes et à revoir complètement, voire recréer, de nouveaux modèles économiques, ce qui s'avère être une tâche à la fois complexe et hétérogène suivant les secteurs et les technologies. Un défi commercial ou économique majeur aujourd'hui pour que l'industrie française tire vraiment parti de la robotique est de débloquer sa capacité à investir dans la robotique en sécurisant son investissement par un avis d'expert sur les retombées de la robotisation et un accompagnement dans la gestion sociale du changement.

Le secteur automobile s'appuie pour sa part sur l'intégration des ADAS dans les véhicules.

En revanche, les modèles économiques du secteur de la santé sont plus complexes à aborder de par les nombreux mécanismes et canaux de prises en charge d'une partie ou de la totalité d'un traitement ou d'un dispositif, particulièrement lorsque ces derniers ont un coût élevé. Cela génère des incertitudes sur les modèles économiques à mettre en place.

Les enjeux réglementaires

Le premier enjeu est juridique pour le déploiement de la robotique autonome. Il concerne la sécurité des personnes, ce qui conduit aujourd'hui des robots industriels haute cadence à opérer dans des cages de sécurité. Cette sécurité physique n'est plus possible dès lors que le robot évolue dans un environnement ouvert : c'est le cas pour des robots de logistique ou des véhicules autonomes. Se posent alors deux questions pour répondre à ces enjeux :

■ Comment qualifier le niveau de sécurité, dans le cadre normatif, pour l'évolution de ces robots ? Des normes existent ou sont en cours d'élaboration : ISO 10-218 pour les robots industriels, ISO 13482 pour les robots d'assistance personnelle, IEC/NP 80601 pour les robots médicaux… ;

■ Comment gérer les questions de responsabilité, d'un point de vue légal et assurantiel ?

Dans un autre cadre, la France a été pionnière dans la mise en place d'une règlementation avancée pour l'opération de drones civils. 4 scenarii d'usage ont été définis dans l'arrêté du 12 avril 2012, dont les évolutions s'appuieront sur les remontées d'information des fabricants et opérateurs de drones à la DGAC.

Le « Sense and Avoid » (Voir et Éviter) quant à lui constitue également un enjeu règlementaire. À terme, la règlementation exigera de tous les systèmes robotiques aériens d'être dotés d'un système *Sense and Avoid* certifié pour pouvoir évoluer.

L'Europe, avec le groupe de travail du Parlement Européen sur la législation sur la robotique, et la France, avec le groupe de travail juridique du Comité Robotique (qui devra se coordonner avec les travaux européens), s'attaquent à ces questions pour faciliter le développement des marchés.

Analyse AFOM

ATOUTS

Recherche forte sur les compétences clés de la robotique, notamment dans le numérique

Dispositifs de soutien aux startups

FAIBLESSES

Acceptation de la société pour la robotisation de l'industrie

Faible tissu industriel en robotique de production, socle historique du développement du secteur

Marché national insuffisant pour porter le développement d'une offre commerciale

OPPORTUNITÉS

Règlementation favorise le développement de la filière, notamment pour les drones (existant)

Mouvement vers l'Industrie 4.0 et les besoins qui y sont liés, soutenu par le programme Industrie du futur de la Nouvelle France Industrielle

MENACES

Forces de la concurrence asiatique

Secteur en pleine révolution

Importance des investissements aux États-Unis sur la robotique

Facteurs clés de succès et recommandations

■ Structuration et soutien de la filière

La robotique n'est pas une technologie en tant que telle. Il s'agit d'une combinaison de plusieurs technologies/compétences clés au secteur. En France, la filière est au meilleur niveau mondial au niveau de la recherche académique et dispose de PME technologiques très innovantes, mais souffre d'un retard en robotique industrielle face à d'autres pays comme l'Allemagne, les États-Unis ou encore le Japon et la Chine, et **nécessite donc d'être soutenue au niveau national.** Les efforts de promotion de la robotisation de la production se heurtent encore au problème général de la faiblesse des investissements industriels, notamment dans les PME, et à une certaine réticence des organisations de salariés.

Néanmoins, le plan Robotique de la Nouvelle France Industrielle, inclus désormais dans l'Industrie du futur et la Solution Objets Intelligents, devrait permettre un développement important de la filière grâce notamment aux mesures de financement des entreprises (Fonds Robolution Capital, PIA …), de soutien à la R&D (PIA, FUI, Eureka, ANR, Rapid..), d'aide à la robotisation (StartPME, prêts, mesures fiscales…), de développement et de stimulation de l'innovation par les concours, les plateformes et les challenges, etc.[5]

■ Formation

Il n'existe à ce jour que très peu de formations qui ouvrent la voie à un diplôme de robotique, bien que l'Onisep recense 38 formations en lien avec la robotique et ses disciplines : automatique, mécatronique, systèmes numériques et intelligents, intelligence artificielle, seulement 8 de ces formations sont fléchées robotique.

Inclure la (spécialité) robotique dans le cursus de formation initiale et de spécialité à différents niveaux universitaires et dans les écoles de manière à intégrer les aspects transdisciplinaires du secteur permettra de renforcer la visibilité de notre formation et de notre expertise au niveau international. Cette tendance est déjà très largement amorcée, même si elle n'est pas toujours identifiée comme telle.

Il est également essentiel d'encourager le **développement de ressources pédagogiques en robotique pour la formation continue**, à l'image de l'Université Numérique Ingénierie et Technologique, qui a développé une thématique robotique dans ses approches pédagogiques et présentations.

La robotique pourrait également **être introduite encore plus en amont dans le cursus scolaire, par exemple au niveau collège** dans les cours de technologie sous forme de kit d'introduction. Au niveau lycée, des **plateformes mutualisées pour les travaux pratiques** existent déjà et leur développement devrait être fortement encouragé.

Acteurs clés

Entreprises	Akeo+, Aldebaran Robotics, Awabot, Be Spoon, Bluefrog Robotics, Cybernetix, E.ZICOM, EOS Innovation, Infotron, Medtech, Parrot, Partnering Robotics, Percipio Robotics, RedBird, Siléane, Stanley Robotics, Sunbirds, Xamen…
IRT, ITE, IHU	IRT Jules Verne, IRT Saint-Exupéry, SystemX…
Instituts Carnot	CEA LETI, CEA LIST, INRIA, IRSTEA, I@L, LAAS CNRS, M.I.N.E.S., ONERA, TSN…
Autres centres de recherches	BioMécanique et BioIngénierie (BMBI) – UTC, CRISTAL, CAOR/Mines ParisTech, IRCCyN, ISIR, Laboratoire HEUDIASYSC – UTC, LIRMM…
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, CapDigital, EMC2, Imaginove, IDforCAR, I-Trans, LUTB, Minalogic, Mov'eo, Novalog, Picom, Systematic, Véhicule du futur…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Aetos, CITC EuraRFID, Coboteam, FPDC, GdR Robotique, Robotics Place, SYMOP, SYROBO…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

5 – http://proxy-pubminefi.diffusion.finances.gouv.fr/pub/document/18/17721.pdf#page=7

13 Communications sécurisées

LOISIRS & CULTURE
Énergie, Mobilité, NUMÉRIQUE
Environnement, HABITAT, Santé et bien-être, SÉCURITÉ
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

communications radio privées, Private Mobile Radio, PMR, LTE, GSM, 3G, 4G, 5G, 3GPP, résilience, régalien, réseaux dédiés, réseaux virtuels, MVNO, cyberprotection

Définition et périmètre

Les systèmes de « communications sécurisées » permettent la réalisation d'un échange de type voix ou données (selon les cas), garantissant un certain niveau de protection vis-à-vis des menaces prises en compte. Parmi ceux-ci, on trouve les solutions de radiocommunications sécurisées communément regroupées sous l'acronyme PMR (Professional Mobile Radio – on emploie parfois aussi Private Mobile Radio).

Nota : La sécurité des communications des systèmes embarqués, et la sécurité des objets connectés sont respectivement abordées dans les technologies clés « Systèmes embarqués et distribués sécurisés et sûrs » et « Internet des objets ».

Mis en œuvre pour répondre à des besoins professionnels, avec une grande diversité d'utilisateurs, les réseaux PMR correspondent historiquement à des réseaux indépendants fonctionnant sur des bandes de fréquences spécifiques, souvent distincts des réseaux de téléphonie mobiles classiques ouverts au public ; une tendance d'avenir est de mutualiser les infrastructures sans pour autant transiger sur les spécifications des PMR. Leur couverture est le plus souvent locale ou régionale ; les communications point à multipoint sont une de leurs caractéristiques clés (les réseaux de téléphonie mobile pour le grand public sont point à point).

Les réseaux de PMR comportent par ailleurs un certain nombre de spécificités qui les distinguent des réseaux de communication classiques : disponibilité, permanence du service, confidentialité renforcée, chiffrement, préemption d'appel, établissement de la connexion instantanée (Push to talk), appel de groupe, mode direct, etc.

On distingue deux grands types d'usages, pour lesquels la disponibilité du réseau et la confidentialité des échanges sont bien souvent des exigences critiques :

- les usages régaliens et gouvernementaux. Les communications sécurisées permettent aux services publics (police, gendarmerie, pompiers, sécurité civile, etc.) de maintenir un niveau élevé et durable de sécurité et de protection publique, notamment dans le cadre d'évènements rassemblant de nombreuses personnes (rencontres sportives, commémorations, manifestations, etc.) ou lors d'opérations de secours (suite à des catastrophes naturelles ou industrielles, des accidents, des attentats, etc.) ;
- les usages professionnels. De nombreux secteurs d'activités sont concernés, tels que les transports (transports routiers, sociétés de bus, de taxis, services aéroportuaires, sociétés d'autoroutes, ambulanciers…), la sécurité et le gardiennage, le bâtiment et les travaux publics, l'énergie, l'industrie, les infrastructures.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

- Enjeu de souveraineté nationale

À date, les acteurs français maîtrisent la totalité de la chaîne de valeur des PMR, hormis quelques composants élémentaires (semi-conducteurs, capteurs, etc.), notamment grâce à Airbus Group, Thales ou encore Alcatel-Lucent ; il est important que cette maîtrise perdure et se renforce. La solution « Confiance Numérique » de la Nouvelle France Industrielle constitue également un cadre structurant qui permet aux acteurs français de conforter leur excellence et maîtrise technologique.

- Dimension économique importante

Avec un taux de croissance élevé (marché qui doublera en moins de 10 ans), maîtriser les solutions de communications sécurisées de demain permettra aux acteurs français de renforcer leur position face aux grands américains (Motorola) et acteurs asiatiques conquérants (comme Huawei).

Liens avec d'autres technologies clés

- Les technologies clés qui influencent les communications sécurisées sont :

6	Infrastructures de 5ème génération
34	Authentification forte

- Les technologies influencées par les communications sécurisées sont :

3	Valorisation et intelligence des données massives
7	Systèmes embarqués distribués, sécurisés et sûrs

Les marchés

IMS Resarch évalue le marché mondial à 8 Md$ et estime qu'il doublera à horizon 2023 pour atteindre 15 Md.

Le marché des PMR numériques est aujourd'hui dominé par 3 technologies : TETRAPOL, standard international d'origine française, conçu par Matra et dont Airbus est le fournisseur principal, TETRA, norme soutenue au niveau européen par l'ETSI et P25 (radio portable de combat) son équivalent américain utilisé par Motorola (et tous les acteurs majeurs proposant des solutions au trois standards).

En France le marché des PMR est composé d'environ 55 entreprises et représentait 1 800 emplois en 2014. Le marché est, et sera, fortement tiré par les usages régaliens au niveau national mais également par les grands industriels au travers de leurs activités au niveau national et à l'export. Il est également important de souligner qu'il s'agit d'un marché de renouvellement et de modernisation des infrastructures qui ont été déployées dans les années 1990.

Le secteur évolue vers un « réseau unique » (mutualisation des infrastructures) pour les applications privées et professionnelles, où les infrastructures LTE constitueront le cœur du réseau. Ce réseau unique comprendra toutes les architectures réseaux qui devront coexister et être disponibles selon les besoins : réseaux publics, privés, ad-hoc, bulles tactiques, etc.

Les défis technologiques à relever

Le marché, en renouvellement, laisse place à une forte mutation technologique : les PMR de demain ne seront plus uniquement sur des réseaux spécifiques mais partageront les réseaux LTE auxquels ils devront s'adapter. Dans une ère où les *smartphones* sont aujourd'hui démocratisés au sein du grand public mais également dans la sphère professionnelle et régalienne, il y a un réel enjeu de sécurisation et d'adaptation des échanges privés et critiques sur les réseaux publics.

■ Développer les réseaux LTE

Les PMR de demain n'emprunteront plus uniquement des réseaux privés mais partageront les réseaux LTE (4G, puis 5G) publics très haut débit. Adapter les réseaux LTE aux PMR devient une nécessité pour répondre aux attentes des usagers des PMR : ils offrent un meilleur débit et permettront aux PMR de s'ouvrir dans de nombreux domaines, notamment industriels (en lien avec l'arrivée de l'internet des objets plus sécurisés).

■ Des réseaux LTE adaptées aux PMR sûrs, résilients et durcis

Outre le développement des infrastructures, il est essentiel d'aligner les caractéristiques des réseaux LTE et les normes et spécifications des PMR, notamment :

Services spécifiques : conversation groupée, messagerie instantanée (*Short Message Service,* SMS), transmission de données instantanées (*Short Data Service*, SDS), gestion des priorités (préemption, un *lead* qui est prioritaire dans une conversation groupée) et communications entre groupes de terminaux.

Systèmes résilients : même en mode dégradé, les systèmes continueront à fonctionner, notamment pour des opérations de maintien de l'ordre, de secours ou militaires.

Systèmes sécurisés : chiffrement, « surchiffrement », cryptographie et cyberprotection.

Développée par Thales en 2013, Nexium Wireless est une première solution vers les nouvelles solutions LTE adaptées aux PMR pour les applications liées à la sécurité civile ou militaire.

■ Améliorer l'ergonomie des PMR

Les PMR sont aujourd'hui basiques (petit écran, uniquement communication directe, pas d'autres fonctionnalités), une approche peut être de développer un terminal PMR de type Smartphone, qui utilise une bande passante LTE : l'ajout de fonctionnalités multimédia améliorera l'ergonomie et l'expérience utilisateur (mais en conservant la sécurité et la résilience). Nexium, de Thales, intègre TeSquad, un nouveau « *smartphone* durci » sous Android.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

■ **Maintenir des prix compétitifs.**

Bien qu'il soit pressenti à 15 Md$ d'ici à 2023, le marché des PMR reste un segment d'ultraniche en comparaison avec le marché global des *smartphones* publics, estimé à 870 Md$ (selon IDC).

Les commandes de PMR seront bien plus mesurées et le risque d'augmentation du prix unitaire d'un système est alors élevé. En adaptant les PMR aux réseaux LTE et au design de smartphones, il est essentiel que les prix restent comparables à ceux des smartphones, compte tenu de leurs spécificités augmentées.

Les enjeux réglementaires

■ **Normalisation 3GPP : adapter les PMR aux usages publics et les bandes de fréquences LTE**

Actuellement en cours de réflexion au niveau des instances européennes, il y a un fort enjeu de normalisation autour des standards techniques et des bandes de fréquences utilisables par les PMR pour les réseaux dits de services de protection publique et de secours en cas de catastrophe (*Public Protection on Disaster Relief*, PPDR). Cette normalisation doit se faire notamment au niveau de la coopération 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) entre organismes de standardisation des télécommunications mondiales.

Analyse AFOM

ATOUTS

Base installée forte dans le monde

Maîtrise de toute la chaîne (infra, terminaux, réseaux dédiés, S-MVNO)

Laboratoires académiques et enseignement supérieur

Présence dans les instances de normalisation

Comité de filière des industries de sécurité (CoFIS) mobilisé sur ces sujets

FAIBLESSES

Dispersion des grands acteurs

Investissement sur LTE 4G insuffisants

OPPORTUNITÉS

Marché national structuré

Le marché international va se renouveler

Opérateurs nationaux forts

Secteur des utilities exportateur qui peut porter l'offre

MENACES

Concurrence directe avec Motorola

Nouveaux entrants asiatiques très agressifs

Consolidation du secteur en cours

Besoins forts d'investir dans la LTE

Facteurs clés de succès et recommandations

■ Maintenir les efforts de R&D sur la thématique

Notre position de leader nous permet de répondre à de forts enjeux de souveraineté dans les télécommunications à l'exemple des projets de démonstrateurs lancés dans le cadre du plan « Souveraineté Télécoms » : travaux de recherche sur la 5G (consortium projets européens 5GPP), démonstrateur d'un réseau 4G permettant d'offrir un réseau haut-débit et sécurisé, dédiés aux services de secours et aux opérateurs d'importance vitales (respectivement Airbus Group et Thales) labellisé par le CoFIS.

■ Dynamisme dans les groupes de normalisation

Il est essentiel que les acteurs français participent aux groupes de normalisation et d'évolution des règlementations, particulièrement en ce qui concerne l'allocation de bandes de fréquences publiques. Un groupe de réflexion piloté par l'ANSSI et dans le cadre du plan « Souveraineté Télécoms » a été lancé mi-2014, qui consiste à émettre des recommandations concernant l'évolution de la règlementation sur la sécurité des réseaux.

■ Favoriser le rôle des startups innovantes pour redynamiser l'écosystème français

Il est important de permettre aux startups et PME, qui ont des moyens de R&D limités malgré un fort savoir technique, d'avoir accès à tous les outils, plateformes, accompagnement nécessaires à leur développement technologique et commercial en France et à leur expansion à l'international. L'exploitation par ces entreprises des moyens de R&D externalisés et collaboratifs serait un levier considérable vers la souveraineté de la France dans les communications numériques et sécurisées : projet européens collaboratifs, SATT, subventions, etc.

À ce titre, une action du plan « Souveraineté Télécoms » pilotée par EBLink est de redynamiser le développement économique des startups et PME en renforçant leur participation afin de recréer un écosystème en France.

Acteurs clés

Entreprises	Airbus Defence and space - Centre d'Excellence Electronique, Airlynx, Alcatel-Lucent, Eolane, Etelm, Expway, Hub One, Ibelem, Logic Instrument, Luceor, Orange, Prescom, Sequans Communication, Sentryo, Sigfox, Sysoco,Thales Communications & Security, Wiko…
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX…
Instituts Carnot	INRIA, M.I.N.E.S., TSN…
Autres centres de recherches	ESIEE, Mines Telecoms…
Pôles de compétitivité	CapDigital, Images et Réseaux, SCS, Systematic, TES…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Lora…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

14 Technologies immersives

LOISIRS & CULTURE
Énergie, **MOBILITÉ**, NUMÉRIQUE
Environnement, **HABITAT**, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

RV, RA, réalité mixte, haptique, son 3D immersif, perceptual computing, Interfaces Homme-Machine, analyse comportementale, 3D, 360, Brain Computer Interface, interopérabilité.

© fotolia

Définition et périmètre

Les technologies immersives consistent à plonger l'utilisateur dans un environnement avec lequel il est capable d'interagir en utilisant ses capacités sensorielles et sensomotrices. Ces technologies regroupent la réalité augmentée (RA), la réalité virtuelle (RV), la réalité mixte, le son 3D immersif ainsi que les technologies d'interfaces homme-machine (IHM). Ces technologies sont particulièrement diffusantes et peuvent servir des objectifs très variés allant du jeu à la formation en passant par l'aide à la conception de prototypes ou encore l'assistance/le guidage via l'apport d'informations.

La RA consiste à superposer des informations virtuelles, en 2D ou en 3D, en temps réel à notre perception du réel afin de créer une « nouvelle réalité ». Si la RA peut relever de l'ouïe et du toucher (interfaces haptiques) la plupart des interfaces développées sont visuelles. Les terminaux utilisés sont : les *smartphones*, les tablettes, les projecteurs, les lunettes, et plus rarement d'autres dispositifs comme les télescopes.

La RV permet d'immerger totalement l'utilisateur dans un univers virtuel, interactif, simulé et calculé en temps réel. La RV est réalisée à l'aide d'images de synthèse d'un environnement virtuel en 3D diffusées par le biais de lunettes, de casques de RV, de caves virtuelles ou visiocubes - *cave automatic virtual environnement* (CAVE) - ou de grands écrans cylindriques.

Moins connue que la RA et la RV, la réalité mixte consiste en une hybridation entre le réel et le virtuel, qui passe par l'intégration dans le monde réel d'objets virtuels persistants avec lesquels l'utilisateur peut interagir. Cette technologie est par exemple utilisée par le système holographique du casque Hololens de Microsoft.

L'interaction est un enjeu central pour les technologies immersives, elle est rendue possible par l'utilisation d'IHM. Les IHM sont des outils qui permettent à l'utilisateur de contrôler, visualiser et communiquer avec un système. Les IHM des technologies immersives peuvent par exemple comprendre des capteurs de localisation (inclinomètre, gyroscope, accéléromètre, etc.), des capteurs de mouvement (marqueurs passifs réfléchissants utilisés avec une caméra infrarouge, caméra RGBD, gant de données, dispositif de capture de l'activité musculaire, etc.) et des interfaces dites haptiques (simulation du retour d' effort). La question de l'ergonomie est intimement liée à celle des IHM.

Le son 3D immersif vise à apporter une nouvelle expérience utilisateur et propose plusieurs approches. « L'écoute binaurale » est une technologie de son immersive qui permet à l'auditeur de localiser chaque élément sonore dans l'espace à trois dimensions uniquement grâce à une paire d'oreillettes, un casque audio ou des hauts-parleurs. Cette technique de restitution s'appuie sur la différence de perception du son par les deux oreilles liée à des phénomènes de décalage temporel entre des variations d'intensité et des variations spectrales et renforce l'immersion du spectateur dans la scène virtuelle. Par ailleurs les nouveaux formats Dolby Atmos, Auro 3D et DTS:X, permettent de proposer une représentation de contenus audio spatialisés. Ces nouveaux formats intègrent des outils de mixage spécifiques afin de proposer une composition sonore de ces contenus rendant possible un rendu de qualité via divers systèmes de restitution multicanaux (5.1, 7.1, 22.2,...), afin de renforcer le réalisme et donner l'impression au spectateur d'être au plus près du film.

■ Habitat et urbanisme

Les technologies immersives ont notamment donné naissance à des applications commerciales dans le secteur de l'habitat et de l'immobilier comme la simulation de décoration d'intérieur ou les visites virtuelles de logements et de bâtiments. Elles sont également mobilisées dans le cadre de projets d'urbanisme. La ville de Lyon a ainsi développé une application de RA permettant aux habitants de visualiser le réaménagement du quartier de la Confluence.

La RA est de plus en plus utilisée dans la conception, la maintenance et la gestion technique des bâtiments.

Le maquettage numérique de bâtiment – building information modeling (BIM) – est en plein développement. Combiné aux technologies de RA et de RV, il permet une meilleure modélisation, vision et compréhension d'un ouvrage à réaliser. Le français Bouygues Construction utilise depuis plusieurs années le BIM et les technologies immersives dans ses projets non seulement pour la conception mais aussi pour l'exploitation et la maintenance. Ces outils permettent en effet de prévoir et d'optimiser les opérations tout en centralisant l'historique des travaux effectués.

■ Santé et bien-être

Les technologies immersives sont étroitement liées aux technologies « Cobotique et Humain Augmenté » et

trouvent de nombreuses applications dans le secteur médical aussi bien du côté des patients que des professionnels. Les lunettes de RA permettent par exemple d'assister les personnes malvoyantes en projetant les informations sur les zones de l'œil les moins détériorées ou encore en modifiant les contrastes. La RA est également un vecteur d'assistance au chirurgien. En phase préopératoire elle sert d'appui au diagnostic et à la planification opératoire grâce à la modélisation en 3D du patient. En phase peropératoire elle guide les gestes du chirurgien grâce à l'affichage d'informations directement sur la zone traitée. La RV est quant à elle surtout mobilisée pour la formation aux gestes chirurgicaux.

■ Énergie

La RA est de plus en plus mobilisée pour l'assistance opérationnelle, la maintenance et la formation des opérateurs. Étroitement liée aux technologies clés « Technologies pour l'énergie nucléaire » et « Modélisation, simulation et ingénierie numérique », l'utilisation des technologies immersives pour les interventions sur sites critiques se développe. Le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) a par exemple mis en place en collaboration avec Oreka Solutions une salle immersive dans le but de préparer les chantiers de démantèlement nucléaire et de simuler des opérations en sensibilisant les opérateurs aux différents risques.

■ Mobilité

Les applications de navigation utilisant la RA se multiplient et laissent à penser que cette technologie sera intimement liée au développement des GPS dans le futur. Les MINI Augmented Vision, prototype de lunettes de RA développé par BMW, illustrent bien cette tendance. Ces lunettes affichent les informations de conduite (vitesse, direction à suivre, limitations, niveau de carburant, etc.) dans le champ de vision du conducteur. Elles exploitent également des caméras placées sur la voiture afin d'afficher ce qui se trouve dans les angles morts.

■ Industrie-Usine du futur

On voit apparaître de plus en plus d'applications mobilisant les technologies immersives dédiées à la conception, la modélisation, le prototypage, la simulation des conditions de production, l'assistance, ou encore la maintenance en milieu industriel. Les industries automobile, aéronautique et spatiale sont des précurseurs dans l'utilisation de ces technologies.

PSA Peugeot Citroën a créé un centre de réalité virtuelle à Vélizy-Villacoublay comprenant notamment un visiocube (CAVE), un écran stéréoscopique et une table de réalité virtuelle (workbench) pour optimiser la visualisation de ses modèles. Le groupe Renault a également équipé son centre de Guyancourt d'un visiocube.

Le groupe Dassault Aviation intègre à ses chaînes d'assemblage une solution de RA projective développée par la société Diotasoft permettant de guider les gestes des opérateurs. Les sociétés Airbus et Accenture vont également implémenter des lunettes de RA sur la chaîne d'assemblage de l'Airbus A330 à Toulouse.

■ Communication Numérique

La RA est de plus en plus utilisée dans le domaine du e-commerce et de la publicité. Concernant le e-commerce, elle permet par exemple au consommateur de visualiser en 3D un produit dans son environnement de destination ou encore d'essayer virtuellement un produit comme l'a proposé Atol pour certaines de ses collections de lunettes. La publicité s'empare de la RA pour attirer l'attention des consommateurs comme le montre la campagne Pepsi Max, réalisée en 2013 pour les abribus londoniens. La RA permet également d'enrichir le *print* à l'aide d'animations. Cette technologie a par exemple été utilisée par Volkswagen lors de sa campagne publicitaire pour la New Beetle 2012.

■ Formation

Les technologies immersives deviennent progressivement des outils de formation dans les milieux scolaires et professionnels. La RV permet notamment de visualiser des systèmes complexes ou encore de se former par des mises en situation sous forme de *serious games*. La plate-forme Virtualiteach développée dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir vise ainsi à intégrer la RA et la RV dans les enseignements

de la filière technologique et professionnelle. Les applications proposées sont très variées : simulation d'une opération sur un chantier, expérience des forces de frottement grâce à un bras avec retour d'effort, étude de l'acoustique d'une salle, etc.

■ Loisirs & Culture

Les jeux vidéo constituent un champ d'application privilégié pour les technologies immersives et plus particulièrement pour les casques de RV. Couplés à un casque audio permettant de diffuser un son 3D binaural, ces derniers promettent d'immerger totalement l'utilisateur dans l'univers de jeu. De nombreux acteurs se sont engagés sur ce marché : Oculus, Valve, Samsung, Google, Archos ou encore Starbreeze.

Les parcs d'attraction et l'industrie cinématographique exploitent également les technologies immersives pour proposer des univers 360°, plongeant le spectateur au cœur de l'action. La RV promet l'émergence d'un nouveau médium, à mi-chemin entre le cinéma et le jeu vidéo. Industrial Light & Magic (faisant partie de Lucasfilm Ltd.) s'engage ainsi dans cette voie en créant des scènes de la saga Star Wars en RV.

Les technologies immersives permettent d'innover dans le secteur des visites culturelles ou encore du tourisme. La RV permet par exemple de proposer des visites virtuelles de monuments disparus. La RA permet la reconstitution des parties détruites ou détériorées des monuments ou des œuvres d'art. Elle permet également d'afficher des informations ou des animations directement sur les œuvres.

La presse papier et l'édition commencent également à s'approprier la RA à travers des applications qui permettent d'enrichir les contenus imprimés. En 2012, le journal Ouest France, en partenariat avec Artefacto, a par exemple proposé à ses lecteurs une expérience de RA leur permettant de voir en 3D les photographies présentes dans les articles.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le marché des technologies immersives reste encore très émergent. Il profite d'un très fort dynamisme ces dernières années et les technologies se démocratisent de plus en plus, particulièrement dans les secteurs du divertissement et du tourisme.

Les technologies immersives représentent aujourd'hui un enjeu majeur comme l'a montré le Consumer Electronics Show (CES) de 2015 où de multiples dispositifs innovants les mettant en œuvre ont été exposés. Si le marché des technologies immersives est encore émergent, il profite d'un très fort dynamisme et d'une démocratisation croissante. En effet, les technologies immersives sont particulièrement diffusantes et elles peuvent trouver des applications dans toutes les sphères de notre quotidien.

Dans notre environnement toujours plus connecté l'accès à l'information contextualisée est un enjeu majeur. La RA répond à cette problématique de différentes manières. Elle permet la recherche et l'affichage en temps réel d'informations pertinentes en s'appuyant notamment sur Internet. Elle permet également la mise en valeur d'éléments importants de l'environnement. La RA constitue donc une aide à la prise de décision de l'individu en temps réel aussi bien dans un contexte personnel que professionnel. Cette technologie répond donc à des enjeux de productivité et de qualité.

La RV, en rendant possible l'immersion de l'utilisateur dans un environnement totalement virtuel, offre des applications inédites. Elle permet par exemple de plonger l'utilisateur dans un contexte psychologique et émotionnel différent, de créer des environnements sur mesure sans se préoccuper des coûts, ou encore d'éliminer les barrières géographiques. Cette technologie a ainsi un fort potentiel industriel pour la modélisation, la conception, les simulations ou encore la formation.

Les IHM répondent au besoin de trouver des moyens d'interaction plus intuitifs, plus ergonomiques, plus adaptés aux capacités perceptives, motrices et cognitives des utilisateurs ou encore plus précis. Dans

l'industrie, les IHM constituent un enjeu de productivité mais aussi de sécurité dans la réalisation des opérations. Dans le cas de la RA et de la RV, les IHM sont un enjeu crucial car en faisant le lien entre le réel et le virtuel, elles sont garantes de la qualité de l'immersion.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les technologies immersives sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
21	Supercalculateurs
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les technologies influencées par les technologies immersives sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
21	Supercalculateurs
38	Systèmes de rénovation du bâti existant
40	Systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les marchés

Le marché des technologies immersives est émergent. Les solutions destinées au grand public restent rares et sont assez expérimentales.

Concernant la RV, la situation promet d'évoluer rapidement, notamment avec la sortie du casque Oculus Rift prévue en 2016. Le premier secteur d'application pour le grand public est le jeu vidéo. Selon le cabinet KZero (Royaume-Uni), 200 000 joueurs utilisent aujourd'hui des accessoires immersifs afin d'améliorer leur expérience de jeu, et ils atteindraient 57 millions en 2018, ce qui porterait le marché à 5,2 Md$. Les autres marchés prometteurs sont les industries créatives, culturelles et de loisirs avec notamment le cinéma, les salles de spectacle 360°, les visites culturelles ou encore les parcs d'attractions.

Le marché mondial de l'économie numérique lié à la RA est estimé à 95 Mds € en 2020 dont 28 Mds € pour les seules technologies numériques. Le nombre d'utilisateurs devrait atteindre 200 millions. Il est cependant difficile de donner des estimations précises dans la mesure où ces technologies sont très diffusantes et sont souvent combinées à d'autres. Les principaux marchés identifiés pour la RA sont : la santé, les industries créatives, culturelles et de loisirs et les marchés des applications professionnelles.

Figure 1 : Répartition du marché mondial de la RA en 2020[1]

Le marché mondial des IHM devrait quant à lui atteindre 5,6 Mds€ en 2019 selon une étude *Transparency Market Research* prenant en compte les technologies résistives, capacitives, infrarouges, de communication champ proche et les technologies tactiles DST (Dispersive Signal Technology) dans leurs applications industrielles. Présentes sur tous les marchés, elles sont au cœur du renouvellement de l'expérience utilisateur.

Les défis technologiques à relever

■ Utilisation de composants à bas coûts

Le coût d'un casque de RV ou de lunettes de RA varie entre 300 et 800€. Un des enjeux de taille pour les fabricants est l'utilisation de composants à bas coût, comme les capteurs (position, tachymétrie, etc.) et les écrans légers pour *smartphone*.

■ Tracking, robustesse de la technologie et reconnaissance

Dans le cas de la RA, la reconnaissance d'image demeure un verrou technologique important. En effet, à l'heure actuelle, l'occultation d'une partie de l'objet, les déformations de ce dernier ou encore le manque de luminosité sont des freins importants. Des améliorations matérielles (caméras RGBD, capteurs, chipsets RA, GPU, etc.) et logicielles (optimisation des algorithmes, augmentation de la fréquence de traitement des trames, etc.) sont nécessaires.

■ Affichage et latence

La qualité des optiques, la taille du champ de vision, l'amélioration de la vision périphérique, la suppression des troubles de perception dus à la parallaxe, la résolution par œil, la fréquence de rafraîchissement ou encore le temps de latence constituent des verrous technologiques importants.

■ Recalage et interaction entre les objets de synthèse et les objets réels

Le recalage reste un problème fondamental de la RA. Les interactions entre les objets de synthèse et les objets de la scène sont difficiles à gérer notamment en cas d'occultation. Il n'existe pas de solution simple pour superposer de manière précise une image au bon endroit dans le champ de vision de l'utilisateur sans utiliser de marqueurs.

■ Interface avec le cerveau – Brain Computer Interface

La question des IHM est centrale dans le cas des technologies immersives. Les interfaces cerveau-ordinateur ou BCI (Brain-Computer Interfaces) visent à permettre à l'utilisateur d'envoyer des informations uniquement grâce à son activité cérébrale. Les projets de casques électroencéphalogrammes (EEG) se multiplient. Les interfaces reposant sur l'implantation d'électrodes dans le cerveau, notamment dans le cas du traitement des personnes tétraplégiques, font l'objet de nombreuses recherches. L'usage de BCI robustes en RV pourrait à terme permettre de fluidifier le contrôle des applications de RV.

■ Interopérabilité des briques technologiques

Les technologies immersives, notamment la RA, peuvent être utilisées à partir de nombreux dispositifs (lunettes, tablettes, *Smartphones*) pour une même application. De nombreux paramètres, propres à chaque dispositif, comme la mémoire ou les systèmes d'exploitation sont alors pris en compte. Afin d'assurer une diffusion d'images de qualité et homogènes entre utilisateurs, il est essentiel de traiter la question de l'interopérabilité « multi-dispositifs » lors de l'intégration finale des technologies pour une seule et même application. Des travaux de normalisation à grande échelle sont souhaitables.

1 – Plan Réalité Augmentée, « Les marchés de la réalité augmentée en 2020 » : <http://frenchaugmentedreality.fr/>

■ Le décalage entre la réalité et la représentation virtuelle, source de cinétose

Les utilisateurs des casques de RV parlent souvent du mal des transports ou de *motion sickness* en anglais. Ce trouble, appelé cinétose, provoque des effets de nausée. Il est lié au décalage entre la réalité et le monde virtuel dans lequel l'utilisateur est immergé. La cinétose est considérablement réduite lorsque la « crédibilité » de l'univers virtuel visuel et sonore et des mouvements de l'utilisateur est élevée. Les progrès concernant le son 3D et les interfaces haptiques permettent d'adresser en partie ce verrou. Cependant les perceptions non-visuelles et auditives (accélération, toucher) constitueront des verrous beaucoup plus importants à lever.

■ L'ergonomie

Le poids des lunettes de RA, leurs verres souvent épais et le risque de chauffe de certains modèles constituent des obstacles ergonomiques. Concernant les casques de RV, le poids est un verrou important dans la mesure où il entraîne rapidement une fatigue musculaire de l'utilisateur. Par ailleurs, dans de nombreux cas d'utilisation, il est nécessaire que le casque soit relié à l'ordinateur qui effectue les calculs par un système de câbles qui handicape les mouvements de l'utilisateur.

■ Les modalités d'interaction

Les modes d'interaction proposés actuellement restent limités et souvent peu maniables à l'exemple des interfaces de contrôle parfois proposées sur les branches des lunettes de RA ou des manettes en RV. Les technologies permettant une interaction naturelle (geste, mouvement des yeux, voix, etc.) présentent un potentiel intéressant mais constituent également des verrous importants.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

■ Convaincre les clients de la valeur ajoutée des technologies immersives

Le premier défi commercial concernant la RA et la RV consiste à convaincre les clients potentiels de la valeur ajoutée de ces technologies dont ils ont souvent une connaissance limitée. Comme pour la 3D, la question centrale est de savoir comment convaincre un consommateur d'acquérir un matériel (souvent onéreux) dans le but de faire l'expérience de quelque chose d'entièrement nouveau (expériences audiovisuelles interactives et immersives). Le défi consistera donc à aller au-delà de la niche de technophiles pour atteindre le grand public, masse critique nécessaire au développement de contenus et équipements coûteux. Pour cela, une « killer app » sera nécessaire.

■ Développer les écosystèmes autour de ces technologies

Le développement d'écosystèmes et de plates-formes propriétaires constitue aussi un véritable défi. Les différents acteurs du secteur risquent de devenir dépendants des GAFA. Facebook a ainsi racheté Oculus, acteur historique de la RV. Apple a acquis Metaio, une startup allemande spécialisée dans la RA, en mai 2015. Fin 2014, Google a investi 542 millions de dollars dans Magic Leap, une startup qui souhaite révolutionner la RA. Par ailleurs, Google travaille sur plusieurs projets liés aux technologies immersives comme une version d'Android adaptée aux casques de RV ou encore une fonctionnalité de RA pour Google Maps.

■ Favoriser les interactions entre acteurs de profils très variés et réunir les meilleures expertises

La structuration des acteurs aux profils et métiers très différents (éditeurs de presse, acteurs du tourisme, producteurs de contenus, fabricants de machines,..) et leur mise en relation constitue également un défi important. Elle est en effet nécessaire au développement d'une offre attractive intégrant : les producteurs de contenus, les fournisseurs de briques logicielles et les fournisseurs de hardware.

Cette révolution numérique doit pouvoir s'appuyer sur les pôles de compétitivité qui devront tous avoir une logique « transformation numérique » en accord avec les entreprises adhérentes. De plus, cela peut favoriser les rapprochements (capital ou autre) entre acteurs pour atteindre une taille critique sur des marchés mondiaux.

Les enjeux réglementaires

■ Propriété intellectuelle des œuvres

Les dispositifs de RA, en superposant l'information à une captation vidéo en temps réel de l'environnement ou en la calant sur une image source suscitent des questions en termes de propriété intellectuelle des œuvres.

■ Données personnelles et droit à l'image

Les technologies immersives systématisent des débats préexistants. Les lunettes de RA collectent à la fois des données très précises sur leur utilisateur mais aussi sur toutes les personnes et les lieux qu'il côtoie à travers la captation vidéo et l'utilisation d'images sources. Les IHM du type EEG sont également confrontées à la problématique des données personnelles et posent des questions éthiques.

■ Santé

L'ANSES a émis des *recommandations* concernant les dispositifs de RA et de RV comme les Google Glass ou encore l'Oculus Rift en soulignant notamment les risques de fatigue visuelle ou encore de troubles sensoriels importants notamment chez les enfants. De manière générale, les technologies immersives visuelles présentent des risques liés à l'épilepsie.

■ Sécurité

Les problématiques de sécurité concernent principalement la RA. Les erreurs de logiciel ou les erreurs d'interprétation des données peuvent générer des instructions erronées. Cela peut s'avérer dangereux par exemple dans le cas de la conduite automobile assistée par RA. De manière générale, les lunettes de RA peuvent déconcentrer l'utilisateur et créer des interférences dangereuses sur le plan sensoriel (par ex : l'affichage d'objets virtuels diminuant le champ de vision).

Analyse AFOM

ATOUTS

Le poids du cinéma français en production et au box-office (1er européen).

La place des acteurs du jeu vidéo, souvent à la pointe en matière de technologies et de contenus.

Les formations dans le gaming sont bien en place au niveau national : Supinfogame à Valenciennes est déjà mondialement réputée pour la formation dans les jeux vidéo.

La France demeure toujours la première destination touristique mondiale.

La qualité des laboratoires de recherche.

Un tissu de startups fournisseuses de technologies innovantes.

De grands groupes donneurs d'ordres dynamiques (Thalès, Dassault, Orange, etc.) et développeurs de technologies.

Des institutions publiques volontaires pour s'impliquer dans la mise en place de démonstrateurs.

Des fournisseurs de contenus motivés par les technologies immersives.

FAIBLESSES

Cinétose provoquée par la RV. Difficulté à produire des retours haptiques réalistes.

Fragmentation de la filière.

Manque de connaissances du public.

OPPORTUNITÉS

Le tourisme : un potentiel de valorisation majeur.

Le caractère émergent du marché de la RA et de la RV.

Les actions menées dans le cadre de la Nouvelle France Industrielle

IHM innovantes promues par les jeux vidéo et pouvant être réutilisées dans d'autres secteurs.

MENACES

Enjeux liés à la propriété intellectuelle : technologie de l'image.

Une industrie de contenus de plus en plus dépendante des fournisseurs de technologies.

Prédominance des grands groupes (GAFA) qui développent des plateformes et des environnements logiciels propriétaires.

Restrictions règlementaires sur la sécurité d'utilisation et la santé.

Rejet de la part des utilisateurs.

Problématiques liées au droit à l'image et aux données personnelles.

Facteurs clés de succès et recommandations

La plupart de ces technologies (RV, 3D) sont issues d'autres secteurs (notamment le militaire). La France doit profiter de ses compétences dans la production de contenus (cinéma, jeu vidéo,..) pour pousser ces technologies.

■ Convaincre de l'intérêt des technologies immersives

Un véritable travail d'évangélisation doit être réalisé notamment via des démonstrateurs afin de qualifier, de quantifier et communiquer sur la valeur ajoutée de ces technologies.

■ Structurer la filière

Sans la mise en relation des différents acteurs (pôles de compétitivité, fournisseurs, utilisateurs …), l'offre en termes de technologies immersives ne peut pas se développer. Il est ainsi important de susciter des partenariats entre les sphères métiers et technologiques, et d'encourager la réalisation d'applicatifs.

■ Développer l'offre française

Il est important de développer une offre industrielle française, et de favoriser l'émergence de champions nationaux. Cela doit s'accompagner d'un passage à l'échelle de nos nombreuses startups, notamment grâce à des travaux d'interopérabilité et de normalisation.

■ Renforcer les échanges entre le milieu académique, la recherche et l'entreprise

Les technologies immersives ouvrent la voie à de nouveaux usages et de nouvelles applications. Il est toutefois essentiel d'améliorer les échanges entre la recherche, plutôt avancée au niveau national, et les entreprises.

■ Proposer des technologies matures

Afin de ne pas provoquer un rejet durable de la part des utilisateurs, les technologies immersives proposées doivent être suffisamment matures et offrir une expérience aboutie.

■ Créer des expériences et des contenus spécifiques à la RA et la RV

Il est essentiel de montrer l'intérêt de ces technologies en soulignant leur indépendance vis-à-vis des supports et des médias traditionnels. Le développement de « killer applications » constitue un levier privilégié.

■ Renforcer l'acceptabilité sociale

Les technologies immersives et plus particulièrement la RA ne peuvent pas se développer sans l'adhésion des utilisateurs. La question de l'acceptabilité sociale doit donc être posée en amont afin d'éviter une situation de rejet comme cela a été le cas pour les Google Glass.

Acteurs clés

Entreprises	3D sound Labs, Artefacto, Atos, Augmentedev, Catopsys, Diotasoft, Dassault Systemes, DCNS, Laster, Orange, Optinvent, Starbreeze Thales Research and Technology,…
IRT, ITE, IHU	B-COM
Instituts Carnot	CEA LIST, INRIA…
Autres centres de recherches	Centre interdisciplinaire de réalité virtuelle, GRETA (Telecom ParisTech), Institut d'informatique appliquée, Le2i, Rubika, Systèmes et Transports (Université de Technologie de Belfort-Montbéliard)…
Pôles de compétitivité	CapDigital, Images et Réseaux, Imaginove, Systematic…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	CLARTE, Salon Laval-Virtual...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

15 Procédés relatifs à la chimie du pétrole

Loisirs & Culture
ÉNERGIE, **MOBILITÉ**, Numérique
Environnement, **HABITAT**, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Pétrole, raffinage, pétrochimie, distillation atmosphérique, procédés de conversion, hydrocraquage, conversion profonde, procédés de mélange, vapocraquage, polymérisation.

© TOTAL - Marco Dufour

Définition et périmètre

Définition

La transformation du pétrole en produit commercialisable se décompose en deux grandes activités : le **raffinage** et la **pétrochimie**. La première consiste à séparer les diverses coupes du pétrole dans l'objectif de les transformer en produits intermédiaires et commerciaux.

La seconde consiste principalement à transformer la coupe naphta ou la coupe éthane, issue du raffinage, en oléfines, aromatiques et plastiques.

Technologies

Des technologies spécifiques et utilisées successivement permettent de mettre en œuvre ces deux activités :

Raffinage	**Distillation atmosphérique** : sous l'effet d'une pression proche de l'air ambiant, séparation des différentes couches pétrolières (butane, propane, kérosène, essence, fioul, etc.). Les différents produits peuvent ensuite être récupérés[1].
	Procédés de conversion : modification de la structure chimique des coupes pétrolières. Ils incluent les procédés suivants : Craquage et hydrocraquage catalytique : transformation des molécules lourdes en produits plus légers ; Conversion profonde : production de fiouls lourds en hydrocarbures légers.
	Procédés de traitement poussé : neutralisation / élimination des composants néfastes pour l'environnement et la santé.
	Procédés de mélange : mélange des produits intermédiaires selon des spécifications techniques prédéfinies[2]. Des appareils doseurs sont utilisés pour se conformer à ces spécifications.
Pétrochimie	**Vapocraquage** : cassage des hydrocarbures du naphta en molécules légères et insaturées (éthylène, propylène, hydrocarbures insaturés).
	Polymérisation : transformation des molécules issues du vapocraquage en polymères (polyéthylène, polypropylène, etc.).

Ces technologies ont été développées depuis les années 1970 pour les plus récentes. De ce fait, l'innovation dans le domaine de la chimie du pétrole porte principalement sur **leur optimisation**, en particulier dans trois champs[12] :

- L'utilisation de **types de bruts jusque-là moins valorisés**, comme les coupes lourdes ;
- L'amélioration des **propriétés des produits** : ajout d'additif (par exemple pour améliorer le rendement des moteurs à combustion), production de polymères métallocènes[3] et polymères de spécialité[4] s'appuyant sur des procédés avancés de polymérisation, etc. ;
- La diminution de leur **impact environnemental** : utilisation de technologies de gestion des données massives, technologies de recyclage, etc.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le raffinage et la pétrochimie sont des **maillons indispensables de l'industrie**. Ces activités sont essentielles au secteur de la chimie, qui utilise ses produits, puis plus en aval aux secteurs applicatifs de l'automobile, de l'électroménager, de la santé ou encore de la construction, avec des enjeux en termes de compétitivité et d'emploi. Selon l'Union Française des Industries Pétrolières (UFIP)[5], l'industrie pétrolière génèrerait 200 000 emplois directs ou indirects en France, dont 30 000 emplois pour le raffinage.

1 – Si le naphta est utilisé en pétrochimie, les autres produits issus du raffinage, qui représentent 90 % des produits raffinés, trouvent des applications multiples. Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) constitue un carburant pour les véhicules à gaz, l'essence et le gazole pour les véhicules automobiles et le kérosène pour l'aviation ; les gaz butane et propane sont utilisés à des fins domestiques ; les huiles permettent la fabrication de lubrifiants ; le fioul domestique sert comme combustible de chauffage ; le fioul lourd alimente certains bateaux ; enfin, le bitume recouvre les routes

2 – En France, ces spécifications ont été définies par une série d'arrêtés (3 septembre 1979 pour le propane par exemple)

3 – Polymères dérivés de la catalyse à site unique ayant émergé dans les années 1990

4 – Polymères répondant à des besoins très spécifiques, obtenus par polymérisation radicalaire ou condensation

5 – UFIP, 2012 : *L'industrie pétrolière en France – Contribution au débat sur l'énergie*

Pour capter un marché des technologies du raffinage et de la pétrochimie attractif, la France dispose d'un **leader sur le marché** (Total) et du **deuxième secteur exportateur parapétrolier au monde**[6]**.** Le pays bénéficie ainsi d'excellentes capacités d'investissement industriel.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés suivantes ont une influence sur les procédés de la chimie du pétrole :

■ **Procédés relatifs à la chimie verte** (influence forte) **:** la pétrochimie fait également face à la nécessité de réduire son empreinte environnementale et sanitaire. En ce sens, les avancées de la chimie verte dans le domaine du génie et de la chimie des procédés peuvent lui permettre de réduire l'impact de ses procédés sur le plan environnemental ;

■ **Valorisation et intelligence des données massives** (influence faible) **:** ces technologies commencent à être utilisées pour l'optimisation des procédés de la chimie du pétrole ;

■ **Recyclage des métaux rares et terres critiques** (influence faible) **:** les procédés génèrent des déchets contenant des métaux rares encore peu valorisés ;

■ **Robotique autonome** (influence faible) **:** les raffineries commencent également à mettre en œuvre ce type de technologies pour améliorer leur efficacité ;

■ **Technologies de récupération de chaleur à basse température** (influence faible) **:** elles peuvent contribuer à diminuer l'empreinte environnementale des procédés de la chimie du pétrole.

Les procédés de la chimie du pétrole ont à leur tour une influence forte sur les **matériaux avancés et actifs**, dans la mesure où ils fournissent les polymères composant nombre d'entre eux.

Les marchés

Principaux acteurs

Connaissant une série de fusions-acquisitions depuis le milieu des années 90, l'industrie du pétrole s'est concentrée autour de **grandes compagnies pétrolières privées** : Exxon Mobil, Shell, Total, BP, Chevron ou encore Conoco, côtoyant des **compagnies nationales puissantes** comme Nioc (Iran), Cnpc (Chine), Petrobras (Brésil) ou Petronas (Indonésie). Les dernières années ont vu par ailleurs la montée en puissance des groupes pétroliers russes (Lukoil, BP-TNK, Gazprom, etc.) et des compagnies du Moyen-Orient (Saudi Aramco, Sabic, etc.). Toutes ces entreprises intègrent généralement les activités de l'exploitation à la pétrochimie[7]. Cependant, il existe également des acteurs qui ne traitent que de la partie raffinage et/ou pétrochimie, telles des sociétés chimiques comme Ineos.

Les structures et technologies utilisées par ces pétroliers dans les domaines du raffinage et de la pétrochimie sont développées pour partie en propre, et pour partie par les entreprises du **secteur parapétrolier**[8]**.** Ces dernières comprennent des grands groupes de nationalité américaine, française, britannique ou norvégienne. Dans son ensemble, le marché parapétrolier était estimé à 216 milliards de dollars en 2015 et il pourrait passer à 339 milliards de dollars en 2019[9]**.**

Dynamiques de marché

Les technologies du raffinage et de la pétrochimie devraient continuer de bénéficier de la **prépondérance du pétrole au niveau mondial**. En 2014, le pétrole restait la première énergie avec 32,6 % de la consommation totale d'énergie[10]. L'essor des substituts biomasse, le développement rapide du gaz naturel et l'abondance du charbon ne devraient pas remettre en cause cette situation à l'horizon 2020[11]. D'ici là, la demande en pétrole devrait même progresser plus rapidement que l'offre, selon des prévisions récentes de l'Agence Internationale de l'Énergie (février 2015). De 92,4 millions de barils par jour (mbj) en 2014, la consommation pourrait ainsi passer à 99,1 mbj en 2020.

6 – L'Usine Nouvelle, 07/03/2013 : « Les perles françaises du pétrole »

7 – IFP Énergies nouvelles

8 – Ces entreprises comprennent des bailleurs de licence, qui ont la détention légale des procédés, les entreprises d'ingénierie de la construction et les entreprises d'appui à l'exploration et à la production

9 – Douglas Westwood, 2015 : *World Oilfield Services Market Forecast 2015-2019*

10 – BP, 2015 : *Statistical Review of World Energy*

11 – Les industriels du pétrole cherchent d'ailleurs à diversifier leurs activités en se tournant vers ces 2 ressources (gazochimie, carbochimie), et également vers la biomasse

Selon l'UFIP[12], les **capacités de raffinage** en Europe ont baissé de 13 % entre 2007 et 2013. Pour les fournisseurs de technologies de raffinage, le potentiel sur ce marché réside donc principalement dans l'**optimisation des infrastructures existantes**, notamment sur un plan environnemental. Avec un phénomène de rapprochement des capacités de raffinage des sites d'exploitation du pétrole, la demande en technologies de raffinage devrait être tirée à l'horizon 2020 par l'**Asie et le Moyen-Orient**, qui concentrent actuellement 80 % des projets[13], l'Amérique du Nord, l'Amérique latine et la Russie.

La pétrochimie représente actuellement **10 % de la demande en brut**, et ce ratio pourrait passer à 13 % en 2030[14]. D'ici 2020, le marché pourrait progresser d'environ 7 % par an selon certains analystes[15]. Le marché des technologies de la pétrochimie devrait être tiré par l'industrie pétrochimique américaine, bénéficiant d'un éthane à bas prix coproduit de l'exploitation des pétroles et gaz de schiste[16], par les pays asiatiques (notamment la Chine) et par les pays du Moyen-Orient. Sur un marché européen en difficulté, l'enjeu constituera principalement à moderniser des installations pétrochimiques vieillissantes. À titre d'exemple, 90 % des vapocraqueurs européens ont plus de 30 ans[17].

Les défis technologiques à relever

Etendre les types de pétroles bruts exploités

La tendance est à un **élargissement des types de pétroles bruts exploités**. D'une part, la valorisation des coupes lourdes constitue un défi de premier plan. En particulier, le traitement de bruts lourds plus soufrés impose de perfectionner les technologies de désulfuration[18] et l'amélioration des technologies de conversion profonde et d'hydrocraquage est nécessaire.

12 – Union Française des Industries du Pétrole

13 – Le Monde, 13/08/2014 : « De nouvelles raffineries européennes menacées de fermeture »

14 – Données de Total

15 – Transparencymarketresearch, 2014 : *Petrochemicals Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Outlook, Trends and Forecast 2014 – 2020*

16 – Entre 2008 et 2012, le prix du naphta a augmenté de 19 % en Europe tandis que le prix de l'éthane chutait de 55 % aux États-Unis. IFRI, 2013 : *La révolution des pétroles de schiste aux États-Unis*

17 – La Croix, 30/03/2014 : « Les difficultés du raffinage et de la pétrochimie européenne »

18 – Les pétroliers sont en effet tenus de proposer des produits aux teneurs en soufre faibles pour respecter des normes environnementales toujours plus strictes

D'autre part, le raffinage de **bruts à la composition de plus en plus variable**, particulièrement les pétroles non conventionnels, nécessite de flexibiliser les outils de production. L'exploitation des gaz de schiste demande notamment de faire évoluer les équipements de vapocraquage, principalement basés sur le naphta en Europe, pour pouvoir transformer l'éthane contenu dans ces gaz[19] en éthylène puis en polyéthylène.

Certains acteurs en Europe se sont déjà lancés dans l'importation d'éthane depuis les États-Unis et la conversion de leur vapocraqueur[20]. Cette situation pourrait jouer sur l'approvisionnement en propylène et butadiène, dans la mesure où le craquage de l'éthane en produit en quantité moindre par rapport à celui du naphta. De nouveaux process chimiques devraient alors être mis en service à grande échelle pour répondre à ces tensions.

19 – Les gaz de schiste contiennent des proportions importantes d'éthane.

20 – Industrie.com, 13/10/2014 : « De l'éthane américain craqué à Mardyck »

Améliorer les produits finis

Les pétrochimistes se penchent également sur l'**amélioration des propriétés des polymères**, pour les adapter notamment à la chimie de spécialité. Ces recherches nécessitent des procédés avancés de polymérisation ou des procédés de traitement de surface adaptés.

Vers une optimisation énergie/matière des procédés

La **diminution de l'empreinte environnementale des procédés du pétrole** constitue un autre enjeu technologique. Elle passe par l'amélioration de leur efficience (quantité d'énergie et de matières consommées), mais également par l'intégration de nouvelles sources (végétaux, déchets chimiques, etc.) et la limitation des effluents (recyclage des déchets, valorisation des eaux usées, etc.). Des gains aussi bien écologiques qu'économiques peuvent en être attendus[21] et des progrès concrets ont déjà été réalisés[22]. Les technologies de captage, transport et stockage du CO_2 restent toutefois encore largement exploratoires.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Capter un marché mondial

Le marché des technologies du pétrole est international[23]. De ce fait, à l'horizon 2020, l'un des principaux enjeux pour les entreprises françaises est de se **projeter sur les marchés porteurs**. Cela implique notamment de s'inscrire dans les projets de raffineries conduits dans les pays du Golfe et en Asie, en s'appuyant au besoin sur des partenariats avec des entreprises étrangères. À titre d'exemple, le groupe Total s'est associé fin 2012 avec le pétrolier qatari Industries Qatar pour développer dans ce pays du Moyen Orient l'une des plus grandes usines de polyéthylène basse densité au monde.

Développer des technologies alliant performance et rentabilité

Sur les marchés européens, le potentiel de croissance porte davantage sur l'**amélioration des infrastructures existantes**. Des **équilibres économiques** restent néanmoins à trouver. Pour les raffineurs et pétrochimistes, l'achat de droits d'émission via le système européen d'échange de quotas reste souvent plus avantageux sur le plan économique que la mise en place de dispositif de réduction de CO2. Cette situation incite souvent peu les industriels à privilégier la seconde solution, pourtant plus écologique. L'amélioration de la rentabilité des technologies environnementales constitue ainsi un défi de premier plan.

Le besoin de différencier l'offre pétrochimique

Par ailleurs, les **pétroles non conventionnels** permettent aux pétrochimistes des pays exploitants, les États-Unis au premier chef, de bénéficier d'une matière première moins chère, avec pour effet d'accroître leur compétitivité et de redéfinir les équilibres mondiaux. Cette nouvelle donne pourrait pousser la pétrochimie européenne à **différencier de plus en plus son offre**, en se tournant par exemple davantage

21 – L'énergie représente par exemple plus de la moitié des coûts opératoires de Total pour ses activités de raffinage

22 – À titre d'exemple, les émissions de composés organiques volatils issues du raffinage ont été diminuées par 2 entre 1990 et 2009, selon l'UFIP

23 – Le secteur parapétrolier français réalise notamment plus de 90 % de son chiffre d'affaires à l'étranger

vers la **chimie de spécialité**[24]. Dans ce domaine, la concurrence des industries pétrochimiques des pays du Golfe pourrait toutefois s'intensifier à l'avenir. Ces industries bénéficient en effet de leur proximité avec les gisements de matières premières et avec les débouchés des pays asiatiques.

Les enjeux réglementaires

Au niveau mondial, un **renforcement des normes de qualité** est observé, ce qui devrait jouer en la faveur du développement de technologies toujours plus performantes

Au niveau européen, les activités pétrolières sont encadrées par une réglementation de plus en plus stricte en matière de sécurité environnementale et sanitaire (règlement REACH[25], directive IED[26], Directive SEVESO[27], etc.). Ces réglementations créent des effets d'**obsolescence accélérée** de certains outils de production. Son renforcement devrait continuer de nécessiter des investissements conséquents de la part des industriels pour y faire face.

Analyse AFOM

ATOUTS

De fortes capacités d'investissement et de projection à l'international des compagnies pétrolières

Une industrie parapétrolière occupant le deuxième rang au niveau mondial en termes d'exportations

Un vivier de start-up et de PME innovantes

FAIBLESSES

Une diminution progressive des capacités de raffinage en Europe

Une industrie pétrochimique européenne en difficulté

OPPORTUNITÉS

Un dynamisme de la demande en pétrole dans les marchés émergents

Des projets importants de raffinage et de pétrochimie au Moyen-Orient, en Asie et en Amérique du Nord

Des possibilités de différenciation pour les entreprises françaises sur les marchés de la valorisation de nouvelles matières premières

MENACES

Une concurrence forte, notamment de grands groupes américains ou britanniques

À plus long terme, le développement des énergies renouvelables et du véhicule électrique

24 – La relative faiblesse de la chimie de commodités européenne par rapport aux pays comme les États-Unis ne devrait pas représenter une menace pour la chimie de spécialité. Celle-ci mobilise des volumes faibles de produits issus de la chimie de commodités, qui pourraient être importés

25 – Entrée en vigueur en 2007, cette procédure encadre étroitement l'utilisation de substances chimiques

26 – Cette directive encadre les émissions industrielles. Elle a été transposée dans le droit français en 2013

27 – Cette directive impose aux États-Membres d'identifier les sites présentant des risques industriels majeurs. La directive Seveso 3 s'applique depuis le 1er juin 2015

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

■ Accompagner la mutation environnementale de l'industrie pétrolière française en renforçant le soutien à l'innovation ;

Aux entreprises :

■ Se développer sur les marchés avec une forte composante innovation, dans les domaines notamment de :

— La performance environnementale ;

— La valorisation de nouvelles ressources.

Aux académiques :

■ Amplifier les projets de recherche sur l'efficience des procédés, dans la lignée par exemple des travaux de recherche conduits par l'IFP Energies Nouvelles sur les procédés de transformation d'oléfines.

Acteurs clés

La France dispose d'entreprises puissantes aussi bien dans l'industrie pétrolière que parapétrolière. Selon le classement Fortune Global 500, le groupe Total se plaçait notamment au sixième rang mondial en 2014 en termes de chiffres d'affaires. Ces entreprises incluent :

■ Compagnies pétrolières : Total, Engie, Maurel & Prom, Perenco, Dyneff, etc. ;

■ Grands groupes parapétroliers : CGG, Technip, etc. ;

■ Autres grands groupes : Air Liquide, Arkema, etc. ;

■ PME parapétrolières : Axens, Doris Engineering, ECA, Dietswell, Geostock, Bardot, Emc3, Saltel, etc.;

■ Start-up : Pyrum Innovations, Global Buienergies, CIMV, Neodyss, etc.

Elles sont regroupées pour la plupart d'entre elles au sein d'un certain nombre d'organisations professionnelles comme l'Union Française de l'Industrie Pétrolière (UFIP), elles-mêmes regroupées au sein du Comité Professionnel du Pétrole (Cpdp).

Au niveau de la recherche, la France accueille également des structures d'excellence comme l'IFP Energies Nouvelles, le pôle AXELERA ou encore les instituts Carnot BRGM et ISIFoR.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

16 Recyclage des métaux critiques et terres rares

Loisirs & Culture
Énergie, **MOBILITÉ**, Numérique
ENVIRONNEMENT, Habitat, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Métaux critiques, déchets d'équipements électriques et électroniques, métaux stratégiques, terres-rares, recyclage, récupération par précipitation, fonte haute-température, extraction par solvant, décrépitation à l'hydrogène, biométallurgie, opérateurs de collecte, sécurité environnementale, économie circulaire

© Solvay/photolibrary

Définition et périmètre

Définition

Un métal est dit « critique » lorsqu'il répond à deux critères :

- Il joue un **rôle clé sur le plan économique** (importance dans la chaîne de valeur de certains produits, poids économique des secteurs industriels consommateurs, faible substituabilité) ;
- Son approvisionnement peut être soumis à des **tensions**, voire des contrôles à l'exportation.

Ces caractéristiques font varier la liste des métaux critiques dans le temps et selon les zones géographiques. Pour la zone Europe, la Commission Européenne a publié en 2010[1] une liste **de quatorze métaux qualifiés de « stratégiques »**, qui inclut l'antimoine, l'indium, le béryllium, le magnésium, le cobalt, le niobium, le fluor, les platinoïdes, le gallium, le germanium, le tantale, le graphite, le tungstène et enfin un ensemble de dix-sept éléments chimiques dits « terres rares » [2], produits par la Chine à hauteur de 98 %.

Applications

Les métaux critiques entrent tous dans la composition de produits de **haute technologie,** en premier lieu dans le domaine des TIC[3] : circuits intégrés, infrarouge militaire, batteries, transistors, retardateurs de flammes, écrans tactiles, condensateurs, etc. Certains d'entre eux sont également utilisés dans les domaines de la métallurgie (indium, magnésium, graphite, titane, etc.) pour des applications automobile et aéronautique, de l'optique (germanium) voire de la médecine pour l'antimoine et le gallium. Ils sont aussi très présents dans les applications énergie et transport (dysprosium, lithium, néodyme, palladium, platine, etc.).

L'enjeu du recyclage

Le taux de recyclage de ces métaux a été évalué dans un rapport du Programme des Nations-Unies pour l'Environnement publié en 2011[4]. Parmi les 60 matériaux étudiés au total, seuls **dix-huit** avaient un **taux de recyclage supérieur à 50 %**. Cette situation s'explique par leur **dispersion** dans une grande diversité de produits, au sein desquels ils ne sont présents qu'en très faible quantité. Stratégiques pour l'économie mais difficilement valorisables en fin de vie, leur recyclage constitue ainsi un enjeu de premier plan.

Les technologies actuelles

Elles varient selon les types de déchets et/ou métaux traités. Certaines d'entre elles ont déjà été développées **à l'échelle industrielle**. Elles incluent par exemple des procédés de recyclage par attaque chimique et récupération par précipitation pour les poudres luminophores. Les éléments contenus dans les batteries peuvent également être récupérés grâce à une fonte à haute température et des procédés d'hydro-pyrométallurgie. D'autres sont encore **exploratoires**. Des techniques d'extraction par solvant sont étudiées pour le recyclage des tubes cathodiques. Pour les aimants permanents, les recherches portent notamment sur l'extraction en phase gazeuse et le retraitement après décrépitation à l'hydrogène. Pour les cartes électroniques, elles portent sur des procédés d'attaque d'eau supercritique. La biométallurgie[5] s'inscrit également au sein des programmes de R&D de certains industriels.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le recyclage des métaux critiques constitue pour la France et l'ensemble des pays importateurs un **sujet de sécurité d'approvisionnement**. Le développement de ces technologies constitue l'opportunité de réduire leur dépendance vis-à-vis des pays exportateurs et de diminuer les tensions sur le marché des métaux critiques.

Avec d'autres pays comme les États-Unis et le Japon, la France s'inscrit parmi les **leaders** sur ce marché émergent. Son territoire accueille des infrastructures de recyclage de premier plan au niveau européen, en particulier une unité de séparation dédiée aux terres rares[6] et des unités de métallurgie de métaux stratégiques (antimoine, tungstène, etc.). Portée aussi bien

1 – Commission Européenne, 2010 : *Critical Raw Materials for the EU*, actualisée en 2014

2 – Ces éléments sont le scandium, l'yttrium, et les 14 lanthanides stables : lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium et lutétium

3 – Technologies de l'information et de la communication

4 – PNUE, 2011 : *Recycling Rates of Metals*

5 – Utilisation de microorganismes pour la valorisation des métaux

6 – La France accueille notamment à la Rochelle l'une des 2 seules usines de séparation des terres rares en Europe

par le secteur public que privé, la R&D est particulièrement dynamique.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés suivantes ont pour l'instant une influence faible sur le recyclage des métaux critiques et des terres rares :

■ **Métaomique :** elle peut permettre de mieux comprendre l'impact de certains agents sur les métaux critiques et ouvrir de nouvelles voies pour leur recyclage ;

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique :** le développement des procédés de recyclage des métaux critiques repose en partie sur des technologies de modélisation.

Les marchés

Le recyclage des métaux critiques représente actuellement un **marché émergent**, dont le potentiel de développement reste mal évalué. Dans les produits en fin de vie, le recyclage est encore limité aux métaux ayant une très forte valeur comme le platine, le palladium et le cobalt[7]. En 2010, l'ADEME ajoutait également à cette courte liste le lithium issu des accumulateurs lithium-ion ainsi que les terres rares contenues dans les lampes fluo-compactes[8]. Plusieurs éléments laissent néanmoins présager une **montée en puissance des activités de recyclage** à l'horizon 2020.

Tout d'abord, **l'arrivée sur le marché d'un nombre toujours plus élevé de produits en fin de vie** générera de nouveaux gisements de déchets qu'il conviendra de traiter. Avec 41,8 millions de tonnes en 2014 contre 39,8 millions de tonnes en 2013[9], les déchets électriques et électroniques (DEEE), premier contenant de métaux critiques, ont atteint un nouveau pic au niveau mondial[10]. Leur volume devrait continuer de progresser de manière exponentielle à l'horizon 2020. En France, les opérateurs de traitement attendent ainsi une multiplication par 5 des déchets de DEEE qu'ils collectent dans les 5 années à venir[11].

Ensuite, la **structure de l'offre en métaux critiques** devrait renforcer la pertinence du recyclage dans les prochaines années.

■ D'une part, la production est **concentrée** dans un petit nombre de pays. La Chine n'assure pas moins de 97 % de la production en terres rares et de 50 % de la production de 7 autres métaux critiques[12]. Le Brésil bénéficie également d'une situation quasi-monopolistique pour l'extraction du niobium. Les pays fortement consommateurs de biens intégrant des métaux critiques – y compris la France – devraient ainsi être fortement motivés à améliorer le recyclage pour réduire leur dépendance de ces quelques pays exportateurs ;

■ D'autre part la hausse des coûts d'exploitation[13] et les contraintes environnementales toujours plus vives tendent à **limiter le potentiel de production[14], tandis que la demande devrait continuer de croître rapidement, générant des tensions d'approvisionnement.**

Enfin, le recyclage des métaux critiques fait l'objet d'**initiatives de promotion d'ampleur internationale**. Pour des raisons principalement écologiques[15], le Panel International des Ressources[16], hébergé par le Programme des Nations-Unies pour l'Environnement, soulignait l'urgence de recycler les métaux dans 2 rapports publiés en 2013[17]. Ces démarches politiques favorisent l'émergence d'un marché du recyclage à l'horizon 2020.

Les défis technologiques à relever

Le recyclage des métaux critiques rencontre plusieurs verrous sur le plan technique qui entraînent la perte de volumes importants de matières premières.

---

7 – Géologues, n°170, 16/10/2012 : « Le défi des métaux critiques »

8 – ADEME, 2010 : *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*

9 – Université des Nations-Unies, 2015 : *The Global E-waste Monitor 2014: Quantities, Flows and Resources*

10 – Moins d'un sixième de ces déchets étaient recyclés, alors même qu'ils renfermeraient pour près de 47 milliards d'euros de fer, cuivre, or argent ou aluminium, amenant le sous-secrétaire général des Nations-Unies M. David MALONE à évoquer une « *mine urbaine* »

11 – Arrêté du 31 mars 2015

12 – Données du BRGM

13 – Celle-ci est notamment provoquée par l'exploitation de gisements de qualité moindre, en raison de la raréfaction des ressources

14 – Analyse de MTL Index

15 – Le recyclage des métaux critiques permet de réduire significativement le coût environnemental et énergétique de leur utilisation par rapport à l'extraction minière

16 – Créée en 2007, ce panel produit une évaluation scientifique indépendante sur l'exploitation des ressources naturelles et leur impact environnemental

17 – PNUE, 2013 : *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure* et *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*

Des gisements éparpillés

En amont, la **dispersion** et la **faible teneur** des métaux critiques dans les déchets recyclés complexifient la collecte. Avec les industriels et les opérateurs de collecte, elles nécessitent de mettre en place des **filières de collecte structurées** qui soient adaptées à la fois à la diversité des déchets concernés et des métaux critiques. En partie en l'absence de telles filières, en 2011, moins de 1 % des terres rares étaient recyclées au niveau mondial[18].

Au niveau du tri, **la mesure de la teneur en matériaux critiques des déchets** reste un enjeu. Les instruments de mesure ne permettent pas systématiquement une évaluation documentée du gisement potentiel.

La difficulté du traitement de mélanges complexes

Lors du traitement, les **mélanges complexes et les alliages** constituent des défis pour les technologies actuelles[19]. À titre d'exemple, le béryllium contenu dans les circuits électroniques, utilisé en alliage avec le cuivre, ne peut être récupéré lors du recyclage.

Un outillage difficile à rentabiliser

Les équipements de recyclage étant généralement spécifiques à un métal, leur viabilité doit être mise en regard des **flux accessibles**. Par ailleurs, la modification de la composition de certains déchets limite la taille des flux homogènes et nécessite de faire évoluer au même rythme les outils de traitement. Par exemple, les cartes électroniques contiennent toujours plus de plastiques et de composés nouveaux ; en conséquence, les fonderies de cuivre qui en assurent le traitement peinent à s'y adapter.

■ **Les défis commerciaux et d'usage à relever**

Le financement du recyclage : un enjeu central

En France, la **question du financement** reste clé pour le recyclage des métaux critiques, et ce à double titre.

■ D'une part, l'absence de recyclage à une échelle industrielle pour la plupart des métaux ne permet pas le développement de **filières de recyclage rentables**. En particulier, leur dispersion au sein d'une diversité de produits génère encore des coûts de collecte et de séparation trop élevés par rapport aux bénéfices qui peuvent en être attendus ;

■ Par ailleurs, sans être une spécificité du recyclage, la **levée de fonds** reste souvent **ardue** pour les porteurs de projets innovants. Les institutions financières, notamment, attendent souvent une rentabilité des projets à court-moyen termes, incompatible avec la temporalité à long terme de l'innovation dans le domaine du recyclage. Devant l'absence d'appui financier, certaines entreprises françaises comme Terra Nova se sont ainsi tournées vers des investisseurs étrangers.

Un déficit de compétences

Le recyclage des métaux critiques requiert également un **niveau de technicité élevé**, qui nécessite des compétences spécialisées. En France, l'enjeu à l'horizon 2020 est de développer une offre de formation à la mesure du potentiel que représente le recyclage des métaux critiques. Une étude de faisabilité produite dans le cadre de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques soulignait en 2014 l'insuffisance de l'offre actuelle[20]. Il n'y aurait notamment aucune formation dédiée au sujet des terres rares.

Les enjeux réglementaires

Des réglementations incitatives

Au niveau européen, le recyclage des métaux critiques s'inscrit dans des démarches plus larges de

18 – PNUE, 2011 : *Recycling Rates of Metals*

19 – Entretien avec M. MENAD, chef de projet recyclage des déchets industries au sein du BRGM, cité dans matEnvironnement, 03/09/2014 : « Métaux stratégiques : les industriels cherchent le bon filon »

20 – Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, étude présentée par M. Patrick HETZEL, député, et Mme Delphine BATAILLE, sénatrice : *Étude de faisabilité de la saisine sur « les enjeux stratégiques des terres rares »*. Transmission à la Commission des Affaires économiques du Sénat le 24/02/2014

promotion de l'économie circulaire, leviers essentiels pour développer les pratiques de recyclage. Les objectifs fixés pour les pays membres au sein de la Directive Cadre 2008/98/CE ont été revus à la hausse en 2014. Ils visent aujourd'hui un recyclage de 70 % des déchets municipaux d'ici à 2030, tout en interdisant la mise en décharge des déchets recyclables d'ici 2025.

La **Directive DEEE** encadre le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques[21]. Prenant effet à partir de 2018, sa révision en 2012 a permis d'ouvrir son champ d'application à l'ensemble des EEE, à quelques exceptions près. Ces mesures réglementaires vont ainsi étendre la collecte et amplifier le gisement de matières premières.

L'enjeu de fixer des objectifs dédiés aux métaux critiques

Malgré son ambition, la réglementation actuelle n'aménage pas une **place spécifique pour le recyclage des métaux critiques**. Son effet réel risque d'être réduit, car les objectifs de recyclage peuvent être atteints sans les métaux critiques, qui représentent une part infime des volumes des DEE ou des véhicules hors d'usage (VHU). En particulier, aucun objectif de collecte / traitement des métaux critiques n'est fixé, une mesure appelée pourtant par un certain nombre d'observateurs au niveau national[22]. Cette situation peut notamment être expliquée par la difficulté de l'exercice, dans la mesure où ces objectifs devraient être adaptés à chacun des métaux selon les priorités du législateur pour être réellement pertinents[23].

21 – Cette Directive a été transposée dans le droit français à travers le décret du 22 août 2014

22 – En 2010, l'ADEME appelait de tels objectifs dans un rapport dédié aux métaux rares. ADEME, 2010 : *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*

23 – Cette difficulté était soulignée par le Panel international des ressources (UNEP) sur le site de l'UNEP dans un communiqué remontant à avril 2013

Analyse AFOM

ATOUTS

La présence sur le territoire d'unités de recyclage des métaux critiques

Des entreprises de premier plan au niveau mondial

Un tissu de R&D public et privé innovant

FAIBLESSES

Des filières de collecte dans l'ensemble peu structurées et peu rentables

Des usines non adaptées pour le traitement de produits à la composition complexe

Une absence de réglementation spécifique pour les métaux critiques permettant de tirer le marché de leur recyclage

Des porteurs de projets innovants qui rencontrent des difficultés pour la levée de fonds

OPPORTUNITÉS

Une dépendance de plus en plus importante de nombreux pays développés, y compris la France, vis-à-vis des pays exportateurs de métaux critiques

Un gisement de déchets croissant, concernant en particulier les DEEE

Des démarches de soutien au recyclage au niveau international et national

MENACES

Des verrous techniques difficiles à lever au niveau de la collecte et de la séparation des métaux critiques

Un déficit de compétences qui pourrait s'accentuer

Une concurrence de certains pays comme les États-Unis et le Japon

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics

Le principal enjeu est de soutenir la **structuration de filières du recyclage au niveau national et européen**. Cela implique notamment les actions suivantes :

- Porter au niveau européen une stratégie de recyclage des métaux critiques, avec des objectifs adaptés à chacun d'entre eux ;
- Inciter financièrement le recyclage de certains métaux critiques quand celui-ci n'est pas rentable pour les entreprises ;
- Renforcer le soutien financier aux projets de R&D pour faciliter notamment la commercialisation de solutions industrielles.

Aux entreprises

- Mettre en œuvre des collaborations intégrant les différents maillons de la chaîne du recyclage (collecte et traitement) ;
- Engager une réflexion coût / bénéfice pour identifier les métaux à haut potentiel de marché au niveau français et mondial.

Aux académiques

- Développer des formations dédiées au recyclage des métaux critiques à destination des entreprises.

Acteurs clés

Au niveau mondial, la France se situe aux avant-postes pour le recyclage des métaux critiques. Quelques grands groupes mènent des projets de R&D prometteurs, certains d'entre eux ayant déjà développé des solutions à une échelle industrielle. Un vivier de PME et start-up conduisent également des projets innovants, en particulier dans le nord de la France.

- Grands groupes : Rhodia, Solvay, Recylex, Eramet, mais aussi des usines détenues par des groupes étrangers comme Nyrstar à Auby, etc. ;
- PME : Recytech, Baudelet Environnement, Terra Nova, Neo Eco, etc. ;
- Start-up : Verseau, Recupyl, NIREATM, etc.

La recherche technologique est également portée par plusieurs structures telles que les pôles de compétitivité Team[2], Elastopôle, AXELERA et Matéralia, le CEA, les instituts Carnot ISIFoR et Ingénierie@Lyon ou encore le BRGM, qui participe à plusieurs projets comme Valoplus[24] ou Enviree[25]. Créé en 2013, l'IRT-M2P[26] a lui pour objectif de développer des équipements semi-industriels pour la métallurgie et le traitement des matériaux (tri des matières, analyse du cycle de vie, etc.).

Par ailleurs, la filière est soutenue par les pouvoirs publics à travers plusieurs démarches comme :

- La création d'un Comité des métaux stratégiques, créé en janvier 2011 avec pour objectif d'étudier la vulnérabilité des entreprises face à la raréfaction des matériaux ;
- L'introduction du recyclage dans le programme de la Nouvelle France Industrielle (solution industrielle du quotidien « Nouvelles ressources ») en 2015 et dans les 7 ambitions à fort potentiel pour l'économie française en 2013[27] ;
- Des appels à projets. Lancée en 2015, la troisième édition de l'appel à projets de recherche « Production durable de matières premières en Europe », porté par l'ADEME et les membres du réseau européen ERA-MIN[28], porte spécifiquement sur le recyclage des métaux critiques.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

24 – Récupération des terres rares dans les lampes basse consommation.

25 – Traitement des déchets miniers et industriels.

26 – Institut de Recherche Technologique « Métallurgie, Matériaux et Procédés ».

27 – Des projets innovants dans le domaine du recyclage des métaux ont été subventionnés à hauteur de 200 000 euros chacun. Ce subventionnement s'inscrit dans le cadre du Programme d'Investissements d'avenir, et plus particulièrement du concours mondial d'innovation.

28 – Réseau européen d'agences de financement de projets de recherche sur les matières premières non énergétiques, de l'extraction des matières premières vierges au recyclage.

17 Microfluidique

Loisirs & Culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT, Habitat, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Fluides – échelle micrométrique/ nanométrique – microsystèmes – capillaires – microréacteurs

Définition et périmètre

La microfluidique est l'ensemble de technologies permettant la manipulation et la caractérisation de fluides à des échelles micrométriques ou nanométriques. Elle peut être considérée à la fois comme une science visant à l'étude du comportement des fluides à l'intérieur de ces micro-canaux, et une technologie permettant la fabrication et l'utilisation de dispositifs microfluidiques. Ces dispositifs sont constitués d'une surface plane sur laquelle des capillaires et des chambres de réactions sont formés par photolithographie, moulage ou emboutissage. Des liquides en volumes micrométriques ou nanométriques sont ensuite insérés dans ces capillaires où ils sont déplacés, fractionnés, séparés ou mélangés pour obtenir des réactions chimiques. L'intérêt de travailler avec des volumes micrométriques, outre l'économie de moyens utilisés, réside dans l'accélération et l'automatisation du processus.

La microfluidique présente un intérêt en recherche fondamentale : elle permet d'analyser rapidement et précisément des phénomènes prenant naissance dans des systèmes fluides à échelle micrométrique, par exemple à travers le contrôle de l'environnement chimique d'une cellule et la mesure précise de sa réponse à des stimulations.

La microfluidique trouve aussi des applications industrielles dans divers domaines. En premier lieu, les appareils à technologie microfluidique sont utilisés dans les secteurs de l'impression, l'aérospatial, la chimie, les biotechnologies, la physique, l'agroalimentaire et l'environnement. En second lieu, les puces et réacteurs microfluidiques trouvent des applications principalement dans les secteurs de la chimie (en R&D et production industrielle) et des biotechnologies (surtout en recherche académique), et de façon plus émergente de la santé, de l'environnement, du contrôle en agroalimentaire et de l'énergie. Les puces et réacteurs microfluidiques peuvent être simples ou instrumentés (électrodes, capteurs, optiques, pompes…), la tendance étant à la complexification des outils, intégrant de plus en plus d'instruments sans pour autant être accompagnée d'une augmentation du prix.

En chimie, la microfluidique permet d'améliorer la productivité de la R&D, en accélérant les processus de criblage et de caractérisation de molécules, et ouvre de nouvelles perspectives : réduction des transports de matière, réduction des quantités stockées, conditions réactionnelles inaccessibles aux réacteurs macroscopiques, notamment en chimie supercritique où la microfluidique facilite la manipulation de réactifs dangereux et le contrôle des réactions. Les industriels peuvent ainsi concevoir des puces microfluidiques, par exemple des générateurs de gouttes, en céramique, en polymères, etc., qui leur permettent de tester en grand nombre et très rapidement des formulations de produits pour sélectionner les meilleurs candidats à la R&D.

En biotechnologies, la microfluidique intervient dans divers procédés, tels que le criblage à haut débit, l'électrophorèse d'ADN ou de protéines, la PCR, le tri cellulaire, les tests enzymatiques… Plus spécifiquement, dans le domaine biomédical, la microfluidique s'applique aux analyses sanguines, à la conception de tests de diagnostic *in vitro* et de diagnostic rapide avec des laboratoires sur puces, ou à des systèmes améliorés d'administration des médicaments. Des recherches sont également menées pour concevoir des diagnostics à bas coût sur papier, ou des organes sur puce à des fins de simulation.

Dans le domaine du contrôle agroalimentaire, la microfluidique permet une analyse ultra-rapide des produits avant consommation. Elle facilite la détection de contaminants chimiques ou biologiques, d'allergènes…

La microfluidique trouve également des applications dans le domaine de l'environnement, par exemple pour les mesures atmosphériques, la détection de polluants dans l'eau ou de contaminants dans les sols[1] ; le marché de l'analyse de l'eau reste toutefois le plus adapté aux caractéristiques de la microfluidique. Des explorations sont également en cours sur la conversion de gaz à effet de serre, la synthèse de polymère ou des techniques de dessalement de l'eau à bas coût.

Dans le domaine de l'énergie, la microfluidique joue un rôle dans la production de l'énergie, grâce à ses propriétés de conduction de la chaleur ainsi que les effets électrocinétiques. Elle ouvre notamment des voies vers des sources d'énergie propres, comme par exemple les micropiles à combustible pour la téléphonie et l'électronique mobile, source de puissance compacte, longue durée et portable.

Finalement, en sécurité civile et défense, la microfluidique permet des analyses rapides, par exemple pour

1 – Cf. Fiche « Traitement des sols pollués »

l'identification de l'ADN d'un suspect. La miniaturisation des procédés de détection biologique et chimique permettra des applications de type dosimètre individuel ou détecteur portable de terrain.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La microfluidique est une technologie d'intérêt pour la recherche fondamentale, de par sa capacité à accélérer et améliorer les processus tout en économisant les moyens. C'est également une source d'innovation pour des domaines industriels très nombreux et très variés : industries biomédicales, agroalimentaire, énergies propres, gestion de l'eau et de l'environnement, biodéfense et sécurité, cosmétique, etc. Environ 600 utilisateurs industriels et 200 start-up sont déjà positionnés sur ce marché dans le monde[2]. Elle représente pour la biologie et la chimie une révolution semblable à celle apportée par les microprocesseurs à l'électronique et l'informatique. La microfluidique a la capacité de modifier en profondeur les techniques actuelles dans ces domaines, tout en permettant une réduction dramatique des coûts ainsi que des risques liés à la manipulation de fluides en plus grands volumes, et en remplaçant les équipements encombrants par des puces et microréacteurs plus maniables et exigeant moins de mesures de sécurité. Elle permet donc de travailler plus vite et de façon moins coûteuse, dans un environnement plus propre et plus sûr.

Elle est nécessaire pour amener en clinique la «révolution génomique », la médecine de précision basée sur un séquençage rapide et peu coûteux, qui représente un des plus grands champs d'avancées potentielles des prochaines années. Elle est également la seule technologie à même d'intégrer une dimension chimique et biologique dans le monde des objets connectés. Enfin, elle est au centre de marchés très dynamiques et porteurs sur les prochaines années, tels que le biomédical, la sécurité alimentaire, la cosmétique ou encore la chimie.

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Capteurs :** les capteurs, en tant que microsystèmes intégrés pour la détection de marqueurs, sont une application directe de la microfluidique ;

■ **Ingénierie génomique et métaomique** : la microfluidique est un outil d'instrumentation pour les technologies de l'ingénierie génomique et de la métaomique, permettant notamment de manipuler des cellules uniques et intervenant dans le séquençage de l'ADN ;

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique :** les technologies de modélisation et de simulation permettent de faciliter la conception des laboratoires sur puce, par exemple en modélisant la physique des fluides à échelle micrométrique ;

■ **Procédés relatifs à la chimie verte :** la microfluidique, permettant de manipuler des fluides à échelle micrométrique, est un outil puissant pour les procédés de chimie verte ;

■ **Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition :** la microfluidique est un outil notamment de modélisation, permettant d'étudier l'impact de probiotiques sur un environnement, par exemple en reproduisant un microbiote gastrointestinal sur un laboratoire sur puce ;

■ **Valorisation et intelligence des données massives :** la microfluidique permet de réaliser des tests sur des milliers d'échantillons, générant ainsi des quantités massives de données que ces technologies aident à traiter et interpréter.

Les marchés

Le marché global de la microfluidique est estimé à plus d'une dizaine de Mds de dollars en 2013, et est très dynamique[3]. Il recouvre de nombreux marchés applicatifs, dont certains sont matures (impression à jet d'encre…) et d'autres plus émergents (Lab-on-chip, applications biomédicales ou agroalimentaires...)

Aujourd'hui, les impressions à jet d'encre sont l'application la plus courante de la microfluidique. Ce marché est surtout constitué du segment des têtes d'imprimantes à jet d'encre, segment très important en volume mais mature, et dont la croissance est faible. La part relative des impressions à jet d'encre dans le marché total de la microfluidique devrait diminuer significativement d'ici 2020.

Le second marché applicatif de la microfluidique est le marché du biomédical, estimé à 1.6 Mds de dollars en 2013, avec une croissance moyenne

2 – Données de Institut Pierre Gilles de Gennes

3 – Données de Institut Pierre Gilles de Gennes, BCC Research, Conférence Micro-TAS 2014

de 17 %[4]. Il couvre à la fois le renouvellement des systèmes d'analyse centralisés, et le développement de nouveaux systèmes (diagnostic, suivi à domicile, aide à la personne, délivrance de médicaments). La croissance devrait se maintenir au-delà de 20 % à horizon 2025, la pression croissante sur les dépenses de santé étant une des clés du développement de ce secteur. Les principaux acteurs du diagnostic ou de l'analytique sont positionnés sur ce marché : Siemens, Philips, General Electric Healthcare, Johnson & Johnson, Hitachi, Abbott, et quelques acteurs de taille moyenne français, tels que BioMérieux et Bio-Rad. Quelques PME françaises sont également positionnées, telles que HiFiBio, Cytoo, Millidrop, Stilla Technologies…

Une dynamique comparable s'observe dans les domaines de la sécurité (police, domaine militaire, sécurité alimentaire, environnement) et du monitoring (suivi en ligne de procédés), bien que les volumes de ces marchés soient plus modestes.

Le marché de la production chimique à haute valeur ajoutée, important pour l'industrie chimique, la cosmétique et la pharmacie, devrait se développer. La microfluidique répond en effet à des besoins des acteurs industriels en termes d'augmentation du rendement des procédés de production chimique, ainsi que de rapidité et de précision des analyses et des suivis de réactions.

4 – Données de *BCC Research*

Enfin, de nombreuses applications destinées au grand public devraient se développer, à horizon 2020/2025, en couplage avec le développement d'objets connectés utilisés quotidiennement, à commencer par le *smartphone*: analyse en temps réel des composants de la nourriture, détection des contaminations bactériennes, analyse des paramètres physiologiques au cours d'activités physiques, etc.

Les défis technologiques à relever

Malgré les progrès rapides accomplis dans le domaine de la microfluidique, quelques barrières freinent encore son développement. Les procédés de photolithographie, s'ils sont de plus en plus précis, restent un verrou de développement de cette technologie en termes de précision du réseau de capillaires et chambres de réaction. D'autre part, la compréhension des phénomènes survenant à l'échelle micrométrique n'est pas encore complète, notamment en ce qui concerne la maîtrise des changements de phase des fluides, ainsi que des réactions et phénomènes physiques et biochimiques. En outre, les technologies et les protocoles d'intégration d'échelle, permettant de passer d'un échantillon généralement de l'ordre du millilitre, à un échantillon pour dispositif microfluidique de l'ordre du microlitre voire du nanolitre, doivent être développées. L'échantillon doit en effet être conditionné pour être manipulable à cette échelle, et les effets de concentration anticipés. Enfin, les lab-on-chip développés aujourd'hui, s'ils sont miniaturisés, nécessitent des périphériques parfois encombrant (carte électronique, pompes etc…). Un effort de miniaturisation doit nécessairement porter sur ces périphériques pour obtenir des systèmes opérationnels basés sur les technologies microfluidiques.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

La microfluidique est une technologie prometteuse qui renferme de multiples possibilités d'applications. Cependant, son coût et sa complexité d'utilisation restent un frein à sa diffusion massive dans les secteurs industriels. Son avenir réside à la fois dans la diversité des solutions développées, et dans son accessibilité à un coût plus bas. L'enjeu primordial du développement de cette technologie est dans la conception et la commercialisation de solutions plus simples et moins coûteuses, afin de faciliter sa diffusion.

Les enjeux réglementaires

Les principaux enjeux réglementaires liés à la microfluidique concernent leurs applications dans le secteur médical. En effet, la réglementation européenne et française concernant les dispositifs médicaux évolue, et les équipementiers du dispositif médical devront s'adapter à cette évolution. Par ailleurs, à plus long terme, le couplage de la microfluidique avec des objets connectés soulèvera des questions réglementaires liées au secret médical.

En outre, les procédures nationales d'accréditation des dispositifs microfluidiques pour analyses, intégrant les problématiques d'échelle des échantillons et de seuils réglementaires, sont très lentes, particulièrement pour les dispositifs médicaux dans le domaine de la santé et dans le secteur de l'environnement. Elles constituent un handicap pour une technologie de rupture qui se développe rapidement.

Analyse AFOM

ATOUTS

Une recherche académique d'excellent niveau

Une dynamique de création de start-up

Des secteurs applicatifs sur lesquels la France est bien positionnée (chimie, santé, agroalimentaire)

FAIBLESSES

Un tissu industriel en fabrication de dispositifs microfluidiques manquant de « poids lourds », le secteur étant assez dépendant de la recherche publique

OPPORTUNITÉS

Un potentiel applicatif très important et un domaine riche d'innovations

Des synergies possibles avec les objets connectés, les biocapteurs, les logiciels…

Une pression croissante sur les dépenses de santé

MENACES

Dynamisme de la concurrence étrangère, surtout aux États-Unis et en Asie

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

- Miser sur des matériaux, procédés et technologies favorisant l'interopérabilité, afin de permettre la diffusion de cette technologie à échelle industrielle ;
- Ajuster le ciblage de l'échelle du marché et se concentrer sur des produits à très haute valeur ajoutée apportant une vraie performance aux procédés ;
- Chercher des débouchés à l'étranger, notamment dans les marchés américains et asiatiques qui sont très dynamiques, mais également les marchés des pays en développement sur des dispositifs à bas coût (diagnostic *in situ* sur papier).

Concernant les pouvoirs publics :

- Soutenir le développement d'infrastructures de production multimodales intégrant électronique, matériaux et biochimie ;
- Renforcer les programmes de formation continue pour développer les compétences humaines dans le domaine de la microfluidique.

Acteurs clés :

Organismes de recherche et de formation

Plusieurs laboratoires spécialisés dans la microfluidique existent au sein d'organismes de recherche et de formation à travers la France, comme par exemple le **laboratoire Microfluidique, MEMS, Nanostructures (MMN)** de l'Institut Pasteur, le complexe scientifique **MINATEC** à Grenoble et le laboratoire **Leti du CEA**, ou **l'Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN)** à Lille. Par ailleurs, l'IDEX /LABEX Institut Pierre Gilles de Gennes pour la Microfluidique regroupe 14 équipes de recherche affiliées à ses fondateurs : **Chimie Paris Tech, l'Institut Curie, l'École Nationale Supérieure (ENS), l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles (ESPCI).**

Start-up et PME

De nombreuses start-up et PME proposent des produits et services en microfluidique. Certaines sont positionnées sur l'instrumentation, telles que **Fluigent**, **Elvesys**, **Klearia**, **CG-Tec, Raindance Technologies**, ou sur la microencapsulation, telles que **Capsum.** D'autres proposent des services d'analyse de microenvironnements telles qu'**Alvéole**, des modèles cellulaires par exemple pour la découverte de médicaments, comme **Cytoo**, du criblage à ultra haut-débit s'appuyant sur une excellence en microfluidique comme **HiFiBio**, ou des solutions de diagnostic comme **Millidrop** ou **Stilla Technologies**.

Grands groupes

Si la France ne compte pas de grands groupes positionnés en instrumentation pour la microfluidique, plusieurs grands groupes français maîtrisent l'utilisation et soutiennent le développement de ces technologies dans différents secteurs, par exemple en santé **(bioMérieux**, **Sanofi**[5]**)**, ou en chimie **(Laboratory of the Future de Solvay)**.

Écosystème de l'innovation

Les acteurs français de la microfluidique sont soutenus par diverses structures, parmi lesquels des pôles de compétitivité (par exemple **Medicen**), des IRT (par exemple **Bioaster** sur l'infectiologie et la microbiologie), des instituts Carnot (comme le **Carnot LAAS** à Toulouse), ou encore **l'IFP Énergies Nouvelles**.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

5 – A travers une convention de mécénat signée en 2014 entre Sanofi et l'ESPCI.

18 Métaomique

Loisirs & Culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT, Habitat, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Biomarqueurs – expression génique – métabolismes – lien génotype / phénotype

© inra

Définition et périmètre

La métaomique regroupe des technologies permettant d'appréhender dans leur globalité des systèmes biologiques complexes et dynamiques. Elle permet d'étudier en quantités massives des données, telles qu'un ensemble de gènes (génomique[1]), d'ARN (transcriptomique), de protéines (protéomique[2]), de métabolites (métabolomique). La génomique, la transcriptomique et la protéomique permettent de caractériser l'expression du patrimoine génétique; la métabolomique complète l'analyse fonctionnelle, à travers l'identification et la quantification simultanées de milliers de métabolites (acides aminés, sucres, acides gras...) présents dans un échantillon biologique. L'effet de perturbations physiologiques, toxicologiques, génétiques ou nutritionnelles peut ainsi être analysé à travers l'étude des métabolites, soit parce qu'ils présentent un intérêt intrinsèque, soit parce qu'ils sont le reflet d'une activité biologique d'intérêt. Ils sont alors utilisés comme biomarqueurs : biomarqueurs de dépistage, biomarqueurs prédictifs d'efficacité, biomarqueurs de diagnostic... L'identification de biomarqueurs précoces permet d'intégrer une dimension prédictive sur les effets d'une perturbation à long terme.

La métabolomique est la technologie la plus récente parmi celles de la métaomique et la plus porteuse d'innovation. Elle permet une analyse plus poussée de l'expression des gènes et des interactions entre génome et environnement. Les principales techniques utilisées par la métabolomique sont la chromatographie liquide haute performance, la chromatographie en phase gazeuse et l'électrophorèse capillaire (méthodes de séparation), couplées à la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire ou la spectrométrie de masse (méthodes de détection). La tendance est à une investigation des données obtenues à plusieurs niveaux d'une cellule : cellule dans son ensemble, différents métabolites, fluides… et à l'intégration de ces données, de manière à appréhender les liens entre génotypes et phénotypes, ainsi que d'approfondir les interactions entre gènes et environnement.

Le principal champ d'application de la métaomique est la santé, en particulier la découverte de biomarqueurs (pour diagnostiquer et évaluer la progression des maladies), la découverte de médicaments (études de toxicologie, études précliniques, études pharmacocinétiques), et le diagnostic moléculaire. Les aires thérapeutiques les plus explorées jusqu'à présent sont celles qui correspondent à des ensembles complexes et dynamiques : l'oncologie, qui constitue le segment le plus important, suivie par les dysfonctionnements du système nerveux central et les troubles du système cardiovasculaire. A plus long terme, la métaomique ouvre la voie vers la médecine personnalisée, c'est-à-dire le choix d'un traitement particulier pour chaque patient en fonction de ses spécificités génétiques et environnementales, voire de la médecine prédictive.

La métaomique trouve également des applications dans d'autres secteurs, notamment l'alimentation (épidémiologie nutritionnelle, nutrigénomique, sécurité alimentaire ou amélioration variétale des végétaux) et l'environnement (analyse de milieux complexes).

Dans le secteur de l'alimentation, la métaomique permet des approches d'épidémiologie nutritionnelle, soit la caractérisation des consommations alimentaires individuelles. Les nouveaux outils fournis par la métaomique visent à évaluer la réponse métabolique aux régimes alimentaires, c'est-à-dire en nutrigénomique les interactions entre gènes et nutriments. Grâce à un phénotypage des métabolites de nutriments et micro-constituants après digestion, les interactions entre génotype, alimentation et métabolisme sont étudiées et mises en relation avec la prévention des maladies métaboliques ou chroniques (obésité, diabète, maladies cardiovasculaires, cancers…) Dans le domaine de la sécurité alimentaire, la métabolomique a été utilisée par exemple pour rendre compte de la qualité et de la valeur nutritive des aliments ou pour détecter l'exposition des aliments à un contaminant. À plus long terme, la métaomique ouvre les portes vers la biologie prédictive, et pourrait ainsi permettre de prédire l'évolution bactériologique des aliments et renforcer les dispositifs de sécurité alimentaire.

La métabolomique est également un outil pour analyser les perturbations des espèces végétales, issues de stress biotique ou abiotique ou de la présence de contaminants, en complément des analyses génomiques ou protéomiques. Elle permet ainsi d'évaluer la diversité dans les variétés végétales et d'analyser le comportement des variétés dans leur environnement, ou leur réaction à tel ou tel produit, et même de sélectionner des traits de résistance aux différents stress pour accélérer les processus d'améliorations variétales.

1 – Cf. fiche « Ingénierie génomique »

2 – Cf. Fiche « Protéomique », Rapport Technologies Clés 2010, DGE

© Creative Commons Attribution-Share

Enfin, dans le secteur de l'environnement, la métabolomique est une approche puissante pour découvrir des profils de biomarqueurs indiquant des réponses biologiques qui résultent d'expositions à des toxiques environnementaux. Elle peut ainsi rechercher au sein de tous les compartiments environnementaux (eau, sol, atmosphère) des marqueurs reflétant les modifications des conditions d'exposition, en lien avec les évolutions climatiques ou sociétales. Elle permet également d'identifier de nouvelles souches bactériennes, ou de suggérer des pistes pour identifier les voies métaboliques impliquées dans ces réponses, voire déterminer les mécanismes de toxicité de certaines molécules.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La métaomique, et principalement la métabolomique, est porteuse d'innovation dans tous les domaines des sciences du vivant. Elle permet une vision globale, simultanée et dynamique des phénomènes survenant au sein d'une cellule, d'un organisme ou d'un métabolisme, et ainsi d'élargir le prisme d'observation, tout en intégrant les interactions entre le génome et l'environnement. L'impact sur l'étude de phénomènes intervenant dans des systèmes complexes, en particulier les milieux comme l'air, le sol ou l'eau, ou sur des maladies multifactorielles, comme l'obésité ou le diabète Type 2, est substantiel. En outre, la métabolomique introduit une dimension prédictive dans les diagnostics à travers l'identification de marqueurs précoces, et ouvre la voie vers une médecine non plus seulement curative mais également prédictive.

Enfin, la métaomique s'applique à des domaines aux enjeux très importants : santé et découverte de nouveaux traitements médicaux, alimentation et améliorations d'espèces et variétés agricoles, environnement et préservation de la biodiversité…

Liens avec d'autres technologies clés

- **Ingénierie génomique** : le séquençage d'ADN est un des outils de base de la génomique, l'un des piliers de la métaomique ;

■ **Microfluidique** : la microfluidique est un outil utilisé en instrumentation dans les différentes technologies de la métaomique, notamment le séquençage génétique ;

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique :** ces technologies sont un outil puissant pour évaluer le comportement de métabolites dans un environnement complexe, donc par exemple la pertinence de biomarqueurs ;

■ **Procédés relatifs à la chimie verte** : la métaomique fournit des méthodes d'analyse des caractéristiques et du comportement de différentes cellules, molécules et microorganismes intervenant dans la chimie verte ;

■ **Solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux :** les technologies de la métaomique permettent d'étudier les mécanismes de défense et de croissance des plantes, ainsi que l'impact de l'environnement sur ceux-ci, et également d'identifier les molécules ou organismes stimulateurs ;

■ **Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition :** la sélection et le développement de souches de probiotiques fait intervenir des technologies de métaomique afin d'étudier les caractéristiques, la croissance et le comportement de microorganismes et de cellules dans des environnements complexes ;

■ **Valorisation et intelligence des données massives :** la métaomique génère des données en très grande quantité, que les technologies de valorisation et intelligence des données massives permettent de traiter et d'interpréter.

Les marchés

Le marché global de la métaomique recouvre toutes les applications des diverses technologies qu'elle renferme (génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique). Il s'agit d'un marché émergent bien qu'en croissance.

Le marché de la métabolomique, incluant les instruments et équipements de bioanalyse, les applications de la métabolomique et les outils bioinformatiques, est estimé à 712 millions de dollars en 2012 et un chiffre d'affaires d'1,4 milliard de dollars est attendu en 2017[3]. Les acteurs de la métabolomique sont des équipementiers tels qu'Agilent, Bruker, Thermo Fisher ou Shimadzu; l'analyse métabolomique est dominée par des leaders comme Metabolon, Biocrates Life Sciences, Metanomics Health et HMT, et des compagnies de bioinformatique telles qu'Accelrys, Chenomx, HighCHem ou nonlinear. Ces grands acteurs sont bien ancrés dans le marché, et peu de nouveaux entrants de même taille sont attendus dans les prochaines années, bien que quelques PME aient réussi à se positionner. La croissance de ce marché se fait donc surtout par le développement de nouvelles lignes de produits basés sur la métabolomique, et un nombre croissant de collaborations entre académiques et industriels (Metabohub…).

Concernant les marchés d'application, le marché global des biomarqueurs était de l'ordre de 15 milliards de dollars en 2012, et devrait atteindre environ 40 milliards de dollars à horizon 2020[4]. C'est un marché qui connaît une croissance soutenue, poussé notamment par une demande importante en diagnostics compagnons ; la métaomique, incluant génomique, transcriptomique, protéomique et métabolomique, constitue le segment le plus important de ce marché, et les avancées technologiques dans ces domaines sont un moteur essentiel de sa croissance.

Les défis technologiques à relever

La métaomique suppose des analyses à grande échelle, nécessitant des capacités technologiques variées et une expertise transdisciplinaire, pour l'analyse d'un grand nombre d'échantillons et la prise en charge du grand nombre de données générées. De nombreux outils analytiques sont nécessaires, dont certains sont coûteux et complexes à utiliser, ce qui représente un défi supplémentaire.

Concernant plus spécifiquement la métabolomique, le principal facteur limitant son développement est l'identification des métabolites. Actuellement, seuls 15 à 20 % des signaux détectés sont annotés et les métabolites correspondants identifiés par les équipements. Le principal enjeu pour son développement est donc la caractérisation et l'annotation de métabolites ainsi que de leur mécanisme d'action, qui reste en majorité assurée par la recherche académique. Des avancées considérables doivent être faites sur ce front,

3 – Données de *BCC Research*

4 – Données de *BCC Research, MarketsandMarkets, LEEM*

les bases de données actuelles de biomarqueurs étant encore très insuffisantes. L'étape suivante consistera en la validation de ces biomarqueurs, qui supposera des tests en grand nombre sur des populations variées pour évaluer leur robustesse et leur pertinence. Cette activité pourrait être assurée par des PME, dans la mesure où elle demande le traitement haut débit de milliers d'échantillons avec des méthodes d'analyse relativement simples. Cela suppose cependant que des kits d'analyse métabolomique simples soient développés par les équipementiers et commercialisés à destination des entreprises. Des compétences d'interprétation des résultats doivent également être mobilisées, le savoir-faire en analyse et traitement des données étant essentiel sur ce marché.

Par ailleurs, le manque de fiabilité et de reproductibilité des résultats sont souvent perçus comme des limites importantes au développement de la métabolomique. Très peu de données publiques sont disponibles ; le grand nombre de données générées par la technologie, ainsi que l'impact de nombreux facteurs, comme la variabilité inter-individus ou les habitudes alimentaires, sur le métabolisme, rendent l'interprétation des résultats très complexe.

Le développement et la standardisation des outils et méthodes d'analyse bioinformatiques, ainsi que la constitution de bases de données qui fait l'objet de plusieurs initiatives (projet européen EURRECA, projet ANR METAPROFILE, projet IbiSA MetabDB), devraient faciliter le traitement et l'interprétation biologique des données enregistrées. En outre, des méthodes permettant de visualiser la distribution spatiale des métabolites, ainsi que de mesurer la dynamique métabolique grâce à la fluxomique[5], se développent également et pourront apporter de nouveaux éléments d'interprétation.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le premier défi commercial consiste à communiquer autour du potentiel et de la valeur ajoutée de la métabolomique, et à éduquer les futurs utilisateurs au-delà des adopteurs précoces, notamment au sein des industriels. En effet, si la génomique, la transcriptomique et, dans une moindre mesure, la protéomique sont plus matures, la métabolomique est une technologie émergente, moins populaire et moins acceptée. Les systèmes complexes étudiés faisant intervenir de nombreux facteurs, la reproductibilité des résultats est un défi qui fait augmenter les coûts logistiques d'exploitation de la métabolomique, ce qui est perçu par les industriels comme une barrière, le retour sur investissement n'apparaissant pas toujours clairement. Les industriels font donc face à un enjeu très important de communication sur les succès et l'intérêt de la méthode, afin de développer une demande dynamique.

En second lieu, une offre variée et pertinente sur la métaomique doit être consolidée, en particulier face à une concurrence très dynamique aux États-Unis et au Japon. Pour cela, plusieurs défis doivent être relevés :

- Disposer d'une bibliothèque de métabolites annotés et validés la plus complète possible, bibliothèque qui peut être centrée sur un type de métabolite donné (lipides, biomarqueurs spécifiques…) ;
- Anticiper les difficultés liées à la propriété intellectuelle des données générées grâce à la métaomique. En effet, les industriels et les prestataires de service préfèrent souvent garder un avantage compétitif et ne pas mettre en commun les données ;
- Élargir la gamme de types d'échantillons pouvant être analysés tout en garantissant leur intégrité aux différentes étapes du processus, par exemple grâce au développement de kits de prétraitement ou d'accompagnement à la définition de protocoles expérimentaux ;
- Maintenir la compétitivité de l'offre en termes de méthodes d'analyse (séparation et détection) malgré le coût conséquent des équipements qui constitue une barrière forte pour les PME ;
- Garantir une offre bioinformatique adaptée à la quantité de données générées et permettant d'assurer l'interprétation biologique des résultats.

Les enjeux réglementaires

Le principal enjeu réglementaire pour les domaines d'application de la métabolomique consiste en l'inclusion et la définition légale de la notion de biomarqueurs. Si cette notion est bien acceptée dans le domaine de la santé, elle n'existe pas encore dans la réglementation, ce qui est problématique dans les

5 – La fluxomique est l'étude des flux de fluides et molécules à l'intérieur de cellules.

études toxicologiques et les essais cliniques dans la mesure où les nombreuses données générées n'ont pas toujours de cadre légal. En outre, la notion de biomarqueurs est encore très nouvelle en épidémiologie nutritionnelle ou dans le secteur des analyses environnementales. L'intégration des biomarqueurs dans les réglementations régissant ces domaines aiderait au développement de la métabolomique.

Dans le secteur agroalimentaire, la reconnaissance des allégations santé pour les alicaments par l'EFSA est un enjeu majeur. En effet, en l'absence de cette reconnaissance, les industriels agroalimentaires ne peuvent exploiter les résultats des recherches métabolomiques, par exemple pour des alicaments visant à prévenir la survenir de maladies métaboliques, comme l'obésité ou le diabète Type 2.

Analyse AFOM

ATOUTS

Force de recherche dynamique et structurée

Acteurs académiques d'envergure internationale

FAIBLESSES

Peu de leaders industriels sur la métaomique, notamment positionnés sur la métabolomique

OPPORTUNITÉS

Marchés applicatifs très dynamiques (biomarqueurs, sécurité alimentaire)

Technologies permettant de passer de l'analyse d'un type cellulaire à l'étude des interactions entre « individus » dans des systèmes complexes et dynamique, pouvant également regrouper différents types cellulaires

Technologies permettant d'étudier directement les impacts de l'environnement sur l'expression génique et le phénotype

MENACES

Facteur limitant de l'annotation et l'interprétation des données

Lourdeur des coûts pour les petites entreprises

Concurrence des États-Unis et du Japon, notamment sur les biomarqueurs

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

- Réunir une taille critique de compétences permettant d'adresser les différents marchés cibles, ou se positionner sur un marché spécifique avec une offre dédiée intégrant différentes technologies d'analyse ;
- Se positionner sur les nouvelles technologies associées, notamment la fluxomique ou celles permettant d'analyser la distribution spatiale des métabolites ;
- Développer des actions concertées de communication avec l'ensemble des acteurs de la métaomique sur la valeur ajoutée de ces nouvelles technologies, en particulier la métabolomique.

Concernant les pouvoirs publics :

- Privilégier les formations transdisciplinaires pour consolider les compétences humaines et la capacité à exploiter les technologies métaomiques (chimie, biologie, statistiques, bioinformatique, etc.) ;
- Favoriser une harmonisation, au niveau européen ou international, des standards des –omiques, afin de faciliter le recueil, le traitement, la qualité et le stockage des informations extraites ;
- Soutenir le développement de plateformes bioinformatiques de référence pour consolider l'expertise sur les analyses métaomiques.

Acteurs clés[6] :

Organismes de recherche

Des compétences françaises de recherche sur la métaomique sont rassemblées aussi bien dans des EPST[7] tels que le **CNRS, le CEA, l'INRA, l'Inserm,** des EPIC[8] tels que le **Cirad**, que dans des structures physiques telles que **l'Institut Pasteur** ou **le Génopole d'Evry**. Concernant plus particulièrement la métabolomique : **Metabohub** est une infrastructure nationale en métabolomique et fluxomique qui fournit des outils de technologiques et des services aux organismes de recherche et aux entreprises ; le **Réseau Français de Métabolomique et Fluxomique** (RFMF) œuvre à structurer et fédérer les communautés scientifiques francophones concernées par la métabolomique ; la **Plateforme Mallabar** (Métabolomique Appliquée à L'étude de LA Biodiversité mARine), inaugurée à Marseille début 2015, est destinée à ouvrir de nouvelles voies d'étude des organismes et environnements marins.

Start-ups et PME

Plusieurs start-ups et PME françaises sont positionnées en métaomique : services d'analyse métabolomique (tel que **Phylogene**), génomiques ou protéomiques (tels que **Hybrigenics** et **HiFiBio**), développement et commercialisation de molécules thérapeutiques (tels que **Affichem** et **Metabolys**), découverte de biomarqueurs *via* la protéomique (tel que **Biosystems International**) ou la génomique (tel que **Ipsogen**).

Grands groupes

Les grands groupes français sont absents du segment de l'instrumentation dans les différentes technologies de la métaomique. Cependant, ces technologies sont utilisées et maîtrisées par de grands acteurs français, notamment en santé, comme par exemple **bioMérieux** ou **Sanofi**.

6 – Pour les acteurs clés de la génomique, cf. fiche « Ingénierie génomique »

7 – Établissements Publics à caractère Scientifique et Technologique

8 – Établissements Publics à caractère Industriel et Commercial

Écosystème de l'innovation

Les entreprises de la métaomique sont soutenues par divers pôles de compétitivité, comme par exemple **Alsace BioValley, Medicen, Lyonbiopôle, Céréales Vallée, Axelera, IAR**, ainsi que divers instituts Carnot, tels que par exemple **Curie Cancer**.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

19 Analyse comportementale

LOISIRS & CULTURE
Énergie, Mobilité, NUMÉRIQUE
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Prédictif, préventif, analyse comportementale, tracking, signature, systèmes d'information, Big Data.

© PhotoAlto.fr

Définition et périmètre

L'analyse comportementale fait référence aux traitements logiciels visant à détecter un ou plusieurs scenarii complexes mettant en œuvre une succession d'évènements non corrélés dans le temps et l'espace et issus de capteurs/sondes hétérogènes (physiques ou logiques).

L'analyse comportementale est aujourd'hui matérialisée par une séries de briques technologiques qui peuvent être implémentées dans d'autres outils (vidéo, logiciels, etc.) et qui ont pour vocation d'alerter et de prévenir d'une (potentielle) irrégularité d'une action. En effet, il est encore difficile, voire impossible, de déterminer formellement si une action est frauduleuse ou non conforme. L'analyse comportementale est alors capable de fournir un score de fiabilité pour une action ponctuelle – scoring. Le scoring est aujourd'hui de plus en plus utilisé dans les secteurs de la sécurité, des télécommunications et des loisirs & culture.

Au travers d'outils adaptés, on est aujourd'hui en capacité d'analyser la plupart des comportements et notamment les comportements d'achats ou de consultation de publicités. Données quantitatives - temps passé en magasin ou sur un site, taux de conversion - et qualitatives - préférences des consommateurs ou parcours précis dans le magasin - sont autant de données qui représentent des éléments clés pour l'élaboration de stratégies marketing ciblées. Ces outils autour de l'analyse comportementale ont tendance à se multiplier et il y a fort à penser qu'ils seront exploités rapidement dans tous les secteurs faisant l'objet de la présente étude.

■ Sécurité

Les progrès dans les technologies de l'information et de la communication, particulièrement ceux autour de l'exploitation des Big Data, permettent aujourd'hui de développer de nouvelles applications innovantes de l'analyse comportementale qui permettent de répondre à de nouvelles problématiques, liées au domaine de la sécurité, qui regroupe plusieurs aspects : sécurité intérieure (crime et terrorisme), surveillance et maintien de l'ordre public, cybersécurité (lutte contre la fraude et l'usurpation d'identité).

À l'image du nouveau laboratoire du Pôle Judiciaire de la Gendarmerie Nationale inauguré en Mai 2015, la tendance actuelle est à la « prédictivité » et la capacité de prévoir dans le temps et l'espace les événements à risques susceptibles d'intervenir sur le territoire. De nombreuses entreprises développent aujourd'hui des applications pour analyser les comportements qui reposent essentiellement sur l'analyse et l'exploitation de données ou plus communément appelé *(Big) Data Analytics*. Cette analyse des données ouvre la voie à l'innovation des usages dans la sécurité :

■ La surveillance vidéo intelligente

Les progrès dans le traitement de signaux vidéo et d'images permettent de prévoir de potentiels comportements dangereux. À l'image de la startup française Anaxa Vida qui développe des systèmes capables de détecter des incidents (intrusion, etc.) ou des changements brutaux des comportements (mouvement de foule ou de panique par exemple).

■ Cybersécurité

La hausse de la connectivité mondiale accroît le nombre d'attaques virtuelles, comme le vol de données qui a bondi de 78 % en 2014 (1,023 milliards de données). La technique couramment utilisée est celle dite de l'hameçonnage (*phishing* en anglais) qui consiste à récupérer des informations en accédant au système d'un utilisateur (par mail, téléphone, SMS, etc.). À l'image du français ILObjects, des entreprises françaises développent des solutions autour du profilage utilisateur qui permet de prévoir le risque de fraude et d'usurpation d'identité, en analysant par exemple le comportement d'un utilisateur sur internet (mouvement de souris, vitesse de frappe au clavier). Les techniques d'analyse comportementale web d'un internaute peuvent également prendre en compte des inputs tels que son adresse IP, les sites les plus fréquentés, les heures de fréquentation etc. Cela permet notamment d'aider à cibler les comportements frauduleux (usurpation d'identité, etc.) allant jusqu'à la lutte préventive anti-terroriste.

■ Sécurité en entreprise

Au niveau de l'entreprise, les outils de GRC (Governance, Risk management & Compliance) permettent entre autres le contrôle de la conformité des actions internes à l'entreprise, qui peuvent parfois représenter une menace pour l'entreprise. Ces outils sont de plus en plus orientés vers le ciblage de comportements à risques des salariés. C'est dans ce sens que récemment, l'éditeur de logiciels Brainwave a lancé la nouvelle version de son offre IdentityGRC.

■ Sécurité des systèmes embarqués

Les systèmes embarqués sont aujourd'hui ancrés dans notre quotidien. Au-delà des dysfonctionnements liés aux défauts de conception ou de fabrication, ces systèmes sont soumis à des contraintes et interférences naturelles ou intentionnelles qui peuvent parfois perturber, voire réduire la sûreté de fonctionnement du système complet et donc perturber leur comportement. (cf. fiche « Systèmes embarqués distribués, sécurisés et sûrs »). Des moteurs d'analyse comportementaux qui surveillent et modélisent le bon fonctionnement en le comparant à un modèle comportemental – le *model-checking* – sont des techniques aujourd'hui utilisées pour la sûreté de fonctionnement des systèmes embarqués.

■ Sécurité des communications numériques

Alors que la détection de fraude sur mobile est généralement réalisée une fois que la fraude est avérée, certaines entreprises, comme la startup Fraudbuster, offrent aux opérateurs de télécoms une solution de lutte contre la fraude grâce à une analyse en temps réel du comportement des abonnés.

■ **Loisirs & culture**

Dans les industries créatives et culturelles, l'analyse comportementale se veut au service de l'expérience utilisateur À l'image de l'américain du logiciel Synapse de l'américain Razer, les logiciels d'analyse comportementale s'appliquent au niveau des jeux vidéo et permettent d'analyser (statistiques, logique de cheminement, heatmaps, etc.) les pratiques et le style de jeu de l'utilisateur et les lui diffuser afin d'améliorer leurs performances et leurs expérience. Pour les nouveaux formats transmédia qui exploitent une logique de multi-devices, tout ce qui a trait aux logs, logiques de clics, etc. est interprété pour optimiser l'expérience utilisateur en adaptant notamment le niveau de difficulté du jeu à celui de l'utilisateur.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

L'analyse comportementale ouvre la voie à de nouvelles parades en termes de sécurité de par sa capacité préventive, voire prédictive, des menaces auxquelles la société est exposée. Les enjeux sont immenses, qu'il s'agisse des coûts financiers liés aux actions curatives liées à la cybercriminalité (fraude bancaire, usurpation d'identité, vol de données…), ou des conséquences d'actes de malveillance ou de terrorisme (attentats, détérioration d'infrastructures critiques…).

Dans les secteurs du médical et industriel, l'analyse comportementale permet de développer de nouvelles techniques à l'image de l'*eye tracking* – oculométrie. Cette technique consiste en l'étude du regard et du comportement oculaire et pourrait être utilisée dans nombreuses applications : l'évaluation de l'ergonomie d'un site web, d'un logiciel, mieux comprendre le comportement d'un utilisateur face à une machine (IHM), étudier ses capacités cognitives (psychologie du développement) ou encore pour la détection de maladies oculaires (ophtalmologie). Cette technologie doit pouvoir être intégrée par davantage d'acteurs en s'appuyant sur les compétences des laboratoires concernés.

Pour ce qui est des autres secteurs (moins critiques) l'analyse comportementale permet notamment de contribuer à l'amélioration du développement marketing et commercial d'une entreprise grâce à une meilleure modélisation et compréhension de chaque client ou groupes de clients.

Pour les secteurs comme les jeux ou encore la robotique domestique, cette analyse est un plus indéniable pour développer de nouvelles expériences utilisateur.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent l'analyse comportementale sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets

Les technologies influencées par l'analyse comportementale sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets

Les technologies clés qui influencent l'analyse comportementale sont :	
6	Infrastructures de 5ème génération
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées
14	Technologies immersives
21	Supercalculateurs
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les technologies influencées par l'analyse comportementale sont :	
6	Infrastructures de 5ème génération
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées
14	Technologies immersives
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
21	Supercalculateurs
34	Authentification forte
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les marchés

Le domaine de l'analyse comportementale est jeune et très foisonnant, et ses technologies sont souvent des briques (ou fonctions) logicielles que l'on implémente dans un outil déjà existant comme, par exemple, l'analyse intelligente de flux vidéo ou des fonctions de tracking de l'internaute. La consolidation de données de marché est donc rendue complexe par cette intrication des chaînes de valeur.

Il faut néanmoins souligner que l'analyse comportementale et, de surcroît, prédictive est en lien étroit avec la valorisation de données (massives) et le marché de l'analyse prédictive de données. À ce titre, le cabinet américain MarketsandMarkets estime le marché de l'analyse prédictive à près de 5 milliards de dollars en 2018 (soit 4,4 milliards d'euros) avec un taux de croissance annuel moyen de 25,2 % entre 2013 et 2018, selon son rapport « Predictive Analytics Market (2013-2018)».

Le diagnostic des tendances (et habitudes) de consommation des individus ainsi que la prévention des comportements malveillants par analyse comportementale sont des applications aujourd'hui en développement chez les grands donneurs d'ordres (sécurité, gouvernements, e-commerce, grande distribution, internet, etc.). Le suivi comportemental en entreprise est, quant à lui, en pleine émergence et peut notamment être intégrée aux outils de GRC d'une entreprise. Évalué à 5,17 milliards de dollars en 2013, le marché global des GRC (solutions et services) pourrait atteindre 9,93 milliards de dollars en 2018, soit un taux de croissance annuel de 13,9 % sur la période[1].

Les défis technologiques à relever

Étroitement liée au Big Data et à ses 5 « V », l'innovation technologique de l'analyse comportementale repose essentiellement dans la maîtrise et la compréhension des données.

■ Maîtriser les algorithmes complexes d'apprentissage

Plus communément appelé *Machine Learning*, l'auto-apprentissage permet à un système d'apprendre en exploitant de manière intelligente les données qu'il acquiert (*data intelligence*). Ces algorithmes, qui se basent pour la plupart sur des calculs (stochastiques) complexes permettent notamment de mieux comprendre les liens cachés existant entre les données (*pattern matching*) et de modéliser ces données pour des usages telles que la prédiction de tendances et/ou de comportements. Maîtriser la data intelligence pourrait permettre de développer des nouvelles générations de logiciels (anti-virus, anti-malware, etc.) capables de détecter en amont des attaques non signées et inconnues.

1 – 2013 : *Enterprise Governance, Risk and Compliance, étude Markets&Markets*

Les anti-virus se basent sur les signatures de menaces connues et mises à jour. Cependant face au manque d'efficacité croissant de ces systèmes, le secteur prend le virage de la lutte prédictive contre les menaces inconnues. À l'image du français VirusKeeper, la nouvelle génération d'antivirus sera capable de détecter les virus et programmes malveillants basés sur des moteurs temps-réel d'analyse comportementale combinés aux scanners anti-virus traditionnels.

■ Optimiser les ressources nécessaires

Ces méthodes de calculs complexes sont rendues aujourd'hui possible grâce aux supercalculateurs qui mobilisent de fortes ressources énergétiques et computationnelles. Un des défis serait d'optimiser ces ressources de calcul (voir technologie clé « Supercalculateurs »).

■ Renforcer les capacités de perception des comportements – Perceptual Computing

Le Perceptual Computing est une approche intellectuelle qui permet la reconnaissance d'éléments dynamiques complexes : mouvements, regards, voix, etc. Ce concept technologique est aujourd'hui de plus en plus utilisé pour la détection de comportements à risques ou malveillants lors de la surveillance de foule. Le secteur des ICC est également impacté (cf. technologies clés « Technologies de conception de contenus et d'expériences » et « Technologies Immersives »), notamment dans les jeux vidéo où l'analyse comportementale permet aux agents virtuels d'interagir en conséquence de l'action de l'utilisateur humain. Grâce au Perceptual Computing, il est possible de proposer de nouvelles expériences utilisateur. Il est nécessaire d'encourager la recherche et développement autour de ces technologies au sein des laboratoires et autres pôles de compétitivité concernés. En effet peu d'acteurs français sont positionnés sur le Perceptual Computing. Nous pouvons toutefois citer Angus.Ai, une startup française qui développe des API de Perceptual Computing intégrables au niveau des entreprises : reconnaissance de texte, voix, mots, visages, etc.

Les défis commerciaux et d'usages à relever

■ Défis commerciaux

Face aux concurrents israéliens et américains, chez qui le développement de solutions d'analyse comportementale pour le domaine de la sécurité est déjà à un stade avancé, le défi commercial principal est de structurer la filière, notamment en favorisant les échanges entres les PME fournisseurs de technologies et les donneurs d'ordres, qui ont des besoins croissants en termes de cybersécurité (banques, industriels, gouvernements, etc.).

Les marchés de la grande distribution, du e-commerce et du e-tourisme ont quant à eux déjà commencé leur structuration avec l'émergence de géants qui peuvent constituer des prescripteurs ou clients incontournables des solutions d'analyse comportementale, alors que la plupart des autres marchés (banques, sécurité…) sont plus foisonnants, laissant de nombreuses opportunités commerciales aux acteurs de cette technologie clé.

■ Défis d'usages

Le principal défi d'usage est l'acceptabilité, par le grand public, de ces technologies, qu'elles soient utilisées par des acteurs publics pour garantir la sécurité des individus, ou privés, dans un même but de sécurité ou avec un objectif commercial. Cette acceptabilité se heurte à deux obstacles : la collecte massive de données que l'analyse comportementale requiert, souvent au détriment de la vie privée des utilisateurs, et la remise en cause du libre arbitre qui peut être perçue par les individus lorsque ce type de technologie est utilisé pour des recommandations aux particuliers.

Les enjeux réglementaires

© Aéroports de Paris – STROPP

Une réelle problématique d'ordre éthique se pose, car la plupart de ces observations se font à l'insu de l'usager. En effet, celui-ci est loin de se douter qu'un logiciel est en train d'analyser son comportement lorsqu'il entre dans un magasin ou lorsqu'il

regarde une vitrine, d'autant plus lorsque ces données sont issues des **signaux** ou des **informations** mobiles. La Cnil interdisant l'identification des personnes ainsi que l'enregistrement puis la sauvegarde des vidéos pour des copies, la plupart des analyses traitent les flux de données sans les conserver. Il est donc indispensable de rassurer, convaincre les usagers sur les aspects anonymes et confidentiels de ces données, sans quoi la CNIL pourrait être plus sévère quant à l'exploitation et le stockage de ces données. C'est un point central fort du Big Data et de l'analyse comportementale.

Analyse AFOM

ATOUTS

Tissu académique de haut niveau

Position de leader de la France dans les secteurs de la robotique de services et dans le jeu vidéo, clients naturels de ces technologies

Nombreuses startups

FAIBLESSES

Moins capitalisées que leurs concurrentes Nord-Américaines, les PME françaises sont moins dynamiques pour pénétrer des marchés en évolution rapide

Une implémentation qui peut être longue (quelle acceptabilité par l'usager ?)

OPPORTUNITÉS

Prise en compte par les pouvoirs publics et les entreprises des enjeux de sécurité

Les limites des antivirus actuels laissent place à une nouvelle génération d'antivirus

Développement de la silver économie et de la médecine à distance

MENACES

Positions et dynamiques des acteurs installés (États-Unis, Israël, Russie)

Utilisation actuelle agressive des technologies dans les média, qui pourrait provoquer un rejet des utilisateurs

Facteurs clés de succès et recommandations

■ Soutenir les PME et renforcer leurs échanges avec l'industrie et la recherche

■ En effet, la France dispose d'un tissu académique et de recherche d'excellence dans le domaine de l'analyse comportementale. Toutefois, peu de startups naissent de cette recherche d'excellence en France et les PME peinent à s'approprier ces technologies pour se développer.

■ Mettre en place des structures d'accompagnement et dans la recherche (R&D déportée…) et de partage des connaissances pourrait leur permettre de se développer.

■ Mettre en place des structures de soutien au développement commercial et à l'export pour faire face aux concurrents israéliens et américains.

■ Favoriser la recherche et les projets collaboratifs est également une piste à privilégier. Ces projets offrent aux différents acteurs la capacité à développer des technologies et systèmes complets à destination des grands donneurs d'ordres.

■ Se rapprocher des pôles de compétitivités permet d'amorcer un premier accès privilégié au marché, notamment pour des purs fabricants de

briques technologiques qui s'intègrent à des systèmes déjà existants.

■ Enfin, il est pertinent de souligner que l'action des SATT dans le processus de maturation des technologies issues de la recherche sera essentielle pour les startups issues de la recherche françaises.

■ Sensibiliser davantage les acteurs des loisirs et culture à la valeur ajoutée de l'analyse comportementale pour leurs applications. Ils doivent mieux valoriser ce savoir-faire vis à vis de leurs concurrents internationaux.

■ Sensibiliser les prescripteurs (médecins) et les payeurs de la santé au potentiel de ces technologies

■ Ouvrir un débat sur une utilisation vertueuse de ces technologies, afin d'en accroître l'acceptabilité par le public

À l'image du profilage web ou de la détection automatisée de comportements malveillants, l'analyse comportementale est aujourd'hui un concept qui demeure ultra technologique et qui répond essentiellement à des usages complexes et nouveaux, souvent trop éloignés du quotidien des acteurs des ICC. Outre le secteur des jeux vidéo où elle est de plus en plus utilisée, l'analyse comportementale apporterait beaucoup de valeur aux nouvelles applications issues du secteur des loisirs et culture.

Acteurs clés :

Entreprises	Angus.Ai, ARISEM (Thalès), AxBx, Brainwave, Kronosafe, Owi, Pertimm…
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX…
Instituts Carnot	INRIA, Logiciel et Systèmes Intelligents, Voir et Entendre…
Autres centres de recherches	CHART, CogLab, CRISTAL, ENSICAEN, LIGM (UPEM), LIMSI, LIP6 (UPMC)…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

20 Nouvelles intégrations matériel-logiciel

Loisirs & culture
Énergie, **MOBILITÉ**, **NUMÉRIQUE**
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, **SÉCURITÉ**
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Systèmes cyber-physiques, intégration, spécification, validation, vérification

© Fotolia

Définition et périmètre

L'intégration correspond habituellement à une phase ou une activité dans le cycle de développement d'un système ou d'un produit (projet). Cette phase est supportée par de nombreux outils, méthodologiques mais aussi technologiques et intervient (historiquement) sur la phase montante du cycle (en V) du développement d'un projet.

Ce processus d'intégration repose sur des méthodes de gestion de projet dans lesquelles chacune des briques, matérielle et logicielle, était définie (spécifications et exigences) indépendamment les unes des autres. Cette répartition résultait d'une implication (en entreprise) des départements ingénierie et conception matérielle (hardware) et ingénierie logicielle (software) bien distincts. L'intégration matériel-logiciel consiste alors au rapprochement de ces deux « mondes ». Aujourd'hui cette phase d'intégration (à la fin du cycle en V) est communément appelée Intégration, Vérification, Validation et Qualité (IVVQ).

La tendance aujourd'hui est, depuis plusieurs années, à « attaquer » cette phase IVVQ du matériel et du logiciel plus en amont, au niveau des spécifications. D'une manière générale, l'IVVQ interviendra de plus en plus à plusieurs niveaux du cycle en V. Aujourd'hui des outils comme MARTE ou AADL permettent de représenter, dès les spécifications, les systèmes matériels et logiciels afin d'évaluer rapidement les choix technologiques à faire.

Cette technologie clé abordera les nouvelles technologies et méthodes d'intégration matériel-logiciel : *Early Validation*, co-simulation et validation en continu (*system-in-the-loop, processor-in-the-loop)*, virtualisation/hypervision, *High Level Synthesis.*

L'intégration matériel-logiciel est une composante essentielle du développement des systèmes embarqués et leurs nouvelles générations – les systèmes cyber-physiques (*cyberphysical systems,* CPS) – aujourd'hui largement utilisés dans les industries de l'aéronautique, automobile, ferroviaire, de la communication numérique, etc.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Optimiser les problématiques liées à l'intégration matériel-logiciel permet, d'une manière générale, d'**améliorer le temps de mise sur le marché** (*time-to-market*, TTM) et d'**améliorer la compétitivité** des entreprises.

En effet, les phases d'intégrations sont en général complexes, chronophages et financièrement coûteuses de par les nombreuses itérations et l'intervention de beaucoup d'équipes projets. Prendre en compte l'intégration matériel-logiciel plus en amont permet de rapidement **identifier** et **rectifier** des potentiels *bugs* et défaillances qui peuvent véritablement avoir un effet boule de neige et bloquer un projet.

D'autre part, être capable de modéliser en amont le comportement final d'un système grâce à ces outils offrira un **gage de fiabilité** et de **sûreté de fonctionnement**.

En somme, miser sur les nouvelles intégrations permet d'**optimiser les coûts d'ingénierie en réduisant considérablement les coûts liées à la réingénierie** corrective d'un système, notamment pour les utilisateurs industriels de l'aéronautique, automobile, ferroviaire, communication numérique, nucléaire et défense.

Liens avec d'autres technologies clés

■ Les technologies clés qui influencent les nouvelles intégrations matériel-logiciel sont :

4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs

■ Les technologies influencées par les nouvelles intégrations matériel-logiciel sont :

5	Internet des objets
6	Infrastructure de 5ème génération
11	Intelligence artificielle
14	Technologies immersives
45	Technologies pour la propulsion

Les marchés

Les nouvelles intégrations matériel-logiciel se basent essentiellement sur un cadre méthodologique de tests, qui reposent sur des pratiques techniques : utilisation de librairies spécifiques d'un langage et d'un environnement informatique (virtuel…) donné. Il est à l'heure actuelle délicat de quantifier un marché de ces outils que l'on peut toutefois qualifier de niche.

Néanmoins, il est essentiel de citer le marché des systèmes embarqués, pour lesquelles ces méthodes et technologies d'intégration seront un véritable facteur de compétitivité pour les entreprises du secteur. Le gouvernement français estime le marché mondial de l'embarqué à 130 milliards d'euros, un taux de croissance annuel de 5 %, dont 10 milliards d'euros en France dans la synthèse du plan « Logiciels et systèmes embarqués » de 2014.

D'une manière générale, le caractère diffusant de la technologie sert l'ensemble des marchés sur lesquels cette intégration est nécessaire, des systèmes embarqués aux systèmes complexes : automobile, aéronautique, spatial, défense, ferroviaire, communications, etc. Les impacts marchés sont donc extrêmement importants et diversifiés.

Les défis technologiques à relever

■ Valider plus en amont et en continu

Modéliser – virtualiser selon le terme consacré dans le secteur – est une pratique très courante.

■ Le *hardware-in-the-loop* (HIL) permet d'intégrer dans un système de tests des composants physiques réels, dont la simulation serait coûteuse et peu représentative.

■ À l'inverse, le *software-in-the-loop* (SIL) permet d'intégrer dans une validation le modèle logiciel d'un composant.

■ *Le processor-in-the-loop* (PIL) permet de vérifier le code objet (compilé) qui sera déployé par la suite sur le système physique réel.

■ Les hyperviseurs sont des plateformes de virtualisation sur lesquels il est possible de tester et vérifier plusieurs systèmes d'exploitation simultanément sur un même système physique réel.

On parle également d'émulation du matériel afin de visualiser son comportement sur lequel on peut tester des algorithmes et codes logiciels et, de facto, valider en continu si les artefacts et modèles logiciels sont adaptés au matériel. Cela permet de s'affranchir de démonstrateurs ou prototypes coûteux qui sont confrontés au risque de ne pas fonctionner.

À titre d'exemple, la startup française Krono-Safe envisage d'ajouter des capacités d'hyperviseurs dans ces outils d'intégrations de ses systèmes d'exploitation temps-réel (RTOS).

■ *Platform based design* : réingénierie logicielle et adhérence matériel-logiciel

Pour des raisons économiques et de réduction des coûts, il arrive que des entreprises ne cherchent pas à concevoir le matériel et se le procurent dans le commerce (communément appelé « sur étagère »). Les approches pour l'intégration sont alors différentes. Ces composants matériels dits « sur étagère » ont un cycle de vie relativement court, généralement d'une dizaine d'années, au regard des produits ou systèmes finaux (un avion par exemple) dans lesquels ils seront embarqués, qui ont une durée de vie d'une quarantaine d'années. Cela entraîne des processus de migration logicielle vers de nouvelles plateformes, on parle alors de réingénierie logicielle.

Cette réingénierie (réécriture du code) peut amener à des baisses de performances et de fiabilité du logiciel et, de surcroît, un dysfonctionnement du nouveau matériel, surtout quand l'adhérence du logiciel à son matériel est importante.

Le défi sous-jacent est de limiter considérablement cette adhérence matériel-logiciel.

■ Synthèse matériel-logiciel

L'approche dite du *High-Level Synthesis* permet, à partir de spécifications fonctionnelles pures basées sur des contraintes de performances (consommations, etc.) de partitionner le matériel et le logiciel et faire la synthèse technique du système. À titre d'exemple, Thales s'est procuré des licences CatapulC (de Mentor Graphics Corp.) afin de synthétiser un système matériel-logiciel suivant un jeu de spécifications en input. Cette tendance au High-Level Synthesis est de plus en plus forte chez les industriels.

■ **Comprendre les nouvelles architectures**

Les nouvelles générations de processeurs ne sont plus de « simples » processeurs généralistes mais sont des coprocesseurs alliant CPU (processeurs central) et GPU (processeur graphique) afin d'augmenter les capacités de calcul (notamment dans les supercalculateurs). Le point bloquant de ces nouvelles architectures est que les logiciels d'aujourd'hui ne sont pas optimisés pour pleinement tirer parti de ces coprocesseurs.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les défis commerciaux relatifs à l'intégration matériel-logiciel à proprement parler sont de l'ordre de la diffusion des pratiques dans les chaînes de valeurs, des donneurs d'ordres vers les sous-traitants.

Au-delà de ces pratiques, les enjeux sont les enjeux de toutes les filières applicatives, en termes de fiabilité, de modularité ou de coût des systèmes : automobiles, trains, avions, systèmes de paiement, de communication, infrastructures numériques critiques, etc.

Les enjeux réglementaires

Le cadre normatif de développement des systèmes embarqués est déjà bien en place et respecté, qu'il s'agisse de standard de développement matériel, logiciel, d'intégration ou de sûreté de fonctionnement, composantes critiques des systèmes intelligents des transports, à l'aube du transport autonome. La certification d'un système avoisine en moyenne 70 % du coût total du développement du système, il est donc crucial de prendre en compte les nouvelles intégrations dans ces normes et standards.

Analyse AFOM

ATOUTS

Recherche française dynamique.

Quelques PME à la pointe : Kronosafe par exemple, TrustinSoft, Prove & Run, IS2T

Les grands intégrateurs et donneurs d'ordres français intègrent déjà ces questionnements.

FAIBLESSES

Faible implication des PME françaises sur ces méthodes

OPPORTUNITÉS

Traction du marché pour des solutions types Kronosafe, hypervision

MENACES

Les entreprises américaines sont les véritables orchestres du secteur.

Facteurs clés de succès et recommandations

■ À court terme : développement de plateformes de recherche technologique

Mettre en place des programmes de subvention R&D pour le développement de plateformes R&T amont des nouvelles intégrations matériel-logiciel, notamment à destination des IRT, comme SystemX, qui entre autres se penchent sur ces problématiques. Ces plateformes pourraient par exemple jouer, simuler, émuler des scenarii auxquels seraient confrontés les systèmes cyber-physiques de demain.

■ À long terme : besoin important en formation

Confronter nos futurs jeunes ingénieurs en systèmes embarqués et logiciels aux réelles problématiques liées à l'intégration des deux briques ne va pas au-delà de l'aspect théorique et des quelques travaux pratiques qu'ils réalisent dans le cadre de leurs études. Développer des plateformes académiques collaboratives de recherche où les étudiants seraient confrontés à ces problématiques d'intégration pourrait être une des clés du succès.

■ Renforcer notre tissu d'entreprises innovantes

Face à des acteurs américains qui orchestrent le secteur, il faut que les entreprises de demain prennent des risques, à l'image de Krono-Safe qui exploite et développe ces nouvelles méthodes d'intégration dans ces systèmes.

Acteurs clés :

Entreprises	Airbus, Alcatel-Lucent, Altran, Alten, AKKA, Continental, Dassault Systemes, Kronosafe, PSA Peugeot Citroën, Renault Technocentre, Safran, Segula, Thales Communications & Security, Thales Research and Technology, Valéo, Viotech, Zodiac Aerospace…
IRT, ITE, IHU	IRT Saint-Exupéry, SystemX…
Instituts Carnot	CEA LIST, INRIA, Logiciel et Systèmes Intelligents, ONERA…
Autres centres de recherches	CentraleSupelec, Ecsel (Artemis - Programme Européen), ESIEE, IRSEEM, LIP6 (UPMC), LSV, Plateforme de la filière automobile, Sogeti High Tech…
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, Astech, IDforCAR, I-Trans, LUTB, Pegase, Véhicule du futur, SCS, Systematic, TES…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

21 Supercalculateurs

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, **NUMÉRIQUE**
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, **SÉCURITÉ**
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Supercalculateurs, superordinateurs, calcul intensif, calcul distribué, calcul réparti, calcul parallèle, calcul vectoriel GPU, flops, High Performance Computing, HPC, modélisation de données complexes, simulation haute performance, Énergie, Environnement, Santé

© CEA P. Stroppa

Définition et périmètre

Un supercalculateur (ou superordinateur) est un système conçu pour atteindre des performances de calcul ultra-élevées et ultra-rapides (on parle alors de calcul intensif) de grandes masses de données. L'unité de calcul est exprimée en flop, qui désigne le « nombre d'opérations à virgules flottantes par seconde » et qui est une unité de mesure commune de la puissance d'un système informatique. Les deux applications principales des supercalculateurs sont d'une part le Calcul Haute Performance (CHP, High Performance Computing en anglais), et d'autre part l'analyse des données complexes, qui est de plus en plus répandue dans de nombreux segments.

Les supercalculateurs sont basés sur plusieurs types d'architectures : la grille de calcul (ou calcul réparti) qui consiste à mobiliser dans un environnement virtuel un ensemble de ressources informatiques partagées/distribuées (association de plusieurs milliers de PC domestiques – projet Seti@home), et le calcul en parallèle qui consiste à distribuer plusieurs segments d'une équation complexe sur plusieurs processeurs afin de les calculer simultanément. Une capacité ultra élevée de calcul nécessite également une capacité ultra élevée de stockage, qui, à l'heure actuelle atteint déjà plusieurs pétaoctets (million de milliards d'octets).

Le supercalculateur se déploie dans deux domaines principaux, domaines pour lesquels la technologie est développée initialement :

- Sécurité
  - Sécurité des données

Fortement liée à l'analyse comportementale, l'authentification forte et la valorisation de données massives, le calcul intensif trouve également des applications dans le secteur de la sécurité. Notre quotidien est de plus en plus « virtualisé », paiement, identification et authentification par *smartphone*, ou la reconstitution du profil comportemental d'un individu qui par exemple exigent une capacité de calcul conséquente dans le but de valider ou non une action.

  - Risques industriels

La simulation numérique du fonctionnement d'une arme nucléaire peut être réalisée à l'aide d'un supercalculateur. Cela permet d'arrêter les essais et, de ce fait, de s'affranchir de la conception de prototypes expérimentaux « à usage unique » qui, in fine, engendraient des coûts de prototypages conséquents et des externalités négatives. Le Tera-100, installé au très grand centre de calcul (TGCC) du CEA, dispose d'une puissance de calcul d'1 pétaflop (1 million de milliards d'opérations par secondes), permet de disposer de moyens de simulation nécessaires à la conception et à la garantie des armes nucléaires sans essais[1].

- Numérique

Les acteurs des télécoms et de l'internet comme les GAFA (Google, Apple, Facebook et Amazon) sont amenés quotidiennement à gérer une quantité gigantesque de données. Fortement en lien avec le Cloud et le Big Data dans leurs grands *datacenters*, le calcul intensif trouve sa place dans le traitement de ces données massives. À ce titre, on voit aujourd'hui l'explosion du Deep Learning ou de méthodes de calcul par intelligence artificielle qui s'appuient sur de nouvelles architectures où les GPU (Graphical Process Unit) prennent de plus en plus le pas sur les CPU (Central Process Units). Les supercalculateurs offrent également la possibilité d'élargir le champ du *software as a service* (Logiciel en tant que Service ou SaaS).

Cette technologie trouve également des applications dans les domaines :

- Environnement

Le réchauffement climatique est depuis plus de dix ans devenu une préoccupation internationale. La capacité de prévoir et d'anticiper les évolutions météorologiques devient alors un enjeu de poids et devient possible par l'acquisition, la simulation et la modélisation d'une quantité massive et complexe de données météorologiques et climatiques.

À ce titre, Météo-France s'est équipé de deux supercalculateurs, fabriqués par le français Bull, en janvier 2014, ce qui lui permet de multiplier sa capacité de calcul total par 12 et d'atteindre une puissance crête de 1 pétaflops.

Les supercalculateurs seront notamment utilisés pour vérifier la qualité des informations envoyées par le satellite SWOT, qui sera mis en orbite en 2020 pour des applications liées à l'océanographie.[2]

1 – Le calcul haute performance au CEA "http://www-hpc.cea.fr"

2 – BARNIER B., 9 Juin 2015 : « Supercalculateurs : la course à la puissance », Les Échos.

■ Habitat

Le BIM (Building Information Modeling) est une technique de modélisation d'un bâtiment par maquettage numérique. Au-delà de la maquette 3D classique, le BIM peut s'apparenter à une plateforme de développement collaborative entre les différents acteurs d'un projet du bâtiment, pouvant aller jusqu'à l'échelle d'un quartier, voire d'une ville entière.

La grande flexibilité offerte à ses utilisateurs (ajout de données au fur et à mesure du projet, retraitement des informations, ajout de la dimension temporelle) réside dans une capacité de calcul élevée qui peut être fournie par un supercalculateur.

■ Santé et bien-être

Le génome est l'ensemble du matériel génétique codé dans l'ADN et les chromosomes et son étude est cruciale dans notre société (cf. technologies clé « Ingénierie Génomique »). Le séquençage du génome requiert aujourd'hui une exploitation et un stockage de quantités massives de données génétiques. Le français Bull a équipé le Centre National de l'Analyse Génomique de Barcelone d'un supercalculateur doté de 1 200 cœurs de calculs (soit 800 Giga bases/jour) et de 2,7 pétaoctets de stockage.

Lancé fin 2013 par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne et en collaboration avec 22 pays européens, le projet scientifique Humain Brain Project vise d'ici environ 10 ans (2024) à modéliser et simuler informatiquement le fonctionnement du cerveau humain et ses milliards de neurones. Le coût du projet est estimé à 1,2 Md€ sur 10 ans. La plateforme High Performance Computing dédiée au projet cumule près de 10 pétaflops de capacité de calcul, ce qui permet notamment la simulation de modèles cellulaires de plus de 100 millions de neurones.

■ Énergie

L'approvisionnement en énergie demeure un enjeu de taille. Le contexte sur les ressources énergétiques naturelles pousse les pouvoirs publics ainsi que les entreprises à optimiser l'exploitation des ressources énergétiques. Les supercalculateurs s'imposent également comme une solution fiable pour des applications autour de l'énergie. À ce titre, Total s'est doté d'un nouveau supercalculateur - Pangea – (conçu par la Silicon Graphics International pour 60 millions d'euros) afin d'analyser un grand nombre de données géologiques ou sismiques et simuler l'efficacité de la production de réservoirs d'hydrocarbures. Inauguré en mars 2013, ce supercalculateur est 15 fois plus puissant que son prédécesseur : il dispose d'une puissance de calcul de 2,3 pétaflops avec une capacité de stockage de 7 pétaoctets. Le groupe pétrolier français envisage d'utiliser les futurs supercalculateurs dits « exaflopiques » pour la modélisation encore plus précise et plus complexe des réservoirs pétroliers.

D'autres applications existent dans le domaine de l'énergie :

— Identification de gisements de pétrole et de gaz (CGG aligne, en cumulé, près de 12 pétaflops crête de capacité de calcul)

— Simulation des réacteurs nucléaires (EDF…)

— Étude des écoulements autour des pâles d'éoliennes

— Modélisation des fluides complexes

— …

■ Mobilité

Couplée à des algorithmes complexes d'intelligence artificielle, la modélisation et la prédiction du trafic routier pourraient être des applications possibles des supercalculateurs. La modélisation de la déformation d'un véhicule lors des essais en crash tests, la modélisation aérodynamique et acoustique relèvent également du calcul intensif.

■ Loisirs & culture

— Industrie cinématographique

Les applications des supercalculateurs concernent entre autres la conception pour les acteurs du cinéma des logiciels de calcul d'images 3D (qualité et réalisme des images ; énormes quantités de données à traiter, transférer, stocker, protéger) et la modélisation de scènes réelles à partir d'une très grande quantité de vues 2D.

— Industrie des jeux vidéo

Les jeux massivement multi-joueurs nécessitent de plus en plus de puissance de calcul compte tenu de contraintes de cohérence et de temps réel. Les problématiques concernent les exigences toujours accrues dans la qualité et le réalisme des images, la simulation du monde virtuel calculée pour tous les joueurs en temps réel et de façon cohérente, la gestion de

l'interaction avec le joueur, l'adaptation dynamique du contenu visuel et sonore et la connexion avec les serveurs de distribution dans le réseau.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les supercalculateurs sont considérés comme un réel levier pour la compétitivité des entreprises de par leur capacité à résoudre les équations les plus complexes dans les domaines des sciences, de l'ingénierie, de l'industrie et de l'économie. Ce constat se voit renforcé par la convergence des technologies du calcul intensif et du Big Data pour l'analyse de données massives.

■ Permet de réduire les coûts et la durée des calculs

Pour le secteur de la génomique, l'expansion de supercalculateurs de plus en plus performants dans ce domaine a permis de considérablement réduire les coûts et la durée du séquençage. En effet pour 100 M$ en 2001, le coût du séquençage génomique est de 10 M$ en 2007 et décroît entre 5 000 et 10 000 dollars en 2014.

L'architecture parallèle des supercalculateurs offre de sérieux avantages concurrentiels. La simulation (écoulement de l'air le long de la coque et des ailes, ainsi que le comportement des matériaux) du Falcon 7X de Dassault Aviation afin d'améliorer l'aérodynamisme, optimiser la consommation de carburant et la manœuvrabilité de l'avion, a représenté « seulement » 200 heures (soit 8 jours) de calcul pour 140 millions d'équations réparties sur 1 000 processeurs parallèles. Ce même calcul aurait pris 1000 fois plus de temps sans ce type d'architecture (soit 22 ans). Cette simulation a été réalisée avec le Tera 10 du CEA.

■ Permet une expansion du SaaS comme modèle d'exploitation logicielle

Les supercalculateurs peuvent résoudre des millions d'équations à la seconde. Ces performances sont un levier de poids pour l'expansion du modèle d'exploitation de logiciel sous forme d'un service déporté (SaaS). Fortement lié au Cloud Computing et au Big Data, les SaaS sont aujourd'hui principalement utilisés par des PME en France et amenés à se démocratiser d'avantage.

Les domaines de l'*infrastructure as a service* (IaaS) et du *platform as a service* (PaaS) profiteront également des progrès liés au calcul intensif, au Big Data et au Cloud.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les supercalculateurs sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
11	Intelligence artificielle
13	Communication sécurisée
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
46	Nanoélectronique

Les technologies influencées par les supercalculateurs sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
11	Intelligence artificielle
13	Communication sécurisée
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
46	Nanoélectronique

Les marchés

■ Pays leaders

Le cabinet IDC estime le marché des supercalculateurs en 2012 à 10,3 Md$. *Market Search Media* et prévoit qu'il pourrait atteindre 44 Md$ d'ici à 2020.

En 2014, la France figurait dans le top 10 du marché des calculateurs, tant en nombre (30), soit 5,9 % de part de marché, qu'en termes de puissance de calcul (14 pétaflops cumulés et 17 pétaflops crête) (4,9 %). Les États-Unis sont les leaders mondiaux de ces deux classements avec 231 supercalculateurs recensés (45,5 % de parts de marché) avec une puissance cumulée de calcul de 136 pétaflops (43,6 %) jusqu'à 195 pétaflops crête, suivis par la Chine avec 61 supercalculateurs (12 % de parts de marchés) avec une puissance de calcul cumulée de 52 pétaflops (16,6 %) jusque 99 pétaflops crête. Le Japon et le Royaume-Uni et l'Allemagne précèdent la France dans ce top 10.

Toutefois, c'est la Chine qui possède le calculateur le plus performant au monde depuis 2013 : Tianhe-2 et ses 33 pétaflops (55 pétaflops crête).

■ La chaîne de valeur

Il existe 3 acteurs prédominants dans le secteur des supercalculateurs : HP, IBM et Cray. Par ailleurs, les fabricants de composants (processeurs, coprocesseurs, mémoire, etc.) jouent un rôle clé. NVIDIA et Intel sont les deux grands leaders du domaine et capitalisent à eux deux 70 à 80 % du marché. Atos, qui a racheté Bull en 2014, est le dernier acteur en Europe capable de concevoir des supercalculateurs à l'état de l'art mondial.

Figure 1 : Part des marchés des fabricants de supercalculateurs en 2014 (en %)[3]

Figure 2 : Répartition de l'utilisation des supercalculateurs par segments d'application (en %)[4]

3 – Statistics top 500 Supercomputing sites <top500.org>

4 – Statistics top 500 Supercomputing sites <top500.org>

Les défis technologiques à relever

■ La consommation énergétique

La consommation d'énergie est un verrou important et représente un enjeu crucial pour les développements futurs. Pangea, le supercalculateur de Total, avec une capacité de calcul de 2,3 pétaflops nécessite une puissance électrique de 2,8 MW soit la consommation d'une ville de 20 000 habitants pour le calcul et pour être refroidi.

C'est dans ce sens qu'en septembre 2014 l'Université Joseph Fourier à Grenoble s'est dotée d'un supercalculateur refroidi à l'eau tiède, Froggy[5], à destination de ses chercheurs via le mésocentre de calcul CIMENT (Calcul Intensif Modélisation Expérimentation Numérique et Technologique) et le MaiMoSiNE (Maison de la Modélisation et de la Simulation, Nanoscience et Environnement). Un circuit de refroidissement primaire fait circuler un liquide à l'intérieur de plaques en contact avec les composants et lames de calcul (processeurs, mémoire, disques durs). Un circuit de refroidissement secondaire permet d'échanger la chaleur de chaque composant où l'eau circule à une température maximale de 30°C.

Le cluster OCCIGEN de Bull installé au grand équipement national de calcul intensif (Genci) d'une puissance de calcul de 2,1 pétaflops sera également refroidi par de l'eau non réfrigérée, qui lui permet de maintenir un PUE[6] (indicateur d'efficacité énergétique) de 1,1, la moyenne européenne étant autour de 2,6.

Enfin, le projet européen Mont Blanc, lancé en 2011 et qui réunit des acteurs espagnols (Barcelona Supercomputing Center), français (CNRS, Bull, CEA, Université de Montpellier et de Grenoble) ou encore du Royaume-Uni (ARM Limited) se penche sur l'amélioration du rendement énergétique des futurs supercalculateurs exaflopiques en basant leur fabrication à partir de composants (processeurs) de *smartphone* à très bas coûts, notamment en combinant le Cortex-A15 d'ARM, conçu pour fonctionner sur de petites batteries, avec un GPU. Ce projet est financé par la communauté européenne à hauteur de 22 M€ jusqu'en septembre 2016.

■ Nouvelles architectures : la course à l'exaflop.

Qu'il s'agisse d'Atos/Bull, IBM ou Cray Inc., les ambitions exaflopiques n'ont jamais été aussi fortes. À ce titre, Atos s'est fixé deux jalons dans cette quête : livrer des machines 30 fois plus puissantes en 2015-2016 (30 pétaflops) et encore à nouveau 30 fois plus puissantes en 2020 (900/1 000 pétaflops).

Le DoE (*Department of Energy*) américain a annoncé fin 2014 qu'il investirait 325 M$ d'ici à 2017 pour le développement de deux supercalculateurs afin d'atteindre des capacités de calcul de 150 et 300 pétaflops, soit 5 à 10 fois plus puissants que les supercalculateurs les plus puissants actuels. Ces derniers serviront à la simulation d'armes nucléaires. Leur clé pour réussir ce défi est le recours à la technologie NVLink, qui est l'interface d'interconnexion permettent aux GPU et aux CPU d'échanger des données 5 à 12 fois plus rapidement qu'aujourd'hui. Ces supercalculateurs seront également conçus suivant l'architecture des nouvelles générations de GPU NVIDIA Volta où les modules mémoires seront empilés et placés sur la même couche de silicone que le cœur du GPU.

■ Nouveaux algorithmes : vers l'intelligence artificielle.

Andrew Ng, le responsable scientifique du moteur de recherche Baidu (équivalent de Google en Chine) déclare dans le cadre du EmTech MIT de 2014 « *Whoever wins AI, wins the Internet* » (celui qui maîtrise l'intelligence artificielle, maîtrisera Internet). Étroitement lié avec la technologie dite de Big Data, l'intelligence artificielle permettrait d'améliorer les capacités à structurer des grandes quantités de données, qui sont notamment recueillies et traitées dans les datacenters opérés par des supercalculateurs. La tendance est au développement des algorithmes de Deep Learning, basée sur le réseau de neurones (cf. fiche technologie clé « intelligence artificielle »).

5 – CNRS 2014 <http://ecoinfo.cnrs.fr/article335.html>

6 – Power Usage Effectiveness : rapport entre la puissance consommée du datacenter et celui du cluster seul

■ Vers des supercalculateurs quantiques ?

Dans le cadre d'un projet de recherche, Google et la NASA ont ouvert en 2012 un laboratoire avec pour objectif d'étudier l'informatique quantique et l'intelligence artificielle. Ce nouveau laboratoire, baptisé « Quantum Artificial Intelligence Lab » est installé au sein de l'unité NASA Advanced Supercomputing et est équipé d'un ordinateur quantique, D-Wave Two, de l'entreprise canadienne D-Wave Systems. La particularité de cet ordinateur est qu'il est équipé d'un processeur quantique qui traite des « qubits » ou « quantum bit » : contrairement à un bit « classique », sa valeur n'est ni 0 ni 1 mais les 2 à la fois.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Qu'il s'agisse de fournisseurs de technologies comme NVIDIA ou Intel, ou de fabricants comme Atos/Bull, HP ou IBM, les acteurs majeurs ont aujourd'hui une forte assise sur le secteur et se positionnent quasiment comme les décideurs des évolutions technologiques. Cela peut influencer certaines entreprises, principalement des PME et ETI à revoir leurs modèles économiques afin d'échanger commercialement avec ces mastodontes du secteur.

La réussite pourrait résider dans la maîtrise complète de la chaîne de valeur. La Chine se lance sur ce défi et souhaite avoir la capacité de développer elle-même ses composants jusqu'ici développés par les américains NVIDIA, Intel et AMD et avoir également la capacité d'intégration comme IBM ou Atos.

« IBM a revendu l'année dernière au chinois Lenovo sa division de serveurs à base de processeurs à architecture Intel et AMD. Big Blue sort ainsi du plus gros segment des superordinateurs au profit du chinois Lenovo qui, à son tour, pourrait alors débarquer très rapidement et très violemment sur le marché »[7].

Les enjeux réglementaires

Les données qui circulent dans les calculateurs sont parfois critiques au niveau gouvernemental et force les gouvernements à établir des restrictions à l'export, comme Nvidia et Intel qui se voient interdits de fournir des puces et composants destinés aux supercalculateurs chinois qui seraient, selon le gouvernement américain, utilisés pour développer des technologies nucléaires et militaires.

Analyse AFOM

ATOUTS

La France fait partie des 5 leaders mondiaux avec Atos

La maîtrise des technologies des supercalculateurs est soutenue dans le cadre du développement de la solution « Économie des données » de l'Industrie du Futur.

FAIBLESSES

Atos détient une faible part de marché (3,6 %) face à HP et IBM

Aucun français parmi les fournisseurs de technologies de composants, comme NVIDIA ou Intel

OPPORTUNITÉS

Déploiement international de la marque Bull grâce à son intégration dans le groupe Atos

L'ambition exaflopique d'Atos

Les marchés applicatifs sont porteurs : simulation, calcul intensif et Big Data

MENACES

Les industriels extra-européens bénéficient d'aides importantes accordées par leurs États.

Les États-Unis et la Chine avancent plus vite, et débloquent beaucoup de fonds pour le développement des futurs supercalculateurs

7 – VANNIER P., 01 Mai 2015 : « Pourquoi la France doit rester dans la course des supercalculateurs », La Tribune.

Facteurs clés de succès et recommandations

Le soutien d'une offre technologique européenne de supercalculateurs, rivalisant avec les offres extra-européennes, permettra de maintenir la France dans le top 5 de ce secteur. Ce soutien est déjà amorcé grâce au « contractual public private partnership » (CPPP) dans le cadre du programme Horizon 2020 de la Commission Européenne et grâce à l'action « Calcul Intensif » dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA) ou encore avec la solution « Économie des données » de l'Industrie du Futur qui identifie les supercalculateurs comme une technologie stratégique, notamment au titre de ses applications dans le Big Data.

Acteurs clés

Entreprises	Atos – Bull, Centre National de Recherches Météorologiques, Dassault Aviation, EDF, Teratec, Total…
Instituts Carnot	INRIA
Autres centres de recherches	Ex@tech – Exascal, LIX - Ecole Polytechnique, PRISM, Très Grand Centre de Calcul – CEA, Université de Montpellier - Centre HPC@LR...
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, Systematic…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	FPDC, GdR Robotique, Genci, SYMOP, SYROBO…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

22 Réseaux électriques intelligents

Loisirs & culture
ÉNERGIE, **MOBILITÉ**, **NUMÉRIQUE**
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Smart-grids ; réseaux électriques intelligents.

Définition et périmètre

« Évolution possible de l'architecture et des fonctionnalités pour les réseaux électriques de demain »
(source : Feuille de route sur les réseaux et systèmes électriques intelligents intégrant les énergies renouvelables, ADEME, 2011)

Un réseau électrique intelligent (REI) est un système électrique capable d'intégrer de manière plus efficace les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs afin de maintenir une fourniture d'électricité durable, économique et sécurisée. Les technologies associées s'articulent autour des éléments suivants :

- un réseau de transport et de distribution d'électricité comportant notamment des équipements (sous-stations, réseaux de capteurs) permettant la communication entre les parties prenantes du système (producteurs-distributeurs-consommateurs) et l'ensemble des systèmes de contrôle pour optimiser la gestion de la distribution, ajuster la production et prévenir les dysfonctionnements du réseau ;
- des compteurs électriques installés chez les consommateurs et capables d'échanger avec le réseau en temps réel afin de mieux maîtriser la demande, de lisser les pics de consommation et d'effectuer des relevés à distance ;
- des systèmes de production et de stockage de l'énergie en partie décentralisés, et permettant par exemple des flux bidirectionnels d'électricité vers un réseau de stations de rechargement de véhicules électriques.

« Quartier à énergie positive »
(Source : Feuille de route sur les réseaux et systèmes électriques intelligents intégrant les énergies renouvelables, ADEME, 2011)

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les réseaux électriques intelligents apportent des réponses à deux évolutions majeures.

La première concerne les usages en matière de consommation d'électricité, en croissance continue (climatisation, appareils électroniques, etc.) ; cette tendance devrait être amplifiée par l'apparition de nouveaux usages tels que la recharge de véhicules électriques.

La seconde se situe au niveau de la production d'électricité. La multiplication prévue des installations exploitant des sources d'énergie renouvelables complexifie les profils de production électrique.

Les réseaux électriques publics actuels n'ont pas été conçus pour de tels usages et des productions d'électricité intermittentes. La modernisation des outils et de la gestion des réseaux est essentielle, le seul renforcement des infrastructures n'étant pas suffisant.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les Réseaux électriques intelligents sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération
25	Technologies de l'hydrogène
42	Solaire photovoltaïque
43	Energies éoliennes

Il n'y a pas de technologies influencées par les Réseaux électriques intelligents

Les marchés

Au niveau mondial, l'investissement global dans les réseaux électriques intelligents s'est élevé à 14,9 milliards de dollars en 2013, soit 5 % de plus qu'en 2012[1]. Le chiffre d'affaires global de ce secteur a été de 44,1 milliards de dollars en 2014 et devrait atteindre 70,2 milliards de dollars en 2023[2]. La Chine est passée devant les États-Unis du point de vue des investissements dans les technologies pour réseaux électriques intelligents en 2014.

Le marché des REI peut être séparé en trois segments : les applications pour le client, les compteurs communicants et l'infrastructure associée, et les applications réseau.

Des plans de déploiement de compteurs communicants sont annoncés pour les prochaines années : 360 millions en Chine d'ici 2030, 240 millions en Europe d'ici 2020, 130 millions en Inde, 63 millions au Brésil, 60 millions aux États-Unis et 24 millions en Corée du Sud. L'analyse des données pourrait représenter à elle seule un marché de 4,1 milliards de dollars d'ici 2015. Avec l'accélération du déploiement des compteurs intelligents, la taille de ce marché pourrait être multipliée par 10 d'ici 2020[3].

Le marché français cumulé des compteurs communicants électriques (Linky) et à gaz (Gazpar) devrait atteindre 6 milliards d'euros d'ici 2022[4]. Les années 2014 et 2015 marquent un tournant avec l'arrivée à maturité de l'effacement et des compteurs communicants.

Les défis technologiques à relever

Le besoin d'intégrer des technologies très diverses est la plus grande barrière dans le développement et le déploiement des REI.

Microgrid Il s'agit d'un système énergétique îloté, qui permet à un bâtiment ou à un quartier de s'approvisionner en électricité de façon autonome, tout en étant connecté au réseau général. Il se compose de sources d'énergie, d'un réseau local, d'outils de pilotage et de moyens de stockage de l'énergie. Ses applications et son dimensionnement sont variés, allant de la recharge d'une flotte de véhicules électriques à l'alimentation d'habitations dans des régions isolées. Il peut s'agir de réseaux de courant à basse tension ou à courant continu conçus de manière à minimiser les pertes d'énergies.

Les technologies de réseau Il s'agit des matériels et des systèmes électrotechniques, dont les équipements à base d'électronique de puissance de type FACTS

1 – Source : Agence Internationale de l'Energie.

2 – Source : Navigant Research, 2014.

3 – Source : SmartGrids France, ITEMS International – nov. 2012.

4 – Source : Greenunivers – rapport CleanTech 2015.

(« Flexible AC Transmission Systems »), qui doivent être adaptés aux évolutions de l'architecture des réseaux et à l'insertion des sources de production décentralisées. Ces systèmes sont une brique de base des REI et permettent notamment de minimiser les pertes sur le réseau.

Les systèmes d'information Ils concernent les outils utilisés pour la gestion du réseau électrique et sont par conséquent au centre de la gestion intelligente. L'augmentation de la quantité et de la diversité des informations reçues implique le développement d'outils de gestion capables non seulement de piloter le réseau mais aussi de pouvoir fournir de nouveaux services.

Les technologies de stockage centralisé et décentralisé L'équilibre entre la demande et l'offre est largement réalisé en ajustant l'énergie produite par le biais de générateurs pilotables (hydraulique, à combustion, etc.) possédant leurs propres réserves d'énergie sous forme d'eau ou de combustibles. Néanmoins, l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix de production implique le développement de technologies adaptées pour le stockage. L'hydrogène et les batteries en sont des exemples.

La sécurité des réseaux et systèmes électriques intelligents Il est nécessaire de développer et de standardiser une approche « prêt-à-l'emploi » pour améliorer la sécurité dans les réseaux et aux points d'acheminement. Ce type de mesure est nécessaire pour la protection des lignes électriques et des points de distribution ainsi que des informations transmises à travers les réseaux.

Le réseau de communication à haut débit L'implémentation d'une bande de communication haut débit permettra le développement à l'échelle du réseau des mesures en temps réel.

Les capteurs Ils jouent un rôle central dans le développement des REI. Des réseaux de capteurs bas coût sont par exemple nécessaires pour détecter des anomalies et des dégradations sur le matériel et la production.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les réseaux électriques intelligents vont faire naître de nouveaux services pour les consommateurs. Leur adoption par ces derniers dépendra fortement de leur valeur ajoutée et de la répartition de leur coût, compte tenu de la fragmentation de la chaîne de valeur. La question de la gestion des données des consommateurs est hautement sensible.

Les différences dans les standards et les configurations des réseaux électriques entre les pays constituent le principal défi commercial à l'exportation des technologies développées au niveau national.

Les enjeux réglementaires

La directive européenne 2009/72/EC impose à tous les membres de l'Union Européenne d'avoir terminé le déploiement de leurs compteurs intelligents en 2022.

Le mécanisme de capacité, prévu par la loi NOME et instauré par le décret n° 2012-1405 du 14 décembre 2012, devrait contribuer à assurer la sécurité d'approvisionnement du système électrique à long terme. Il vise, entre autre, à donner un espace économique aux outils de gestion de la pointe de consommation, notamment l'effacement.

Depuis 2015, les fournisseurs d'électricité ont l'obligation de démontrer chaque année leur capacité à couvrir la consommation de leurs clients. Cette obligation est encadrée par RTE par le biais d'un certificat. Les capacités de production d'appoint et principalement les capacités d'effacement y sont mises en avant.

Le développement à l'international des technologies pour les réseaux intelligents sera facilité par la normalisation des protocoles associés à la mise en œuvre des réseaux intelligents. Les organismes de normalisation de l'industrie des technologies de l'information et de la communication et des autres filières associées comme l'automobile pour le véhicule électrique, doivent en être les acteurs centraux.

© Nexans

Analyse AFOM

ATOUTS

Expertise française reconnue dans la conception de réseaux électriques et de communication

Présence d'acteurs sur toute la chaîne de valeur

Rôle moteur de plusieurs industriels majeurs

FAIBLESSES

Concurrence entre acteurs nationaux

OPPORTUNITÉS

Soutien affirmé au niveau européen

Projets démonstrateurs à différentes échelles territoriales

Nécessité d'accompagner le développement des énergies renouvelables et des véhicules électriques

MENACES

Incertitudes sur les niveaux d'investissement qui seront nécessaires

Protection des données perçue comme insuffisante

Entrée sur le marché d'acteurs internationaux du secteur des TIC

Facteurs clés de succès et recommandations

Dans son rapport « Energy Technology Perspectives » de 2015, l'Agence Internationale de l'Énergie a formulé trois recommandations :

- une réglementation permettant des investissements rentables sur les technologies de réseaux de distribution avancés sont nécessaires pour soutenir le développement du marché ;
- des mécanismes de marché sont nécessaires pour garantir que les consommateurs et les fournisseurs partagent le coût et les bénéfices du réseau intelligent ;
- des standards internationaux sont nécessaires pour accélérer la recherche et le développement.

Acteurs clés :

Entreprises	Actility, Alcatel-Lucent, Alstom Grid, Artelia, Cofely Ineo, Direct Energie, EDF, Energy Pool, Engie – Cylergie, Nova Watt, RTE, Sagemcom R&D, Schneider Electric Electropole, Total, Vinci Energies, Voltalis…
IRT, ITE, IHU	Supergrid…
Instituts Carnot	Energies du Futur, INRIA…
Autres centres de recherches	CentraleSupelec, CRIGEN, G2Elab, L2EP, Projet LiveGrid, Smart Electric Lyon…
Pôles de compétitivité	Advancity, CapDigital, Derbi, Images et Réseaux, Minalogic, S2E2, SCS, Systematic…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Actémium, Smart Grid Energy…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

23 Batteries électrochimiques de nouvelle génération

Loisirs & culture
ÉNERGIE, **MOBILITÉ**, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Batteries électrochimique ; Li-ion ; Sodium-soufre ; Redox Flow ;

© ERENAULT MARKETING 3DCOMMERCE

Définition et périmètre

Le principe du stockage électrochimique est de conserver l'énergie électrique sous forme chimique. Les systèmes de stockage électrochimiques sont extrêmement intéressants car l'énergie stockée est directement convertie en énergie électrique : l'électricité et l'énergie chimique partagent le même vecteur énergétique, l'électron. Le process électrochimique ne requérant pas de transfert de chaleur, il est très efficace et typiquement les rendements de conversion des batteries sont supérieurs à 85 %.

Une batterie est un système composé de cellules électrochimiques mises en réseau. La puissance et l'énergie stockées vont être fonctions de la configuration de mise en réseau et du nombre de cellules. La capacité de stockage de puissance et d'énergie varie en fonction des technologies (plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, sodium-soufre, zebra).

Cellules électrochimique d'une batterie
(Source: Automotive Energy Supply Corporation, 2007)

Il existe plusieurs types de batteries, se différenciant par les espèces chimiques mises en jeu :

Li (Li-ion & Li-polymère) Les batteries Li-ion utilisent un composé du lithium comme matériau électrode. Elles possèdent une grande densité d'énergie et nécessitent peu de maintenance. Néanmoins, elles présentent des risques en cas de surcharge, des coûts de fabrication élevés et sont difficilement recyclables. Les batteries **Li-Polymère** sont une catégorie de batteries au lithium dont l'électrolyte est un polymère microporeux. Celles-ci présentent des risques, mais aussi une densité d'énergie, moins importants.

Sodium-soufre (Na-S) Les électrodes liquides sont des formes ioniques de sodium (pôle négatif) et de soufre (pôle positif). L'électrolyte solide intermédiaire est une céramique d'alumine. Elles présentent une haute densité énergétique et une bonne cyclabilité. Elles emploient des matériaux corrosifs et fonctionnent à haute température (de 300 à 350 °C). Cette technologie est adaptée pour les applications « grande échelle » telles que les industries électro intensives, les grands systèmes de back-up… Enfin, ces batteries ont une grande efficacité (jusqu'à 90 %) et une forte densité énergétique.

Batterie à flux circulants (Redox flow) L'énergie est stockée suivant le même mode que pour les piles à combustibles. Elles sont constituées de 2 demi-cellules, l'une pour l'oxydation, l'autre pour la réduction, séparées par une membrane échangeuse d'ions. La puissance produite est fonction de la taille de la membrane tandis que la quantité d'énergie dépend de la taille du réservoir d'électrolyte. Les batteries à flux ont l'avantage de nécessiter peu de maintenance, d'être propres et d'avoir une durée de vie importante.

Les batteries acides avancées Elles sont une évolution des batteries acides traditionnelles. Les électrodes en carbone permettent d'augmenter la cyclabilité et l'élasticité de la charge. Cette technologie est déjà employée pour le stockage d'électricité du réseau électrique général.

Les piles à combustible, qui sont également des dispositifs électrochimiques, sont incluses dans la fiche Technologies de l'hydrogène du présent ouvrage.

On peut citer également **les supercapacités.** Elles permettent de délivrer en un temps court, une puissance importante. Elles peuvent être couplées avec une batterie afin de créer un système combinant les bénéfices des deux technologies. Les développements des supercapacités portent sur l'augmentation de la densité d'énergie.

De nombreuses technologies de batteries sont en émergence : Li-S, Li-air, Na-ion ou encore le tout solide.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le marché des véhicules électriques est encore émergent et leur source d'énergie est un enjeu clé. L'industrie européenne des batteries est en retard, celle d'Amérique du Nord également, mais dans une moindre mesure avec des effets d'échelle attendus

avec les développements, notamment de la Tesla. Il y a un fort risque que lorsque le marché des véhicules électriques sera mature, les acteurs asiatiques soient devenus les leaders incontestés de la fabrication des cellules ou des batteries, déplaçant la chaîne de valeur de la mobilité électrique vers l'Asie.

Les batteries électrochimiques de nouvelle génération permettent de faciliter l'intégration des énergies renouvelables sur le réseau et de mieux gérer les pointes de consommation électrique en effectuant du report de charge. Elles sont des éléments du développement des énergies renouvelables intermittentes, telles que le photovoltaïque ou l'éolien.

La France a fait des batteries pour véhicule une de ses priorités, en l'inscrivant dans sa liste des 9 solutions industrielles de son plan de la nouvelle France industrielle. En outre, le stockage de l'énergie est la première des sept priorités de la commission « Innovation 2030 ».

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les Batteries électrochimiques de nouvelle génération sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
45	Technologies pour la propulsion

Les technologies influencées par les Batteries électrochimiques de nouvelle génération sont :	
2	Capteurs
22	Réseaux électriques intelligents
42	Solaire photovoltaïque
43	Energies éoliennes
45	Technologies pour la propulsion

Les marchés

Marché global Le marché mondial des batteries électrochimiques (toutes applications confondues) s'est élevé à environ 380 GWh en 2013. Il est dominé à 90 % par les batteries acides. L'autre part du marché représentant une capacité de 47 GWh est composée des technologies Lithium (environ 37 GWh), NiCd (environ 3GWh), NiMH (environ 5 GWh), et autres solutions (environ 2 GWh) telles que les batteries à flux redox et NaS *(source : Avicenne energy, 2014)*.

Répartition du marché mondial des batteries électrochimiques (en capacité électrique GWh) par technologie de batterie - toutes applications confondues *(source : Avicenne energy, 2014)*

En termes de revenus, le marché global[1] en 2013 s'est élevé à 54 milliards de dollars : 33 milliards de dollars (Md $) pour les batteries acides, 18 Md $ pour les batteries au lithium, 1 Md $ pour les NiMH, 2 Md $ pour les autres solutions.

Les applications Le segment applicatif le plus important est celui des batteries pour le démarrage, l'éclairage et l'allumage (SLI) des voitures, bateaux, camions, etc : il représente 20 Md $. Le reste du marché se partage entre environ 10Md $ pour l'électronique grand public, environ 1,4 Md $ pour les vélos électriques, 10 Md $ pour l'industrie (chariots élévateurs, stockage stationnaire pour les télécommunications, médical, éclairage de secours), 4 Md $ pour le transport électrique (EV) ou hybride (HEV), 5 Md $ pour les outils électriques incluant les outils pour le jardinage, et environ 2 Md $ pour les applications diverses (chaise roulante, outils médicaux, etc.).

Répartition du marché mondial des batteries électrochimiques (en chiffre d'affaire) par application (toutes technologies de batteries électrochimiques confondues) *(source : Avicenne energy, 2014)*

Automobile L'automobile représente 5 GWh des ventes mondiales, soit un marché de 2,1 Md $ en 2013. Ces véhicules utilisent des batteries Li-ion et NiMH. En 2013, la technologie Li-ion comptait pour les deux tiers des ventes de batteries dans l'automobile en termes d'énergie. Selon des prévisions de croissance, elle devrait être la seule technologie utilisée à l'horizon 5 à 10 ans, avec une croissance annuelle de 20 % par an, pour atteindre 10 Md $ en 2025 *(source : Avicenne energy, 2014)*.

Le coût du pack de batteries a diminué très rapidement depuis 2006, passant de 1300 dollars par kWh à 410 dollars par kWh en 2014. Les entreprises leaders telles que Tesla Motors et Renaud-Nissan affichent même des coûts inférieurs à 300 dollars par kWh *(source : B. Nykvist et al., 2015).*

En France, le revenu généré par le marché des batteries pour véhicules électriques était de 380 M$ en 2012. La France devrait représenter 16,2 % du marché global des batteries pour les véhicules électriques en 2020 *(source : Research Market, 2012).*

Applications à grandes échelles Le chiffre d'affaires mondial des cellules pour les applications à grande échelle est de 221,8 millions de dollars en 2014. Il devrait atteindre 17,8 milliards de dollars en 2023. Les batteries Li-ion sont les plus utilisées sur le marché des batteries reliées au réseau électrique général *(source : Navigant Research, 2014)*. Le déploiement de l'éolien et du photovoltaïque devrait tirer ce marché.

Investissements industriels La capacité de production de batteries sur le territoire européen est en retard par rapport à l'Asie et l'Amérique du Nord. Les investissements prévus jusqu'en 2015 en Europe représentent moins de 5 % de l'investissement total mondial. En Europe, la France, avec SAFT et BATSCAP, mais aussi RENAULT, est bien positionnée *(source : The European Association for Advanced Rechargeable Batteries, 2013)*. Cependant, replacé à l'échelle mondiale, l'investissement de ces acteurs en Europe est faible.

1 – Pack de batterie (cellules, cellules assemblées et connecteurs mais ne contient pas l'électroniques de puissances telles que les convertisseurs de courant continue)

Montant des investissements totaux (millions de dollars) pour la fabrication de batteries Lithium-ion
(Source : Avicenne Énergie, 2014)

Les défis technologiques à relever

La France est plutôt bien positionnée dans le paysage européen, mais celui-ci est en retard par rapport aux acteurs asiatiques qui investissent beaucoup et à tous niveaux de la chaîne de l'innovation. Dans l'hexagone, les acteurs de la R&D sont cependant bien présents avec des innovations à horizon 10 à 15 ans. Les acteurs se sont organisés dans le cadre d'un réseau européen : ALISTORE-ERI, initié et mené par des acteurs français.

Les batteries électrochimiques de nouvelles générations ont en commun nombre d'enjeux et de verrous :

- diminuer les coûts,
- augmenter la capacité de stockage (densité énergétique et/ou puissance),
- augmenter les rendements de stockage/déstockage,

- améliorer la durée de vie,
- réduire l'impact environnemental (éléments non toxiques, recyclables),
- préserver les ressources (matériaux abondants),
- améliorer la sécurité.

Les objectifs chiffrés pour les batteries sont l'amélioration de la durée de vie à 15 ans et la réduction du coût de moitié. Ainsi pour le marché des véhicules électriques (EV), l'objectif est d'atteindre un coût du pack de 100 à 150 $/Wh à l'horizon 2020 *(sources : ambassade française au Japon & DOE 2012)*. Tesla a annoncé viser le seuil bas de cette fourchette pour ses batteries d'ici une décennie[2]. L'objectif de densité énergétique est 200-300 Wh/kg, contre environ 100 Wh/kg aujourd'hui).

Coût de batterie pour voiture électrique *(batterie de dimension moyenne 30kWh) [source : element energy, 2012]*

Les principaux travaux menés pour répondre à ces défis sont les suivants :

Na-ion La substitution du lithium (Li) par le sodium (Na) permet de réduire d'environ 35 fois le coût lié à cet élément. Le Na permet également de développer des batteries répondant aux enjeux du développement durable. Néanmoins, ces batteries sont moins performantes que les Li-ion et il faut par conséquence axer les efforts de R&D dans cette direction. La technologie Na-ion devrait être commercialisée dans les 5 à 10 ans.

Systèmes hybrides L'hybridation de systèmes de stockage consiste à combiner deux ou plusieurs technologies de batteries afin de compenser les défauts d'un système par les avantages d'un autre. Ces architectures peuvent s'appliquer aux systèmes photovoltaïques pour lisser la production d'énergie. Le développement porte sur l'optimisation de l'intégration sur le réseau.

Anode Les anodes de graphite et de carbone dur atteignent des performances de 300 mAh/g. Pour la nouvelle génération d'anodes, composée d'intermétalliques et de liant, les nanophases d'oxyde métallique ou encore les adhésifs conducteurs devraient permettre d'atteindre 600 mAh/g.

Cathode Les cathodes ont des performances de 120 – 160 mAh/g en utilisant des oxydes stratifiés, des spinelles et des olivines. Des oxydes multi-stratifiés, des phosphates métalliques et des surfaces structurées pourraient permettre d'atteindre 300 mAh/g.

Électrolyte Les liquides organiques, les solvants et les gels autorisent des tensions jusqu'à 4 Volts. La nouvelle génération de batteries vise des tensions de 5 Volts en utilisant des électrolytes à haut voltage, des électrolytes pour le lithium métal, des électrolytes ininflammables.

Gestion active des batteries De nouveaux développements peuvent améliorer les performances et la sécurité tout en diminuant le coût.

Tests de sécurité La sécurité des batteries peut être un frein à leur commercialisation. Un exemple de risque associé aux batteries Li-ion est le dégagement de gaz toxiques lors de la combustion accidentelle du système. L'évaluation précise des risques, de façon à les maîtriser et orienter les recherches en conséquence est primordiale (test de surcharge, court-circuit, chauffage adiabatique, etc.).

Recyclage Les procédés pour le recyclage des batteries existent. Néanmoins les boucles actuellement utilisées pour les batteries au lithium doivent être adaptées aux batteries de véhicules électriques.

2 – Straubel (CTO et co-founder de Tesla) à la convention annuelle du "the Edison Electric Institute" qui s'est tenue à la nouvelle Orléans le 11 juin 2015.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'industrie française de la fabrication de batteries est bien positionnée en Europe. Néanmoins cette dernière a une capacité de production très largement inférieure à celle des zones Asie et Amérique du Nord. L'industrie asiatique notamment est supportée par le fort développement du marché des batteries pour les applications grand public *(source : E-mobility Roadmap for the EU battery industry, 2013).*

Les acteurs leaders du marché ont consenti des investissements conséquents pour la création d'outils industriels permettant d'obtenir des économies d'échelle. Par exemple, Tesla, avec le japonais Panasonic, a investi 5 milliards de dollars dans une usine géante au Nevada (États-Unis).

Les fabricants de batteries et les utilisateurs cherchent encore le modèle économique optimal. L'échec de Better Place sur le « battery switching » en est un exemple. Les modèles de partenariats entre les motoristes et les fabricants de batteries sont diversifiés :

- Renault a signé un accord en 2014 avec Bolloré pour l'utilisation des batteries de ce dernier
- Tesla assemble des cellules fabriquées par PANASONIC
- …

Le marché du stockage pour le stationnaire est limité avec beaucoup de concurrence et des technologies très hétérogènes : STEP, volant à inerties, hydrogène, etc. Le principal inconvénient des batteries réside dans le coût de l'installation. L'utilisation des batteries pour le réseau électrique nécessite de bas coût et une maintenance limitée.

Tesla a très récemment lancé une offre pour le stockage résidentiel. La batterie est destinée à être rechargée par le biais d'énergies renouvelables ou sur le réseau électrique général. Le coût relativement bas de ce système, par rapport aux systèmes actuels ($250 / kWh), peut ouvrir le marché du stationnaire « grand public » aux batteries au lithium.

Les enjeux réglementaires

Les réglementations liées aux batteries concernent le plus souvent leur utilisation dans la mobilité. Plus que pour d'autres applications, la mobilité implique des risques d'agressions mécaniques, électriques et thermiques qui doivent être maîtrisés afin de garantir la sécurité des personnes à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule (*source : INERIS*). Les batteries Li-ion sont également concernées par les réglementations de transport des matières dangereuses : ce cadre regroupe leur transport en tant que marchandise. Le cadre réglementaire des véhicules prévoit également la sécurité électrique.

L'Institut national de l'Environnement industriel et des risques (INERIS) a développé la certification ELLICERT pour des batteries, des cellules et des packs destinés aux véhicules électriques et hybrides rechargeables. Cette certification attribue un niveau ou une classe de sécurité (3 classes A, B et C) en fonction de la résistance à des dysfonctionnements ou agressions électriques, mécaniques ou thermiques. Les exigences requises ont été définies en collaboration avec les fabricants de batteries, les constructeurs automobiles et les gestionnaires de flottes, les experts nationaux de la filière, une organisation de consommateurs et une représentation des collectivités territoriales *(source : INERIS)*.

Le domaine du stockage stationnaire ne bénéficie pas de réglementation spécifique. Les matériaux utilisés dans la fabrication des batteries électrochimiques sont soumis au système européen d'enregistrement REACH.

La directive européenne 2006/66/EC sur les DEEE impose un taux de recyclage de 50 % pour les batteries lithium ion *(source : Roadmap eurobat e-modility).*

Analyse AFOM

ATOUTS

Acteurs de la recherche de premier plan, leaders sur le périmètre européen, et organisés en réseau

Plusieurs grands industriels à tous les niveaux de la chaîne de valeur, y compris la fabrication des cellules.

FAIBLESSES

Peu d'infrastructures de recherche avale (plateformes, instituts de recherche),

Trop faibles investissements industriels,

Taille de la production insuffisante pour réaliser des économies d'échelle.

OPPORTUNITÉS

L'affirmation d'une ambition nationale via les 9 solutions industrielles françaises,

Besoin de moyens des stockages de l'énergie pour les énergies intermittentes, notamment dans les DOM-TOM, développement des véhicules hybrides et électriques. Ressources de R&D importantes au niveau européen (programmes H2020 énergie et transports)

MENACES

Très lourds investissements des acteurs historiques des batteries pour l'électronique grand public, mais aussi des acteurs chinois et américains, qui visent l'atteinte des objectifs de réduction des coûts de production

Facteurs clés de succès et recommandations

Un soutien aux nouvelles générations de batteries électrochimiques doit être apporté au niveau de la recherche et du développement afin de maintenir un haut niveau de compétences.

L'abaissement du coût dans le domaine des batteries dépend fortement des effets d'échelle, l'investissement à l'échelle industrielle doit être encouragé.

Acteurs clés :

Entreprises	Arkema, Blue Solutions (ex-BATSCAP), E4V, Easyli, EDF, Hutchinson, NawaTechnologies, SAFT, Saint Gobain – Cree, Saint Gobain Glass – Crdc, Solvay, Solvonic …
Instituts Carnot	CIRIMAT, Energies du Futur, ICEEL …
Autres centres de recherches	CEMHTI(Orléans), ICG-AIME (Montpellier), ICMCB, ICR, IEMN, IMN, IPREM (Pau), IS2M (Mulhouse), LCMCP (Paris), LEPMI, LG2A, LRCS (Amiens), MADIREL, PECSA - Laboratoire Physicochimie des Electrolytes, Colloïdes et Sciences Analytiques …
Pôles de compétitivité	Mov'eo, Tenerrdis…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

24 Carburants de synthèse

Loisirs & culture
ÉNERGIE, **MOBILITÉ**, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Biomasse énergie ; biocarburants ; biogaz ; hydrolyse enzymatique ; fermentation ; biodiesel ; bioéthanol.

© Algosuis

Définition et périmètre

Les carburants de synthèse couvrent une large palette de carburants produits à partir de matières contenant les éléments chimiques hydrogène et carbone : charbon, biomasse, gaz naturel et même directement H_2 et CO_2. Les technologies utilisant le charbon et le gaz sont utilisées au stade industriel de longue date, tandis que celles exploitant des ressources alternatives sont en plein développement.

Les biocarburants sont une classe de carburants de synthèse se présentant sous forme liquide ou gazeuse et qui sont issus de la biomasse. On les classe habituellement en trois catégories :

- Les biocarburants dits « conventionnels » sont produits à partir de ressources alimentaires (canne à sucre, betterave, céréales, colza, maïs, tournesol, arachide, palme, soja, etc.) ou de déchets (huiles usagées, graisses animales). Maîtrisés à l'échelle industrielle, ils représentent l'essentiel de la production actuelle ;

- Dans le cas des biocarburants de nouvelle génération, les procédés mis en œuvre visent en particulier à valoriser l'intégralité de la plante. Ainsi, la biomasse ligno-cellulosique (BLC), provenant de déchets agricoles, de résidus forestiers, de bois, de plantes dédiées à croissance rapide, etc., est employée. Elle est principalement composée de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine dans des quantités variables suivant sa provenance. Au sens de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, les biocarburants dits « avancés » sont définis comme devant être produits à partir de matières premières qui ne compromettent pas la vocation alimentaire d'une terre et ne comportent pas ou peu de risques de changements indirects dans l'affectation des sols ;

- A plus long terme, des biocarburants pourront être produits à partir de ressources alternatives, telles que la biomasse marine, principalement des algues. De nombreux défis technologiques et économiques restent à résoudre avant d'envisager son utilisation au stade industriel.

Les procédés de production de biocarburants de nouvelle génération se répartissent en deux grandes familles : la voie thermochimique (par gazéification et pyrolyse) et la voie biochimique (par hydrolyse enzymatique et fermentation).

La voie thermochimique par gazéification de la biomasse produit un gaz de synthèse contenant un mélange de monoxyde de carbone (CO), de l'hydrogène (H_2) et d'autres molécules carbonées. Il peut être utilisé pour la synthèse d'hydrocarbures liquides par réaction de Fischer-Tropsch (réaction de polycondensation du CO), ou bien combiné avec un mélange de H_2 et de dioxyde de carbone (CO_2) afin de produire du méthanol (CH_3OH). Si l'hydrogène est produit par le biais de l'électrolyse de l'eau, l'oxygène généré peut être utilisé lors de l'étape de gazéification pour augmenter et contrôler le taux de production de H_2 et de CO par rapport à celui de l'eau (H_2O) et du CO_2 dans le gaz de synthèse.

La voie thermochimique peut également recourir à la pyrolyse de la biomasse pour produire une huile brute contenant une grande variété de composés chimiques caractérisés par leurs fonctions (acides, aldéhydes, alcools, etc.) et leur poids moléculaire (des formaldéhydes aux sucres complexes). Cette huile peut être directement transformée en hydrocarbures par le biais d'une étape d'hydrotraitement afin de diminuer sa quantité d'oxygène et la rendre alors soluble avec des hydrocarbures fossiles. Une autre voie de valorisation est la gazéification de l'huile afin de l'utiliser comme produit intermédiaire.

La voie biochimique permet de convertir deux macromolécules principales : les sucres et les lipides. Elle se déroule en 4 étapes : la première, le prétraitement, a pour objectif de libérer la fraction hydrolysable de la BLC ; la deuxième, l'hydrolyse enzymatique, consiste à transformer les hémicelluloses et la cellulose en sucres ; la troisième, la fermentation par des microorganismes, a pour rôle de transformer les sucres en éthanol ; la quatrième, la distillation et la déshydratation, permet de séparer le mou de l'éthanol. Chacune de ces étapes comporte des difficultés, comme l'obtention de meilleurs rendements sans dégrader les sucres lors de l'hydrolyse enzymatique, ou encore la transformation simultanée des glucoses et des sucres à cinq carbones (C5 - pentoses) lors de la fermentation.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les carburants de synthèse permettent de répondre à plusieurs défis : en offrant un débouché supplémentaire aux filières agricoles locales, en réduisant les

émissions de gaz à effet de serre, en anticipant l'épuisement des réserves mondiales de pétrole et en réduisant la dépendance énergétique vis-à-vis des hydrocarbures.

Le secteur des transports contribue à hauteur d'un quart des émissions de gaz à effet de serre (GES) de la France. L'utilisation de biocarburants pour les véhicules permet de diminuer cette part.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les carburants de synthèse sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
8	Procédés relatifs à la chimie verte
15	Procédés relatifs à la chimie du pétrole
25	Technologies de l'hydrogène

Il n'y a pas de technologies influencées par les carburants de synthèses.

Les marchés

Au niveau mondial, le bioéthanol a représenté en 2010 73 % de la consommation de biocarburants (en teneur énergétique). En 2011, les États-Unis, premiers producteurs mondiaux, ont été contraints d'exporter massivement leur production, en Europe, au Brésil, au Canada et en Asie. En 2014, l'éthanol cellulosique, biocarburant de 2e génération, est devenu une réalité commerciale aux États-Unis avec l'ouverture de trois sites de production pour une capacité totale de 47 millions de gallons (environ 140 kt) par an. Le site de DuPont devrait également commencer à entrer dans sa phase commerciale en 2015 avec une capacité de 30 millions de gallons par an. La production annuelle des États-Unis sur l'année 2014 en bioéthanol cellulosique s'est élevée à environ 33 millions de gallons.

En Europe, la production de biodiesel s'est élevée en 2013 à 10 367 kt[1]. Il s'agit quasi-exclusivement de biodiesel de 1ère génération. Actuellement, l'industrie européenne est en surcapacité : avec 23 093 kt de capacités de production de biodiesel recensées en 2014, les installations sont sous-utilisées, en particulier dans des pays tels que l'Espagne ou l'Italie. Cette situation résulte d'une vague d'investissements déclenchée par l'annonce des objectifs initiaux d'incorporation de biocarburants au niveau européen, rapidement suivie par une forte augmentation des importations de biodiesel en provenance d'Amérique du Sud et d'Asie du Sud-Est. L'origine des exportations a également changé au cours des dernières années en raison de l'introduction par la Commission européenne de frais douaniers anti-dumping pour le biodiesel et le bioéthanol importés des États-Unis[2], et le biodiesel importé d'Argentine et d'Indonésie[3]. En 2013, plus de 400 millions de litres de bioéthanol ont été exportés vers l'Union européenne, principalement du Guatemala, du Pérou et du Pakistan. Le biodiesel quant à lui, provenait majoritairement de la Malaisie et du Brésil.

Le marché estimé français des biocarburants est de 2,5 milliards d'euros et il est concentré autour des biocarburants de 1ère génération. Les emplois créés ou maintenus en France par cette filière sont de 6 400 emplois directs en 2011[4]. La consommation de la France et de l'Allemagne devrait augmenter dans les années à venir pour atteindre l'objectif de consommation d'énergies renouvelables des transports de l'UE. La part des biocarburants issus de terres en concurrence alimentaire sera néanmoins plafonnée à 7 % à l'horizon 2020, selon la directive (UE) 2015/1513 adoptée définitivement le 13 juillet 2015 et publiée le 9 septembre 2015[5].

La France se prépare pour les nouvelles générations de biocarburants, avec en particulier le lancement des

1 – Source : European Biodiesel Board.

2 – Règlement d'exécution (UE) n ° 443/2011 du Conseil du 5 mai 2011 : États-Unis.

3 – Règlement d'exécution (UE) n ° 1194/2013 du Conseil du 19 novembre 2013 : Argentine et Indonésie.

4 – Source : ADEME.

5 – Source : http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2015.239.01.0001.01.FRA

projets BioTfuel, Syndièse, Gaya et Futurol, qui visent à produire du biodiesel ou du biométhane à partir de biomasse lignocellulosique. Par exemple, le programme BioTfuel a été lancé en 2010 pour 180 millions d'euros et son objectif est de développer et de mettre sur le marché d'ici 2020, une chaîne industrielle complète de procédés de conversion thermochimique de la biomasse en biogazole de synthèse. Les partenaires sont Axens, le CEA, IFP Énergies nouvelles, Avril (ex-Sofiprotéol), ThyssenKrupp Industrial Solutions et Total. Le pilote de Pomacle-Bazancourt du projet Futurol a produit 180 000 litres de biocarburant par voie biochimique. Les essais industriels sont en cours et la commercialisation du procédé a été lancée par le biais la société Axens. Ces différents projets devraient porter leurs innovations sur le marché dans les années à venir : dans un avenir relativement proche pour les projets les plus avancés (Futurol), à plus long terme pour les projets plus amont (Syndièse, Gaya).

Le gisement disponible en France pour la production de biocarburants de seconde génération serait compris entre 0,8 Mtep à 5 Mtep pour les produits forestiers et entre 3,3 Mtep et 3,4 Mtep pour les ressources agricoles[6]. Ainsi dans le cas d'un procédé BtL[7] pour biodiesel et d'un rendement matière de l'installation de 15 %, le gisement en biodiesel serait compris entre 1,47 Mtep/an et 3 Mtep/an.

La production de biométhanol à partir de glycérine, sous-produit de la fabrication de biodiesel de 1ère génération, est commercialement réalisée aux Pays-Bas pour une capacité de 200 kt/an et en Islande par combinaison de H_2 et du CO_2. D'autres projets de démonstrateur sont en cours et utilisent principalement des matières premières à bas coût tels que les déchets issus de la biomasse et des sous-produits pour diminuer les coûts de production. Le biométhanol peut également être produit à partir de biogaz de décharge ou de déchets organiques solides comme la bagasse.

L'hydrogène peut aussi être produit à partir de biogaz de décharge ou bien par reformage catalytique de polyalcools issus de la biomasse. La société française Solagro a ainsi développé en 2014 un prototype de production d'hydrogène. Cette filière est encore embryonnaire.

6 – Source : « Feuille de route biocarburants avancés », ADEME (2011).

7 – BtL : Biomass to Liquid.

Les défis technologiques à relever

Matières premières L'identification et/ou l'obtention de matières premières végétales possédant une meilleure concentration en glucides afin d'augmenter le taux de sucres fermentescibles permettra d'augmenter le rendement de production des biocarburants.

Procédés de broyage, de prétraitement et de saccharification L'étape de prétraitement de la biomasse permet de rendre les sucres complexes (cellulose, hémicelluloses) accessibles à l'étape d'hydrolyse et à celle de la fermentation, dans le cas de la voie biochimique. Il est nécessaire de concevoir des technologies de broyage, de prétraitement et de saccharification économiquement viables afin de libérer les sucres simples contenus dans ces glucides. Elles doivent répondre à des contraintes sur leur efficacité au niveau industriel et fournir un produit intermédiaire de qualité homogène tout en étant suffisamment flexibles pour fonctionner sur une grande variété de ressources.

Enzymes Les enzymes sont utilisées par la voie biochimique durant l'étape d'hydrolyse qui a pour rôle de fragmenter les molécules de cellulose en sucres fermentescibles. Leur coût est un des facteurs économiques limitant et doit par conséquence être optimisé.

Micro-organismes Ils sont employés durant l'étape de fermentation pour transformer les sucres issus de l'hydrolyse. Néanmoins, les sucres C5 libérés par la biomasse présentent un rendement de fermentation inférieur à ce qui peut être réalisé sur les sucres à six carbones (C6). Il est nécessaire d'identifier des micro-organismes possédant le patrimoine génétique permettant d'agir sur le plus grand nombre de sucres et ainsi d'améliorer la productivité.

Purification des gaz avant transformation en énergie La purification du gaz de synthèse (voie thermochimique) est cruciale pour l'obtention de carburants destinés aux transports. Il est néanmoins envisageable de le valoriser à un niveau moindre de pureté pour des applications industrielles (fours, chaudières).

Couplage des étapes Il consiste à regrouper des étapes dans le schéma d'intégration de la chaîne de procédé. Par exemple dans le cas de la voie biochimique, le couplage de l'hydrolyse enzymatique avec la fermentation, voire avec la production d'enzymes, peut être réalisé. Les coûts de production sont ainsi

diminués mais le rendement de production est réduit par rapport à une décomposition étape par étape. Des améliorations sont à apporter sur le couplage des étapes afin d'apporter un gain économique à la technologie.

Biométhanol Elément essentiel à l'industrie, il est majoritairement produit par reformage d'hydrocarbures fossiles. Sa production à partir de gaz de synthèse (voie thermochimique) ou bien de H_2 et CO_2 n'est pas, à de rares exceptions près, commercialement compétitive. Le développement des technologies associées doit être focalisé sur leur optimisation économique.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le coût de production est l'enjeu principal des carburants de synthèse. L'équation économique de leur adoption est aujourd'hui directement influencée par leurs concurrents principaux, les carburants d'origine fossile. L'instabilité conjoncturelle du prix de ces derniers a rendu délicat l'établissement de scénarii quant à l'adoption de cette technologie : l'évolution des prix durant ces dernières années est allée à contre-courant des prévisions initialement établies. Actuellement, seul le bioéthanol produit à partir de sucre de canne (filière principalement développée au Brésil) serait en mesure de concurrencer l'essence d'origine fossile du seul point de vue des coûts : ils sont estimés entre 0,5 et 0,7 €/l (en équivalent essence), contre 0,7 à 0,9 €/l dans le cas du bioéthanol produit à partir de maïs aux États-Unis[8]. Dans le cas des biocarburants avancés, les estimations actuelles font apparaître des coûts de production prévisionnels – entre 1 et 1,4 €/l dans le cas du biodiesel[9] – encore largement trop élevés. De fait, ces derniers ne pourront être économiquement viables que s'ils sont produits à partir de ressources à faible coût.

Selon une étude de la Direction générale du Trésor[10], la prise en compte de la réduction des émissions de gaz à effet de serre ne permet pas de rendre les biocarburants compétitifs dans les conditions technico-économiques actuelles, qu'il s'agisse de biocarburants conventionnels ou avancés. Pour ces derniers, le coût de la tonne de CO_2 (éq.) évitée serait de l'ordre de 200 € ; à titre de comparaison, la valeur « tutélaire » d'une tonne de CO_2 a été fixée à 100 € à l'horizon 2030[11]. De ce point de vue, la réduction des coûts de production des biocarburants, en particulier ceux de nouvelle génération, apparaît comme un impératif majeur.

Les biocarburants de 1ère génération sont handicapés par un déficit d'image en France et dans le monde du fait de la controverse sur la ressource employée pour les produire. Les nouvelles générations étant produites à partir de ressources non alimentaires, la question est dans ce cas moins sensible.

La concurrence internationale est intense, avec plusieurs projets de biocarburants avancés arrivant à maturité en Europe et des installations aux États-Unis déjà opérationnelles. C'est par exemple le cas avec l'unité de production d'éthanol cellulosique de Beta Renewables en Italie (2013, 40 kt/an) ou le projet de St1 Biofuels en Finlande (8 kt/an, produits à partir de sciure de bois).

Les enjeux réglementaires

En application de la directive européenne 2012/28/EU, la France a mis en place un plan national en faveur des énergies renouvelables à horizon 2020. Ainsi, les énergies renouvelables devront représenter 10 % de la consommation d'énergie des transports. Les biocarburants contribueront majoritairement à

8 – Source : IRENA

9 – Source : CEA – I-tésé.

10 – Source : Documents de travail de la DG Trésor, *Étude prospective sur la seconde génération de biocarburants*, septembre 2010.

11 – Source : Centre d'Analyse Stratégique.

l'atteinte de cet objectif et devront répondre à des critères de durabilité (prise en compte du contenu énergétique et carbone des biocarburants, des impacts liés au changement d'affectation des sols, concurrence avec la production alimentaire). Cette directive prévoit également que la part énergétique renouvelable des biocarburants issus de déchets, de résidus, de matières cellulosiques et lignocellulosiques qui n'entrent pas en concurrence avec les terres à vocation alimentaire peut être comptabilisée au double de sa valeur réelle pour le calcul de la part d'énergie renouvelable dans les transports. Cette mesure favorise les biocarburants avancés et la liste des matières premières éligibles a été publiée par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie en annexe de l'arrêté du 21 mars 2014. La directive 2009/28/CE est amendée en annexe IX par la directive (UE) 2015/1513 pour prendre en compte le changement indirect d'utilisation des terres (ILUC). L'annexe IX définit une liste des matières premières pour biocarburants avancés comptant double dans le calcul des objectifs énergétiques. Les biocarburants avancés non répertoriés en annexe IX et utilisés dans des installations existantes avant l'adoption de cette directive peuvent être comptabilisés pour l'objectif national. La directive européenne relative à la qualité des carburants 2009/30/CE (FQD - Fuel Quality Directive) exige des fournisseurs de réduire de 6 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) pour le 31 décembre 2020 par rapport aux normes éditées sur les carburants fossiles en 2010. L'ajout de biocarburants dans les carburants fossiles permet d'améliorer le bilan CO_2, sachant que les installations mises en service à partir de 2018 devront démontrer que leur production permet une réduction de 60 % des émissions de gaz à effet de serre. Dans la pratique, le cadre réglementaire européen actuel favorise le biodiesel produit à partir de déchets tels que les huiles usagées ou les graisses animales.

Analyse AFOM

ATOUTS

Concentration des activités de R&D autour de quelques grands projets

Ressources agricoles et forestières

FAIBLESSES

Retard sur l'industrialisation par rapport à la concurrence internationale

Incertitudes sur les filières d'approvisionnement

OPPORTUNITÉS

Obligation réglementaire relative à l'incorporation de biocarburants, avec un « bonus » pour les biocarburants avancés

Synergies possibles avec les autres modes de valorisation (principe de la bioraffinerie)

MENACES

Incertitudes sur les évolutions du prix des carburants fossiles

Concurrence pour l'accès aux ressources

Facteurs clés de succès et recommandations

Les projets français sur les biocarburants avancés arrivent pour certains d'entre eux dans leur phase d'industrialisation et de commercialisation. Nécessitant des apports en capitaux importants, ces étapes sont critiques pour la construction de la filière française. Des mécanismes de soutien et d'incitation pour le financement d'unités de production à l'échelle pré-industrielle, avec, en parallèle, la poursuite des efforts de R&D visant à améliorer les différentes briques technologiques – en particulier les briques « propriétaires » –, permettront de faciliter l'émergence de cette nouvelle filière. Il faut souligner que nombre de technologies développées dans ce cadre sont transversales et peuvent être valorisées pour d'autres applications, par exemple dans le domaine de la chimie verte. Les transferts entre projets doivent donc être favorisés.

Acteurs clés :

Entreprises	Abolis, AirLiquide, Arkema, Avril, Axens, Engie – CRIGEN, CIMV, Fonroche Energie, Global Bioenergies, Lesaffre, Tereos, Total…
Centres techniques	FCBA, CTP…
Instituts Carnot	3BCAR, Energies du Futur ICEEL, IFPEN TE, IRSTEA, M.I.N.E.S. …
Autres centres de recherches	Centre Rapsodee des Mines d'Albi-Carmaux, Cirad, CRIGEN, IFPEN, INRA LBE, Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés (INSA Toulouse), LGC de l'Ensiacet, LISBP, LRGP, UCCS…
Pôles de compétitivité	Derbi, IAR, Tenerrdis…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Agro-Industrie Recherche et Développement…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

25 Technologies de l'hydrogène

Loisirs & culture
ÉNERGIE, **MOBILITÉ**, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Hydrogène ; Pile à combustible ; Électrolyse ; Stockage.

Définition et périmètre

L'utilisation de l'hydrogène à des fins énergétiques implique de maîtriser l'ensemble des briques technologiques de la filière, partant de la production pour arriver aux modes d'utilisation et de valorisation, en passant par le transport, la logistique et le stockage.

La production de l'hydrogène est aujourd'hui majoritairement destinée aux utilisations industrielles. Elle utilise le procédé de reformage du gaz naturel, d'hydrocarbures liquides ou du charbon. Ce procédé présente l'inconvénient d'être fortement émissif en dioxyde de carbone (CO_2). Il est néanmoins possible de produire de l'hydrogène « décarboné » en utilisant des technologies alternatives : l'électrolyse basse température, encore limitée par son rendement limité et son coût (l'hydrogène ainsi produit pouvant être considéré comme décarboné à partir du moment où l'électrolyseur est alimenté par de l'électricité elle-même décarbonée) ; la gazéification de la biomasse, couplée à une purification et une séparation du gaz de synthèse ; l'électrolyse haute température-haute pression, encore expérimentale ; la dissociation thermochimique de l'eau, également expérimentale, et qui suppose de disposer d'une source de chaleur à haute température (plus de 850°C) et en grande quantité. Par ailleurs, la production d'hydrogène soit par photocatalyse, soit par des voies photobiologiques, soit par des voies biologiques, est aussi à considérer comme solution alternative.

La faible masse molaire de l'hydrogène, sa capacité à exploser, combinées à sa capacité de diffusion au travers d'un grand nombre de matériaux, posent des problèmes spécifiques à son stockage. Trois principaux modes de stockage peuvent être employés : sous forme gazeuse dans des conteneurs sous très haute pression ; sous forme liquide (stockage cryogénique) ; dans des matériaux solides sous forme d'hydrures métalliques.

L'hydrogène en tant que vecteur énergétique peut être utilisé de trois manières, s'agissant d'applications stationnaires : la production d'électricité et de chaleur via une pile à combustible, la méthanation, et enfin l'injection dans le réseau de gaz naturel.

La pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse, c'est-à-dire qu'elle produit de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène. Le produit direct de cette réaction est de la vapeur d'eau. Une pile à combustible est composée d'une anode recevant l'hydrogène et d'une cathode recevant l'oxygène, l'ensemble étant séparé par un électrolyte qui va permettre le transport des charges. Les différents modèles et configurations de piles à combustible se distinguent par les matériaux employés au niveau des électrodes et de l'électrolyte. Pour des applications stationnaires, les principales configurations sont :

- PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), qui se caractérise par l'utilisation d'une membrane polymère comme électrolyte et qui fonctionne à 180-220°C ;
- SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*), dont l'électrolyte est en céramique (zircone) et qui fonctionne à 700-1000°C ;
- PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*) et MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*), dont l'électrolyte (respectivement l'acide phosphorique et des carbonates) est solide à température ambiante, mais liquide à la température de fonctionnement de la pile, c'est-à-dire 180-220°C pour le premier et 600-660°C pour le second.

Les chaleurs évacuées par le système peuvent être récupérées et valorisées (fonctionnement en cogénération). Comme pour la plupart des réactions chimiques, l'accélération de la cinétique est obtenue soit via une augmentation de la température, soit par l'utilisation d'un catalyseur, généralement du platine dans le cas présent. La haute température implique l'emploi de matériaux adaptés.

La méthanation consiste en la réaction de l'hydrogène avec du dioxyde ou du monoxyde de carbone dans un réacteur catalytique afin de produire du méthane.

L'injection directe dans le réseau de gaz existant consiste à alimenter ce dernier par un mélange hydrogène / gaz naturel.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

L'hydrogène présente plusieurs avantages en tant que vecteur énergétique. Flexible dans son utilisation et multi-secteurs, il peut être localisé auprès des utilisateurs finaux. Ces atouts peuvent lui permettre de servir de moyen de stockage de l'énergie produite par des ressources intermittentes que sont les éoliennes et le solaire photovoltaïque. En effet, ces dernières sont amenées à prendre une part de plus en plus importante dans le mix électrique français et mondial, et il

n'existe pas de technologies autorisant de gérer efficacement l'intermittence de la production lorsque cette part atteindra 30 % environ de ce mix. D'autres applications concernent sa combinaison avec du dioxyde de carbone (CO_2) – cas de figure plus spécifiquement intéressant lorsque le CO_2 est d'origine anthropogénique – ou du monoxyde de carbone (CO) afin de produire du méthane de synthèse utilisable dans l'industrie ou les transports. Enfin, des véhicules à hydrogène commencent à voir le jour (Mirai pour le Japon, partenariat Renault-Nissan, Ford et Daimler sur le sujet, ainsi que des prototypes Air Liquide..)

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les technologies de l'hydrogène sont :	
1	Matériaux avancés et actifs

Les technologies influencées par les technologies de l'hydrogène sont :	
22	Réseaux électriques intelligents
24	Carburants de synthèse
45	Technologies pour la propulsion

Les marchés

Le marché de l'hydrogène peut être décomposé entre celui de l'industrie, celui de l'électricité stationnaire et celui de la mobilité. L'industrie, principal débouché depuis plusieurs décennies, utilise majoritairement le vaporeformage du méthane pour produire de l'hydrogène, l'électrolyse ne représente que 0,4 % des volumes annuels produits en 2013 au niveau mondial mais on estime que cette part atteindra 5 % en 2020. Le marché mondial de l'équipement pour la production d'hydrogène destiné à l'industrie est estimé à environ 150 millions d'euros en 2013 avec une perspective de croissance de 30 % par an pour atteindre 1 milliard d'euros en 2020[1].

Le marché mondial du « power to gas », composante de celui de l'électricité stationnaire, consiste à transformer l'électricité (produite en surplus ou issue de sources intermittentes) en hydrogène par le biais d'électrolyseurs à des fins de stockage d'énergie. Combiné à celui de la mobilité, ce marché naissant est d'environ 100 millions d'euros pour l'année 2013. Les perspectives de croissance le placent à 400 millions d'euros en 2020.

En 2013, le marché mondial des piles à combustible a atteint 975 millions d'euros de chiffre d'affaires, soit une augmentation de 35 % par rapport à 2012[2]. Les acteurs clés du marché sont les États-Unis, le Japon, la Corée du Sud et l'Allemagne. En termes de puissance, 170 MW ont été commercialisés au niveau mondial en 2013. Le stationnaire domine très majoritairement le marché mondial avec 150 MW pour 30 000 systèmes et une augmentation de 24 % (en puissance) sur la période 2012 – 2013. Le marché mondial pour les transports est de 20 MW et 5 000 systèmes pour 2013. La production est largement dominée par le Japon avec 25 000 systèmes pour 2013 mais qui ne représentent qu'une puissance totale de 20 MW. Les États-Unis sont dans une situation inverse, avec seulement 2 500 systèmes qui représentent une puissance totale de 85 MW en 2013. La Corée du Sud occupe une position similaire à ce dernier avec 1 000 systèmes et une puissance totale de 45 MW en 2013. La production allemande est principalement constituée de systèmes de petite puissance (2 500 systèmes pour une puissance totale de 5 MW). Le Japon est le pionnier et le leader sur la commercialisation en termes de nombre de systèmes déployés. Le marché a émergé à partir de 2009 et est principalement constitué de modules stationnaires de micro-cogénération pour le résidentiel[3].

En France, il n'y a pas encore de marché établi pour les piles à combustible et les applications de type « power to gas ». Le projet de démonstration GRHYD, situé à Dunkerque, regroupe une douzaine de partenaires dont Engie, Areva Hydrogène et stockage d'énergie, et McPhy. Il traite d'une part de l'injection d'hydrogène décarboné mélangé à du gaz naturel dans les réseaux existants de gaz et d'autre part de la distribution du

1 – Source : Freedonia – World Hydrogen – Juillet 2012.

2 – Source : Navigant Research.

3 – Source : Agence Internationale de l'Energie, 2015.

carburant Hythane pour véhicule (mélange de gaz naturel et de 20 % d'hydrogène décarboné). Un autre projet est HyCUBE, situé en Corse, où de l'hydrogène est produit via un électrolyseur alimenté par une centrale solaire de 500 kW, puis stocké. Une pile à combustible est ensuite utilisée pour délivrer de l'électricité pendant les heures de forte consommation, à partir de l'hydrogène stocké.

S'agissant des applications en mobilité, le marché des véhicules équipés de pile à combustible est encore naissant. La voie privilégiée actuellement est le déploiement d'opérations de démonstration selon une logique de « corridors hydrogène », zones géographiques délimitées dans lesquelles l'infrastructure ad-hoc est déployée, permettant ainsi la mise en service de tels véhicules. L'approche française privilégie l'utilisation des véhicules électriques existants, dont on améliore l'autonomie par des prolongateurs à base de piles à hydrogène ; cela permet des usages plus intensifs, comme la livraison urbaine de colis.

Les défis technologiques à relever

Les défis technologiques actuels concernent l'optimisation des technologies existantes afin d'atteindre des coûts économiquement viables.

Électrolyse haute température Avec un rendement de 90 %, c'est la technologie de production d'hydrogène possédant le taux de conversion le plus élevé. Du fait de la haute température employée, elle demande des développements spécifiques sur les matériaux constituant l'équipement. Son utilisation en cycle alterné SOFC/électrolyseur HT permettrait de combiner les deux modes dans un seul équipement. Les efforts de développement portent sur la mise à l'échelle de ce type d'équipement, encore au stade laboratoire, la durée de vie (dégradation du courant électrique), le coût de l'installation et son coût opérationnel, ainsi que sur la flexibilité d'utilisation (fonctionnement par intermittence dans le cas d'un couplage avec des énergies renouvelables).

Méthanation Le procédé consiste à transformer de l'électricité en méthane en utilisant d'une part de l'hydrogène produit par un électrolyseur alimenté par une source d'énergie renouvelable et d'autre part du dioxyde de carbone. Le méthane produit permet d'offrir une nouvelle solution de stockage d'énergie ainsi qu'une solution de valorisation du dioxyde de carbone. Le rendement de la réaction doit être amélioré, via notamment le développement de catalyseurs à hautes performances.

Technologies pour le stockage Il existe trois modes de stockage de l'hydrogène : par compression, par voie cryogénique et par voie solide. Le stockage solide (hydrures métalliques) présente un certain nombre d'atouts, comme le fait d'être réalisé à pression ambiante. Si ce mode de stockage est techniquement validé, il subsiste des marges d'amélioration. Le stockage sous pression (350 à 700 bar) semble être la technologie de référence mais des améliorations en termes de sécurité doivent être apportées afin de permettre une plus grande diffusion sur le marché.

Injection dans les réseaux de gaz naturel d'hydrogène Injecter de l'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables dans les réseaux de gaz naturel permet de gagner en flexibilité sur la production d'énergie, tout en évitant de recourir au stockage direct d'hydrogène. Il est néanmoins nécessaire de valider la compatibilité avec les équipements de réseau et le stockage souterrain de gaz, ainsi que la compatibilité au niveau des usages finaux (clients).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'hydrogène se trouve indirectement concurrencé par le développement de la production de gaz non conventionnels dans les applications de production

d'énergie. Les découvertes de tels gisements ont fortement modifié l'équation technico-économique : dans les conditions actuelles, l'hydrogène peut avant tout être envisagé à des fins de stockage.

Ainsi, l'hydrogène en tant que vecteur de valorisation de l'électricité provenant des énergies renouvelables présente des avantages en termes de capacité de stockage (quasi-illimité) et de flexibilité d'utilisation (possibilités d'intégration multiples) que ne possèdent pas d'autres technologies telles que le stockage par batterie.

Le coût des investissements initiaux élevés est la première barrière économique pour la commercialisation des piles à combustible. Les électrolyseurs sont des systèmes fortement modulables, et permettent à cette technologie d'être très flexible en termes de capacité. Toutefois, cet avantage technique limite les effets d'économie d'échelle même si les électrolyseurs de grande capacité emploient des empilements de tailles identiques. Enfin, le manque de standardisation entraîne également des difficultés dans l'organisation de la chaîne d'approvisionnement.

L'Amérique du Nord, le Japon et la Corée du Sud possèdent une avance technologique et commerciale importante dans le domaine des piles à combustible de type PEM. Néanmoins, le marché des autres technologies de piles (en particulier SOFC) ainsi que celui de l'électrolyse restent relativement plus ouverts.

Les enjeux réglementaires

L'hydrogène est utilisé depuis de nombreuses années à des fins industrielles (raffinage, chimie, métallurgie). Néanmoins, son utilisation en tant que vecteur énergétique hors industrie implique de nouveaux problèmes de sécurité sur son stockage. Dans le cas d'un conditionnement sous forme gazeuse, la forte pression nécessaire implique des risques d'éclatement du réservoir qui peuvent provoquer des surpressions aériennes et des projections de fragments. Lorsqu'il est stocké sous forme solide, la mise en contact accidentelle du composé adsorbant sous forme de poudre avec l'air, l'eau ou encore d'autres agents incompatibles peuvent entraîner des risques d'incendie violent. Pour aider le développement de la filière hydrogène, l'amélioration de la maîtrise des risques associés aux techniques de stockage doit conduire à la définition de règles de conception et des barrières de sécurité techniques, humaines et organisationnelles. Leur prise en compte dans une réglementation adaptée ou des normes de conception et de maîtrise des risques spécifiques participera au renforcement de la confiance dans l'hydrogène énergie de l'ensemble des participants de la chaîne de valeur[4].

L'hydrogène est concerné par plusieurs réglementations françaises et européennes qui couvrent la production, le stockage et l'utilisation (transport de marchandises dangereuses et en environnement au sens réglementaire du terme). Plus particulièrement, la directive 2009/79/CE concerne les véhicules à moteur fonctionnant à l'hydrogène.

4 – Source : INERIS, *Veille technologique et évaluation des risques sur les procédés de stockage d'hydrogène.*

Analyse AFOM

ATOUTS

Présence d'un des leaders mondiaux

Maintien de l'activité en R&D

Projets fédérateurs (GRHYD, HyCUBE, etc.)

FAIBLESSES

Nombre relativement limité d'entreprises impliquées

Marché national actuellement limité à des niches

Modèles économiques encore fragiles

OPPORTUNITÉS

Dispositifs de soutien européen (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking)

Complémentarité avec le développement de l'électricité d'origine renouvelable

MENACES

Avance technologique et industrielle de la concurrence internationale sur les marchés actuels

Risques de rupture d'approvisionnement pour certains éléments critiques (catalyseurs)

Acceptabilité sociale

Facteurs clés de succès et recommandations

L'avance technologique prise par les États-Unis, le Canada, le Japon et la Corée du Sud dans le domaine des piles à combustible PEMFC est trop importante pour être comblée. Il importe de concentrer les efforts de recherche et développement sur les technologies émergentes, en particulier celles dites à « haute température » (qu'il s'agisse de piles ou d'électrolyseurs).

D'une manière générale, des investissements ciblés en recherche et développement pour les applications stationnaires et leur intégration dans les systèmes énergétiques sont nécessaires pour positionner l'hydrogène de la façon la plus pertinente possible d'un point de vue technico-économique. L'utilisation des électrolyseurs en vue du stockage de l'énergie d'origine renouvelable nécessitera le développement de standards internationaux, particulièrement en ce qui concerne leur intégration au réseau électrique.

Acteurs clés :

Entreprises	AirLiquide, Areva Stockage d'Energie, Atawey, CETH2, Cofely Ineo, Electropôle - Schneider Electric, McPhy Energy, Michelin, Solumix, WH2…
Centres techniques	CETIAT…
Instituts Carnot	M.I.N.E.S., Energies du Futur…
Autres centres de recherches	CEA LITEN, CRIGEN, INERIS, IFPEN, GdR Hydrogène, Systèmes et Piles à Combustible, Université de Corse…
Pôles de compétitivité	Capenergies, Tenerrdis…

Les organismes signalés avec un astérisque sont également labellisés Carnot.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

26 Ingénierie génomique

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat,, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
ALIMENTATION

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Matériel génétique – ADN – séquençage – biologie moléculaire – physiologie cellulaire – organismes génétiquement modifiés – thérapie génique – sélection des variétés

Définition et périmètre

L'ingénierie génomique correspond à la manipulation du matériel génétique du vivant[1]. Reposant sur la biologie moléculaire et les technologies de séquençage du génome, elle permet d'identifier les gènes composant le matériel génétique d'une cellule ou d'un être vivant, d'étudier la relation génotype-phénotype, l'organisation, la stabilité et la variation du matériel génétique, et enfin de modifier le matériel génétique. Elle se trouve également à la base de la biologie de synthèse, visant à recomposer des systèmes variés, de la molécule à l'organisme à partir de l'étude du génome.

L'ingénierie génomique trouve des applications dans différents domaines, notamment l'alimentation, l'environnement et la santé.

Dans le secteur de l'alimentation, l'ingénierie génomique permet d'accélérer et d'optimiser la sélection des plantes, grâce à la sélection assistée par marqueurs, afin de conserver aux plantes les caractéristiques les mieux adaptées à leur milieu (résistance à la sécheresse, meilleur rendement, etc.) et d'améliorer leur utilisation agronomique. En poussant plus loin le procédé, l'ingénierie génomique permet de modifier les caractéristiques d'êtres vivants, par exemple grâce à la transgénèse, qui consiste à introduire dans un organisme un gène étranger. Les plantes modifiées pourront alors développer de nouvelles caractéristiques, comme la résistance aux herbicides ou la capacité de synthétiser elles-mêmes des toxines insecticides, la résistance à la sécheresse ou à la salinité du sol, etc., réduisant ainsi les risques de pertes. Finalement, l'ingénierie génomique trouve des applications dans le secteur agroalimentaire, tant au niveau des tests de sécurité alimentaires et de la qualité des produits grâce aux techniques d'identification de micro-organismes ou de matériel génétique de pathogènes et contaminants, qu'en traçabilité.

Dans le secteur de l'énergie et de la chimie, l'ingénierie génomique des plantes et des micro-organismes soutient les avancées dans le domaine de la production de molécules et de produits de tout type, à partir de biomasse. Ces molécules peuvent entrer en substitution avec des molécules pétrochimiques existantes ou posséder des propriétés spécifiques propres. La connaissance et la modification du génome de champignons ou bactéries permettent d'optimiser certains procédés de production de ces molécules (éthanol pour le biocarburant, polyhydroxyalcanoates pour des applications plastiques biodégradables), voire de créer de nouvelles voies de production enzymatiques, par exemple à partir de chromosomes recréés par biologie de synthèse ou édition de génome. L'ingénierie métabolique a également donné de nombreux développements industriels en biotechnologies blanches pour accéder à des intermédiaires chimiques variés et des polymères (acide lactique de Cargill permettant de fabriquer le polymère plastique acide polyactique (PLA), ou 1,3 propane-diol (PDO) de la start-up française Metabolic Explorer utilisé par exemple pour produire le polymère polytriméthylène terphtalate).

L'ingénierie génomique peut également contribuer à des plans de protection des eaux, des sols et de l'air. Elle apporte des solutions soit pour la surveillance et l'analyse de l'environnement, par exemple pour l'identification des organismes parasites et pathogènes ou l'étude des pollutions émises par les complexes industriels, soit pour la biodépollution grâce à l'action de microorganismes modifiés.

Dans le secteur de la santé, les avancées en ingénierie génomique permettent notamment le développement de la thérapie génique. Elle consiste à traiter une maladie génétique, par exemple en désactivant un gène muté dysfonctionnel, ou en le remplaçant par une copie saine de ce gène. Dans le domaine de la bioproduction, la modification du génome de certaines espèces microbiennes, voire animales, permet également de produire des biothérapies. En outre, les techniques d'édition du génome permettent de créer des modèles animaux porteurs de maladies et de soutenir les avancées dans l'étude des mécanismes pathogéniques chez l'homme.

Enfin, l'ingénierie génomique est porteuse de services à très haute valeur ajoutée pour les utilisateurs de biotechnologies, notamment au travers du séquençage du génome basé sur les nouvelles générations de séquenceurs.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

L'ingénierie génomique ouvre sur de nombreux marchés d'application dynamiques, notamment dans les secteurs de l'alimentation, de la santé et de

1 – Les technologies associées à l'étude de l'expression des gènes (transcriptomique, protéomique, métabolomique) sont traitées dans la fiche « Métaomique »

l'environnement, dans laquelle la France a le potentiel d'asseoir une position stratégique. Les acteurs français sont notamment bien positionnés dans le secteur de la santé, grâce à une force de recherche, des instituts (CNRS, Généthon, Institut Pasteur, Transgene) et des entreprises (Cellectis, Clean Cells) de renommée internationale. Les applications en médecine préventive et médecine régénérative donnent lieu à la création de spin-off et de projets industriels prometteurs (par exemple Sanofi, Cellprothera, Theravectys), qui commencent à développer une filière française de la médecine de demain. A plus long terme, les méthodes de séquençage rapide permettront d'ouvrir les portes vers le diagnostic exhaustif et rapide, la médecine prédictive modifiant profondément les pratiques dans le domaine de la santé. La protection de l'environnement, la sécurité alimentaire, la surveillance des épidémies ou d'actes malveillants bénéficiera aussi des progrès du séquençage.

L'ingénierie génomique peut par ailleurs fournir des réponses à des défis mondiaux de sécurité alimentaire tout en respectant les contraintes environnementales fixées par le concert international. Elle peut par exemple permettre d'adapter des plantes à des milieux inhospitaliers afin d'accroître les réserves alimentaires, et d'en améliorer la qualité nutritive. Elle permet également d'augmenter les rendements sans recours intensif aux intrants.

Elle répond enfin directement à des enjeux environnementaux, en apportant des alternatives au « tout pétrole », notamment à travers des enzymes capables de transformer la biomasse en un grand nombre de molécules trouvant des intérêts en chimie verte ou dans le domaine des biocarburants.

En santé, la thérapie génique nourrit des espoirs thérapeutiques pour un large nombre de pathologies, notamment pour les cancers et les maladies génétiques rares (ce dernier groupe affecte 3 à 4 millions de personnes en France)[2]. La plupart des maladies qu'elle concerne sont de plus des maladies graves et incurables pour lesquelles il n'existe pas d'autre solution thérapeutique. Les avancées technologiques rendues possibles par les travaux de recherche menés sur ces maladies devraient également bénéficier à d'autres groupes de maladie à fortes prévalences.

2 – www.sante.gouv.fr

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Capteurs** : l'ingénierie génomique est le premier pas vers la conception de capteurs biologiques, qui peuvent être utilisés en santé ou pour des mesures de pollution, de contrôle qualité, etc. ;

■ **Imagerie pour la santé :** l'ingénierie génomique peut intervenir dans la conception et le développement de biomarqueurs, outil essentiel de l'imagerie pour la santé ;

■ **Fabrication additive :** l'ingénierie génomique ouvre les portes vers l'ingénierie tissulaire et à plus long terme vers la reconstitution de tissus biologiques, permettant la fabrication par multicouches de cellules de denrées alimentaires, voire même d'organes artificiels ;

■ **Ingénierie cellulaire et tissulaire** : l'ingénierie génomique est un outil pour la modification de cellules dans le cadre de l'ingénierie cellulaire et tissulaire ;

■ **Immunothérapie** : l'ingénierie génomique, en permettant de sélectionner et de modifier des cellules, peut contribuer à la création de nouvelles générations de cellules pour l'immunothérapie ;

■ **Métaomique :** le séquençage d'ADN est un des outils de base de la génomique, l'un des piliers de la métaomique ;

■ **Solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux :** l'ingénierie génomique permet de sélectionner et de privilégier les caractéristiques des végétaux leur permettant de résister aux ravageurs, maladies et aux environnements inhospitaliers ;

■ **Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition** : le développement de souches de probiotiques est une application directe de l'ingénierie génomique, dans la mesure où ces souches sont sélectionnées et certaines caractéristiques favorisées pour leurs applications industrielles ;

■ **Valorisation et intelligence des données massives** : ces technologies facilitent l'interprétation des données en très grande quantités générées par l'ingénierie génomique et notamment le séquençage du génome ;

■ **Carburants de synthèse** et **Procédés relatifs à la chimie verte** : l'ingénierie génomique permet d'améliorer génétiquement certains microorganismes afin d'optimiser les processus de transformation de la biomasse.

Les marchés

Les principaux marchés liés à l'ingénierie génomique sont globalement dynamiques et en croissance. En amont, le marché mondial du séquençage du génome est estimé à 2,16 Mds € en 2011, et une très forte croissance est attendue au cours des 5 prochaines années, le marché devant atteindre 8,5 Mds € en 2018[3].

Dans le secteur de l'alimentation, le volume du marché des cultures génétiquement modifiées est en constante augmentation. Les surfaces cultivées en OGM représentent, en 2014, 181,5 M ha, soit 11 % de la surface cultivée de la terre, contre environ 1,7 M ha en 1996[4]. Les cultures génétiquement modifiées sont principalement le coton, le soja, le maïs et le colza. Un seul OGM est actuellement cultivé en Europe, le maïs MON810 du groupe américain Monsanto, presque exclusivement planté en Espagne et au Portugal. La France, ainsi que 18 autres pays de l'Union Européenne, reste opposée à la culture d'OGM sur son territoire.

Concernant les biocarburants, l'Union Européenne affiche l'objectif ambitieux d'élever à 20 % la part des énergies renouvelables dans sa consommation finale d'énergie en 2020 (en 2005, la moyenne était de 7 %)[5]. La part des biocarburants dans la demande en carburants liquides pour le transport au sein de l'U.E. est déjà passée de 0,2 % en 2000 à 4,5 % en 2013[6]. Pour atteindre les objectifs à horizon 2020, une contribution plus importante de la biomasse sera nécessaire : l'ingénierie génomique permet d'optimiser la production de biocarburants de 2e génération à partir de biomasse grâce à des microorganismes modifiés. La France devra par exemple mobiliser près de 10 millions de tonnes d'équivalent pétrole (MTep) de biomasse supplémentaires.

Le secteur de la surveillance et de l'analyse de l'environnement représentait un marché mondial de 26,6 Mds € en 2010 et devrait connaître une croissance forte d'environ 10 % par an dans les 10 prochaines années[7]. En France, les dépenses nationales liées aux réseaux de mesure et de surveillance des sols et eaux s'élevaient à 84 M€ en 2010[8]. La majorité du marché repose toutefois sur les méthodes d'analyse chimique (recherche de métaux lourds), et la recherche de contaminants biologiques, qui pourrait faire appel à des techniques d'ingénierie génomique, est plus confidentielle.

Le marché de la thérapie génique est également dynamique[9]. En 2014, plus de 1800 essais cliniques étaient en cours dans le monde, dont 65 % concernent le cancer et 10 % les maladies monogéniques,[10] ce qui souligne l'importance grandissante du cancer comme cible des thérapies géniques. Les essais ont beaucoup évolué au cours de ces dernières années avec notamment le passage de l'animal à l'homme, ce qui constitue une étape importante et prometteuse pour le développement du marché de la thérapie génique. En France, 9 essais cliniques de thérapie génique sur l'homme ont ainsi été autorisés en 2013[11], et en 2012 la Commission Européenne a approuvé pour la première fois la commercialisation d'un produit de thérapie génique, le Glybera® de la société néerlandaise uniQure. Aucun produit de thérapie génique n'a encore été approuvé par la Food and Drug Administration (FDA) mais pour plusieurs autres molécules, les essais s'achèvent ou les demandes d'autorisation sont en cours. Encore dans une phase précoce de développement, le marché mondial de la thérapie génique est estimé à 500 M$ en 2020[12] .

Enfin, sur le marché de la bioproduction, la France est un marché dynamique avec 40 sites de production en 2013, dont les derniers ont été créés au cours des dernières années, sur les 744 sites mondiaux existants. 350 PME nationales sont positionnées sur ce marché, qui compte 13 000 emplois en France, et la demande en biomédicaments est passée de 5 à 15 % entre 2000 et 2012[13].

Les défis technologiques à relever

En dépit des avancées technologiques rapides, des verrous subsistent. Dans le domaine du séquençage, la lenteur et le coût du processus ont limité les

3 – Marketsandmarkets

4 – ISAAA

5 – Ademe, « Synthèse. Feuille de route biocarburants avancés », 2011

6 – Inra, 2013

7 – Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, Marché mondial de l'environnement et perspectives pour les éco-entreprises françaises, 2010

8 – SOeS, « L'économie de l'environnement en 2012, édition 2014 »

9 – Concernant la thérapie cellulaire, se référer à la fiche « Ingénierie tissulaire et cellulaire »

10 – Inserm

11 – ANSM

12 – Research and Markets

13 – LEEM, 2014

premières générations de séquenceurs à un screening par espèce ; les nouvelles générations tendent vers un processus plus rapide (screening haut débit) et moins coûteux, permettant des approches de séquençage par individu. Le traitement préalable de l'échantillon à analyser est un défi complémentaire à celui de la technologie de séquençage elle-même.

Dans le domaine de la transgénèse, l'insertion du gène n'est pas encore complètement maîtrisée. Une meilleure connaissance des voies d'insertion des vecteurs et de la localisation dans le génome du gène introduit est indispensable. Le transfert de gènes doit également être assuré de manière sûre et efficace et garantir la stabilité de l'expression du gène introduit. Par ailleurs, la transgénèse est majoritairement réalisée aujourd'hui de manière aléatoire, et les nouvelles générations de séquenceurs constituent des outils précieux pour cela. L'enjeu est maintenant de cibler des modifications très précises, ainsi que de développer des services de caractérisation de l'impact et du contrôle qualité de ces interventions sur le génome.

Dans le domaine de l'environnement et de l'énergie, les défis à relever consistent à optimiser les micro-organismes pour parvenir à lever les derniers verrous technologiques et atteindre des rendements permettant l'industrialisation des processus, et ainsi à développer les opportunités offertes par la biomasse. En particulier, ces avancées devraient permettre l'utilisation de ressources non alimentaires (parties non comestibles des plantes, ligno-cellulose, déchets, …), limitant ainsi les conflits d'usage.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

De manière générale, la France doit faire face à une forte concurrence de pays comme la Chine et les États-Unis, notamment sur l'offre de services en ingénierie génomique. La consolidation et la protection des portefeuilles de brevets est clé pour conserver la position des acteurs français dans ce domaine.

Pour les petites entreprises, le défi commercial consiste à se positionner sur la chaîne de valeur de l'ingénierie génomique. Si le segment de l'instrumentation, déjà saturé par des leaders étrangers, est difficilement accessible à des PME, la sous-traitance de certaines étapes de la chaîne constitue en revanche une opportunité. En effet, des PME positionnées en chimie ou biochimie, en microfluidique, en imagerie, en bioinformatique, peuvent se diversifier dans l'ingénierie génomique en proposant des services ou des produits sur une étape précise du processus.

Par ailleurs, certains marchés internationaux et notamment celui des États-Unis peuvent être plus prometteurs à court terme, notamment dans le domaine de la santé. En effet, la question du système de paiement des frais est cruciale pour les acteurs de l'ingénierie génomique développant une démarche préventive, voire prédictive. Dans un système faisant porter la charge des frais de santé aux particuliers, comme aux États-Unis, des technologies permettant de réduire les coûts sur le long terme sont attractives. La question du circuit de remboursement des frais de santé doit ainsi être prise en compte par les entreprises se positionnant sur ce segment.

Les enjeux réglementaires

Le principal enjeu réglementaire dans le domaine de l'ingénierie génomique est lié au problème d'acceptabilité sociétale que soulèvent ces technologies. Le public français adopte une position conservatrice vis-à-vis des avancées dans ce domaine, notamment en raison de préoccupations éthiques, ainsi que de craintes pour la sécurité sanitaire des aliments et la sécurité de l'environnement.

La récente réforme de l'Union Européenne concernant l'autorisation de la culture d'OGM sur le territoire de ses pays membres tente de débloquer ce dossier. La Commission Européenne a autorisé le 24 avril 2015 l'importation et la commercialisation de 17 OGM, destinés à l'alimentation humaine et animale. Une réforme de la législation réserve aux États membres la possibilité d'interdire l'utilisation de ces organismes sur son territoire.

Dans le domaine de la santé, l'acceptabilité est plus facile du fait notamment des visées thérapeutiques prometteuses. Les barrières éthiques et morales demeurent malgré tout très présentes en ce qui concerne la manipulation du génome humain. Les craintes de dérives eugéniques sont ainsi régulièrement citées même si la loi de bioéthique du 29 Juillet 2009 précise que toute pratique eugénique tendant à l'organisation de la sélection des personnes est interdite : La modification du génome des cellules germinales est dans ce but strictement interdite, même dans le cadre de recherche thérapeutique[14].

14 – www.assemblee-nationale.fr

Analyse AFOM

ATOUTS

Compétences françaises importantes (recherche et industriels) de niveau international

Développement de portefeuilles de brevets

FAIBLESSES

Pas de leaders français sur le marché de l'instrumentation du séquençage

Certains marchés applicatifs sont trop peu développés (cultures OGM, biocarburants), poussant certains acteurs français à réaliser leur développement hors Union Européenne

OPPORTUNITÉS

Très nombreuses applications possibles

Dynamisme du secteur et développement constant de techniques innovantes

Évolution de la règlementation européenne sur l'autorisation de cultures OGM

Résultats positifs de plusieurs essais cliniques

MENACES

Problème d'acceptabilité sociétale et restrictions réglementaires, notamment sur la recherche sur les cellules souches embryonnaires et la présence d'OGM dans les produits alimentaires

Forte concurrence internationale

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

■ Pour les PME dans le domaine de l'ingénierie génomique, notamment sur les secteurs de la santé et de l'alimentation, projeter un développement sur les marchés internationaux ;

■ Recherche les opportunités de se positionner en sous-traitance sur l'ingénierie génomique, sur une étape de la chaîne de valeur, en proposant des produits ou services, notamment pour des PME positionnées en chimie, biochimie, microfluidique, bioinformatique, etc.

Concernant les pouvoirs publics :

■ Concilier pour certaines applications, notamment l'amélioration d'espèces et de variétés, le maintien de la compétitivité de la France sur l'ingénierie génomique avec les préoccupations éthiques et sociétales liées à la modification d'organismes vivants ;

■ Indépendamment des questions sociétales et éthiques, il est important de soutenir pour des raisons de compétitivité la politique de brevets des sociétés françaises ;

■ Identifier et soutenir le développement des « pépites » françaises existantes dans le domaine de l'ingénierie génomique afin de favoriser leur rayonnement à l'international, en privilégiant le maintien des entreprises sur le territoire français malgré l'éventuelle prise de participation de capital étranger ;

■ Soutenir les développements en bio-informatique et la mise en place de formations permettant de développer le potentiel humain (en bio-informatique et en bio-production).

Acteurs clés

Organismes de recherche

Des compétences françaises de recherche sur l'ingénierie génomique sont rassemblées aussi bien dans des EPST[15] tels que **l'Inserm, le CNRS, le CEA et l'INRA,** que dans des structures physiques telles que **l'Institut Pasteur, l'Institut Curie**, **l'Institut de Génétique et de Biologie Moléculaire et Cellulaire (IGBMC)**… **L'Hôpital Necker** et le **Généthon** sont les spécialistes français de la thérapie génique, ce dernier étant un organisme de recherche translationnelle visant à accélérer la mise en application médicale des résultats scientifiques issus de la recherche fondamentale sur les thérapies géniques. Enfin, **France Génomique** est une infrastructure nationale rassemblant les plateformes opérationnelles en génomique, telles que la plateforme MGX à Montpellier.

Start-up et PME

De nombreuses start-up et PME sont positionnées à différents niveaux de la chaîne de valeur de l'ingénierie génomique et sur différents secteurs. Plusieurs d'entre elles sont positionnées en santé, telles que **Cellectis**, qui a développé des outils moléculaires permettant de reprogrammer précisément et à la demande le génome de tout organisme vivant ainsi que des immunothérapies fondées sur des cellules T ingénierées, mais également **Clean Cells**, **In-Cell-Art**, **IntegraGen**, **Hybrigenics**, **LFB Biomanufacturing**, **Transgene (BioMérieux)**, **Cellprothera** ou encore **Theravectys**. D'autres sociétés proposent des services d'analyse d'organismes ou de la qualité de produits, telles que **Genosafe** et **Genoscreen**, ou des analyses environnementales comme **Watchfrog**. D'autres sociétés enfin sont positionnées sur la production de biocarburants, telles que **Global Bioénergies**, **METabolic Explorer ou Deinove**.

Grands groupes

La France est absente du segment de l'instrumentation en ingénierie génomique. En revanche, les technologies d'ingénierie génomique sont utilisées et maîtrisées par de très nombreux groupes français d'envergure internationales sur différents secteurs : en santé (**Sanofi**, **Servier**, etc.), en agroalimentaire (**Limagrain**, **Lesaffre**, etc.), dans le domaine des biocarburants (**Tereos**, **Cristal Union**, **CIMV**, etc.) ou plus en amont des acteurs spécialisés dans l'analyse tels qu'**Eurofins**.

Écosystème de l'innovation

Les entreprises de l'ingénierie génomique sont soutenues par de nombreux pôles de compétitivité, dont **Alsace BioValley**, **Medicen**, **Lyonbiopôle**, **CBS**, **Céréales Vallée**, **Axelera**, et **IAR**, ainsi que par des Instituts Carnots et instituts spécialisés sur certaines pathologies, tels que les **Carnot LISA** (Lipides pour l'Industrie et la Santé), **CED2**, **Institut du cerveau et de la moëlle épinière** (ICM), **Voir et Entendre**, **Curie-Cancer** et **Pasteur Maladies Infectieuses**. Le **Génopole d'Evry,** centre de recherche et de développement en génomique, héberge également des start-ups positionnées sur ce secteur.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

15 – Établissements Publics à caractère Scientifique et Technologique

27 Solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat,, Santé et bien-être, Sécurité
ALIMENTATION

➤ **Correspond à une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Phytoprotection, biocontrôle, défenses naturelles des plantes

Définition et périmètre

Le modèle conventionnel de protection et de stimulation de défense ou de croissance des végétaux s'appuie sur l'agrochimie, qui apporte, à un problème donné affectant les cultures, une solution à haut degré d'efficacité mais dont les impacts sur l'environnement sont de plus en plus prégnants : produits phytosanitaires et engrais de synthèse. Afin de répondre à des enjeux de réduction des intrants dans le secteur agricole, de nouvelles approches se développent en combinaison avec les approches conventionnelles, afin de réduire la pression des bio-agresseurs, de renforcer les résistances des plantes ou de stimuler leur croissance. Au niveau de la plante elle-même, il peut s'agir de combinaisons des produits de synthèse conventionnels avec des produits de biocontrôle des ravageurs et maladies, de modification du génome des plantes afin de leur conférer des propriétés les rendant plus résistantes ou mieux adaptées à leur environnement, ou des procédés innovants de stimulation des défenses naturelles des plantes. Si ces nouvelles solutions de protection et de stimulation des végétaux ne remplacent pas complètement les solutions conventionnelles, elles leur sont complémentaires et permettent une approche raisonnée de gestion des cultures.

Les produits de biocontrôle sont des agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent en particulier :

- Les macro-organismes ;
- Les produits phytopharmaceutiques comprenant des micro-organismes, des médiateurs chimiques comme les phéromones et les kairomones, ainsi que des substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale[1].

Leur action peut se concentrer sur les bio-agresseurs, directement ou indirectement, ou sur la plante elle-même, pour stimuler ses défenses naturelles. Les Stimulateurs de Défenses des Plantes (SDP) ou éliciteurs sont des molécules reconnues par la plante comme le signal d'une agression, et qui induisent une résistance accrue de la plante à cette agression.

La modification du génome des plantes afin d'augmenter leur résistance aux bio-agresseurs ou à des conditions difficiles fait partie de ces approches innovantes permettant de réduire le recours aux produits phytosanitaires de synthèse[2].

Concernant la stimulation des plantes, de nouvelles approches se développent également, via notamment les biostimulants. Il s'agit de matériels dont la fonction est de stimuler les processus naturels des plantes pour améliorer l'absorption des nutriments, leur efficience, la tolérance aux stress abiotiques, et la qualité des cultures[3].

Par ailleurs, des outils et techniques agronomiques prophylactiques, s'appliquant aux systèmes de culture et facilitant la gestion et la croissance des plantes se développent également : outils moléculaires de diagnostic, indicateurs précoces de présence de ravageurs, imagerie pour analyse non destructive des végétaux, surveillance du stress hydrique grâce à des drones, rotation des cultures, étouffement des mauvaises herbes[4]…

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Face à une demande de produits agricoles toujours en hausse en raison de l'augmentation démographique mondiale, l'agriculture repousse ses limites grâce à des modèles de cultures intensifs et un recours important aux intrants. Les ressources (terres agricoles, eau) sont cependant finies et les impacts négatifs de ces modèles sur l'environnement et les populations imposent à long terme la recherche de nouveaux moyens pour l'agriculture. De nouveaux outils de protection et de stimulation des végétaux permettent de répondre à ces enjeux, en proposant des solutions alternatives s'inscrivant dans une approche de réduction des risques pour la santé humaine, l'environnement et les ressources agricoles tout en préservant les rendements. Le marché des solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux est en plein essor et renferme des perspectives de développement intéressantes au niveau mondial, aussi bien dans les pays développés pour améliorer les systèmes existants, que dans les pays en développement afin de favoriser de meilleurs rendements dans le secteur agricole.

1 – Article L253-6 du Code rural et de la pêche maritime

2 – Cf. fiche « Ingénierie génomique »

3 – Définition de l'*European Biostimulants Industry Council (EBIC)*, 2014

4 – Cf. Fiche « Capteurs » pour plus de détails

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Capteurs** : En parallèle de solutions de biocontrôle et de SDP, les capteurs mesurant les paramètres météorologiques, les paramètres physiques ou chimiques du sol, les paramètres architecturaux ou biochimiques de la plante, l'état hydrique, etc., sont des outils innovants pour la protection et la stimulation des végétaux.

■ **Ingénierie génomique :** L'ingénierie génomique permet d'étudier les relations génotype-phénotype de plantes, et de sélectionner et privilégier les caractéristiques des végétaux leur permettant de mieux résister aux ravageurs, maladies et aux environnements inhospitaliers.

■ **Métaomique** : les technologies de la métaomique permettent d'étudier les mécanismes de défense et de croissance des plantes, ainsi que l'impact de l'environnement sur ceux-ci, et également d'identifier les molécules ou organismes stimulateurs.

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique** : Les techniques de modélisation et de simulation permettent d'anticiper les réactions des plantes aux solutions de protection ou de stimulation qui leur sont appliquées, d'optimiser le procédé de conception de ces solutions et de les tester à grande échelle en champ.

■ **Valorisation et intelligence des données massives** : l'étude des caractéristiques des plantes, de la relation génotype-phénotype et des paramètres intervenant dans leur croissance génère des quantités massives de données, que ces technologies aident à traiter.

Les marchés

Le marché du biocontrôle en général, s'il ne représente que de faibles volumes vis-à-vis du marché conventionnel de la phytoprotection, est en croissance rapide. Le marché mondial est estimé à environ 1,6 Mds€ et le marché européen à 550 M€ en 2013 ; le marché français représente 100 M€, soit 5 % du marché de la protection phytosanitaire, et sa croissance annuelle est de l'ordre de 15 à 20 %[5]. Plus de 70 PME et grands groupes sont positionnés en France sur ce marché, les grands groupes tendant à racheter les petits entreprises pionnières du biocontrôle (Lesaffre, Lallemand Plant Care).

Le marché des SDP est encore embryonnaire. En effet, la procédure d'homologation lourde et coûteuse bloque la mise sur le marché de produits dont le développement technique est par ailleurs complexe. De plus, les acteurs positionnés sur ce marché sont principalement des PME (Goëmar, Agrolor, Biophytech en France, GlycoGenesis ou Eden Biosciences aux USA) ce qui limite les possibilités d'investissement. Seuls quelques produits SDP *stricto sensu* sont commercialisés aujourd'hui en France, comme par exemple le *Bacillus subtilis QST 713* (bactérie), le *trichoderma harzianum* (champignon) ou la *laminarine* (extrait purifié d'algues)[6].

Le marché mondial des biostimulants est estimé à environ 1 Mds€ en 2013, soit 0,6 % du marché mondial des intrants utilisés en production végétale (150 Mds€)[3]. En Europe, le marché des biostimulants est estimé par l'EBIC à environ 500 millions d'euros. Sa croissance devrait rester supérieure à 10 % dans les prochaines années, et il devrait atteindre 800 M€ en Europe en 2018.[7]

Les défis technologiques à relever

Le développement de nouvelles solutions de protection et de stimulation des végétaux passe par la compréhension des processus complexes de croissance des plantes et de leurs interactions multiples avec leur environnement. Les connaissances doivent être approfondies afin d'affiner les modes d'action des nouveaux produits, préparés aujourd'hui empiriquement, et d'anticiper tous les effets possibles sur l'écosystème des plantes.

Dans le domaine du biocontrôle, le passage du laboratoire au champ est encore aléatoire pour de nombreux produits. La transposition sur grandes cultures des résultats obtenus sur des plantes modèles, en conditions contrôlées, est complexe. Les performances des solutions sont encore très irrégulières, la durabilité de leur activité et leur toxicité éventuelle sont encore mal maîtrisées, ce qui constitue un frein important à leur adoption par les agriculteurs. Finalement, leur utilisation conjointe à celle de produits conventionnels de protection doit être mieux explorée afin d'optimiser leurs effets combinés.

5 – IBMA, 2014 : *Rapport global sur le marché du biocontrôle*

6 – MAAF, 2014 : *Produits de stimulation en agriculture visant à améliorer les fonctionnalités biologiques des sols et des plantes – Étude des connaissances disponibles et recommandations stratégiques*

7 – Données de l'*European Biostimulants Industry Council (EBIC)*

Dans le domaine des cultures génétiquement modifiées, des verrous technologiques subsistent notamment dans la maîtrise de la transgénèse et dans la garantie de la stabilité du gène introduit[8].

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le premier défi consiste à augmenter la palette de produits disponibles. Très peu de solutions de type stimulateurs de défense des plantes ou biostimulants sont aujourd'hui homologuées, en particulier pour les grandes cultures.

Par ailleurs, les solutions innovantes de protection et stimulation des végétaux comportent un enjeu crucial d'accompagnement et de sensibilisation des agriculteurs à de nouvelles approches, en combinaison avec les produits conventionnels. La clarification de leur mode d'utilisation, plus complexe que celui des produits phytosanitaires conventionnels, est clé pour assurer leur efficacité. Le coût de ces solutions, souvent supérieur à celui des solutions conventionnelles, constitue également un frein important à leur adoption.

En outre, la chaîne de distribution doit être optimisée et intégrée entre distributeurs et utilisateurs, certaines solutions présentant des contraintes de temps importantes, comme par exemple les délais d'éclosion des œufs d'insectes utilisés comme auxiliaires pour la lutte contre les ravageurs.

8 – Cf. Fiche « Ingénierie génomique »

Enfin, la transition vers un modèle de biocontrôle, plus préventif et intégrant de multiples paramètres de l'écosystème de cultures, peut comporter des coûts associés à l'incertitude du dosage ou de la planification de ces traitements, qui sont lourds à porter pour les agriculteurs.

Concernant les plantes génétiquement modifiées, l'acceptation sociétale de cette solution représente un défi majeur en France[1].

Les enjeux réglementaires

La directive européenne 2009/128/CE oblige les États membres à adopter les plans d'action nationaux en vue de réduire les risques et les effets de l'utilisation des pesticides sur la santé humaine et l'environnement. Elle vise également à encourager l'élaboration et l'introduction de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et de méthodes ou de techniques de substitution en vue de réduire la dépendance à l'égard de l'utilisation des pesticides.

Le plan Ecophyto en est la déclinaison française. Dans ce cadre, le développement de nouvelles solutions de protection et stimulation des végétaux apporte des réponses aux enjeux de réduction des intrants en agriculture.

Cependant, les produits de biocontrôle et de stimulation de défenses des plantes sont soumis à la même réglementation que les produits phytosanitaires (Règlement CE n°1107/2009), et doivent bénéficier d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) pour un usage précis. De même, les biostimulants doivent bénéficier d'une autorisation de mise sur le marché, conformément aux articles L255-1 et suivants du Code rural et de la pêche maritime sur la mise sur le marché et l'utilisation des matières fertilisantes, de leurs adjuvants et des supports de culture. L'efficacité de ces solutions étant moindre et moins régulière que celle des produits conventionnels, la procédure d'homologation, qu'elle concerne les produits phytopharmaceutiques ou les matières fertilisantes, est souvent lourde et coûteuse. L'ordonnance 2015-615 du 4 juin 2015 relative à la mise sur le marché et à l'utilisation des matières fertilisantes, des adjuvants pour matières fertilisantes et des supports de culture a déjà modifié l'article L253-1 du Code rural et de la pêche maritime pour tenir compte de ces nouveaux produits et de leur spécificité; cependant, le renforcement d'une réglementation plus adaptée à la

spécificité des produits de biocontrôle, des solutions de stimulation de défense des plantes et des biostimulants est nécessaire pour favoriser le développement de la gamme de produits disponibles.

De même, le développement des technologies OGM présente de forts enjeux réglementaires, la réglementation nationale interdisant aujourd'hui l'utilisation de cultures OGM sur le territoire français.

Analyse AFOM

ATOUTS

Tissu dynamique d'acteurs académiques et d'acteurs industriels, majoritairement des PME, positionnés sur le biocontrôle et les biostimulants

Dynamique d'acquisition de PME positionnées sur le biocontrôle par des grands groupes industriels (Lallemand Plant Care, Lesaffre)

Quelques acteurs internationaux implantés en France sur le biocontrôle (site R&D de Bayer CropSciences à Lyon)

FAIBLESSES

Absence de grands groupes agrochimiques français

Difficulté à transposer les résultats du laboratoire au terrain pour les produits biologiques et de SDP

Nombres de solutions homologuées limitées, notamment sur les grandes cultures

Peu de perspectives sur le biocontrôle des adventices

OPPORTUNITÉS

Nécessité d'assurer la production alimentaire pour répondre aux besoins de la population tout en préservant les ressources naturelles

Position proactive de l'Europe sur les questions d'agro-écologie

Adaptation de la réglementation pour favoriser les produits de biocontrôle et certains biostimulants, et favoriser une diminution de l'utilisation des intrants conventionnels en agriculture (Loi n° 2014-1170 du 13 octobre 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt et article 55 concernant les certificats d'économie de produits phytosanitaires)

Marché d'application important sur le territoire français, la France étant la première puissance agricole européenne, avec une grande diversité de cultures

Acceptation sociétale forte des enjeux environnementaux et de la nécessité de trouver de nouvelles approches pour l'agriculture

MENACES

Efficacité moindre et irrégulière des produits de biocontrôle et biostimulation vis-à-vis des produits conventionnels, combinés à des contraintes d'utilisation, et à un coût élevé de ces produits

Lourdeur et coût élevé de la procédure d'homologation des produits innovants de protection et stimulation des plantes

Problème d'acceptabilité sociétale des produits OGM

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

■ Anticiper les évolutions réglementaires concernant la phytoprotection et se positionner sur une offre de produits de biocontrôle répondant aux préoccupations aussi bien des pouvoirs publics que des consommateurs et des agriculteurs ;

■ Construire une communication autour des produits de biocontrôle et de SDP permettant aux agriculteurs d'intégrer cette démarche dans leurs pratiques de phytoprotection.

Concernant les pouvoirs publics :

■ Soutenir le réseau d'acteurs académiques et de R&D (ex. RMT Elicitra) afin de développer les connaissances fondamentales sur les systèmes de protection des plantes ;

■ Soutenir le développement du consortium public-privé sur le biocontrôle à l'initiative de l'INRA ;

■ Favoriser une homologation des produits plus rapide et moins coûteuse en :

— Renforçant les équipes d'évaluation afin de raccourcir les délais ;

— Adaptant les critères d'évaluation aux mécanismes d'action spécifiques aux produits de biocontrôle et biostimulation ;

— Facilitant la soumission de dossier d'homologation (taxes d'évaluation, etc.).

■ Renforcer les dispositifs incitatifs à l'adoption de nouvelles solutions de protection et stimulation des végétaux par les agriculteurs, tels que les certificats d'économie de produits phytosanitaires ;

■ Développer un programme d'accompagnement et de sensibilisation des agriculteurs aux nouvelles approches combinées de protection et stimulation des végétaux.

Acteurs clés :

Organismes de recherche

Des compétences françaises de recherche sur l'ingénierie génomique sont rassemblées aussi bien dans des EPST[9] tels que **l'INRA** (notamment avec le réseau **INDRES**), des EPIC[10] comme le **Cirad**, que dans des structures physiques telles que les instituts techniques membres du **réseau Acta**, comme par exemple **Arvalis**.

Start-ups et PME

De nombreuses start-ups et PME sont positionnées sur diverses solutions de protection et stimulation des végétaux, et particulièrement sur les solutions de biocontrôle et/ou biostimulation, telles que Goëmar, Biophytech, Elicityl, Vivagro, Rivale, ActionPin, Biosystèmes France, Agri-synergies, Biotop, Agrauxine (Lesaffre)…

Grands groupes

La France dispose de peu de grands groupes agrochimiques ; cependant **Limagrain** est positionné sur l'amélioration variétale et certaines solutions de protection des végétaux. L'Allemand **Bayer CropSciences** a installé un centre de recherche dédié à la protection des plantes à Lyon, et **De Sangosse** est positionné sur les solutions de biocontrôle. Ces groupes sont partenaires de réseaux fédérant les industriels positionnés sur le biocontrôle et la biostimulation, comme par exemple **IBMA (International Biocontrol Manufacturers Association)** ou **EBIC (European Biostimulant Industry Council).**

Écosystème de l'innovation

Les acteurs français proposant des solutions innovantes de stimulation et protection des végétaux sont soutenus par diverses structures, dont des pôles de compétitivité, par exemple **Végépolys** et **Céréales Vallée,** mais également le **RMT (Réseau Mixte Technologique) Elicitra,** ou le **CRT (Centre de Ressources Technologiques) Vegenov**.

9 – Établissements Publics à caractère Scientifique et Technologique

10 – Établissements Publics

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

28 Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat,, Santé et bien-être, Sécurité
ALIMENTATION

➤ **Correspond à une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Microorganismes, nutrition, biopréservation, aliments fonctionnels, santé digestive, fermentation

Définition et périmètre

Des microorganismes sont utilisés depuis de nombreuses années dans la fabrication de produits alimentaires fermentés, tels que le yaourt, le fromage ou le vin. Certains de ces microorganismes sont aujourd'hui utilisés dans un but fonctionnel, pour leurs bénéfices sur la santé ou pour prolonger la conservation des aliments. Les probiotiques sont des micro-organismes (bactéries, levures…) exerçant une influence sur leur environnement, par exemple en inhibant le développement d'autres micro-organismes indésirables ou pathogènes. Ils sont produits grâce à un procédé de fermentation à partir d'une souche sélectionnée. Les propriétés des probiotiques, telles que leurs conditions de croissance, leur comportement en présence d'autres bactéries, leur production de métabolites (polysaccharides, bactériocines…), etc., sont propres à chaque souche, et le processus de sélection d'une souche de probiotiques peut durer plusieurs années. Ces micro-organismes trouvent des applications dans le secteur alimentation, à la fois en nutrition humaine et animale et en biopréservation des aliments.

En nutrition humaine et animale, les probiotiques sont définis comme des « microorganismes vivants qui, lorsqu'ils sont administrés en quantités adéquates, exercent une action bénéfique sur la santé de l'hôte »[1]. En effet, ils permettent de réguler l'activité microbienne au sein de l'organisme, via des mécanismes d'action intracellulaires, par exemple en produisant des composés inhibiteurs des agents pathogènes ou en produisant des vitamines et enzymes digestives. Des études ont analysé l'effet des probiotiques sur un grand nombre de troubles, dont les maladies inflammatoires de l'intestin, les infections vaginales, la cirrhose du foie… Cependant, les effets des probiotiques ont principalement pu être mis en évidence pour l'appareil digestif et l'amélioration de la fonction immunitaire.

En nutrition humaine, du fait de leurs effets bénéfiques pour la santé digestive des hôtes, les bactéries probiotiques sont intégrées comme ingrédients dans des aliments, dits « aliments fonctionnels » : yaourts, céréales, boissons. Ils sont également vendus sous forme de compléments alimentaires (gélules, comprimés, sachets…) avec une action ciblée en fonction de la souche utilisée: améliorer la digestion ou la tolérance alimentaire, renforcer l'immunité, etc. En alimentation animale, les probiotiques sont employés comme complément digestif, afin d'améliorer l'équilibre microbien de la flore intestinale et de prévenir les maladies, favorisant ainsi une croissance importante.

Certains probiotiques ont obtenu des AMM et sont commercialisés en pharmacie, par exemple pour le traitement d'appoint de la diarrhée (*Saccharomyces boulardii* dans la spécialité Ultra-Levure, *Lactobacillus fermentum* et *Lactobacillus delbrueckii* dans la spécialité Lactéol). Cependant, les probiotiques pourraient également trouver des applications en santé au-delà des systèmes digestifs et immunitaires. Des travaux de recherche (Inra, travaux du Consortium MetaHit[2]) tendent à démontrer que la flore intestinale, et donc l'apport de probiotiques, aurait un impact sur l'axe cerveau-intestin, la santé buccale, la santé de la peau ou les allergies. Ce domaine d'application est cependant encore embryonnaire, les publications scientifiques sur le sujet étant trop peu nombreuses.

Afin de conserver intactes les propriétés des probiotiques dans leur milieu hôte, ceux-ci peuvent ensuite être encapsulés dans des matières protectrices, telles que l'alginate, le carraghénane, la gomme gellane, la gélatine, l'amidon, etc. Différentes techniques d'encapsulation ont été développées : atomisation, gélification ionotropique, extrusion, émulsion, … Ils peuvent ensuite être intégrés à un produit alimentaire.

Le cas de la biopréservation

Les microorganismes ont toujours été utilisés par l'homme dans des procédés de fermentation modifiant les caractéristiques organoleptiques des matières premières permettant ainsi la conservation des aliments. Il s'agit ici de la plus ancienne technologie de bioprotection des aliments. Plus récemment, des souches bioprotectrices sont utilisées dans des produits non fermentés réfrigérés, dont les caractéristiques organoleptiques ne sont pas liées au développement des micro-organismes, dans le but d'allonger la date limite de consommation (DLC) ou de prévenir le développement d'un danger bactérien. Cette technologie consiste à ajouter des microorganismes,

1 – Définition de l'Organisation Mondiale de la Santé

2 – Mathilde Jaglin. Axe intestin-cerveau : effets de la production d'indole par le microbiote intestinal sur le système nerveux central. Agricultural sciences. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. ; http://www.metahit.eu

sélectionnés pour leur capacité à inhiber la croissance d'une flore pathogène ou d'altération, à des aliments, généralement conditionnés sous atmosphère protectrice ou sous vide. Trois filières agroalimentaires sont principalement concernées : les produits carnés, les produits fromagers et les produits de la mer. Il s'agit d'une technologie émergente complexe, la croissance des microorganismes ainsi que leurs effets inhibiteurs étant encore mal maîtrisés.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

De par leurs applications en nutrition, les souches probiotiques répondent à des enjeux de santé, notamment digestive. Les récentes avancées scientifiques démontrent l'importance du microbiote intestinal dans la santé humaine et animale, ainsi qu'un lien avec les maladies métaboliques ou cardiovasculaires. Il s'agit donc d'une source majeure d'innovation dans les domaines alimentaires et médicaux. Leur développement est d'ailleurs favorisé par un intérêt croissant des consommateurs pour leur santé et la prévention des maladies par des moyens naturels.

En nutrition animale, l'interdiction en Europe de l'utilisation des antibiotiques comme promoteurs de croissance en 2006 a créé un fort besoin d'alternatives pour préserver les rendements des élevages en minimisant les maladies et les pertes. Les probiotiques, si leur utilisation n'est pas encore très développée en alimentation animale, constituent un axe d'innovation prometteur qui répond à un vrai besoin.

Concernant la conservation des aliments, la recherche de technologies moins coûteuses que le froid ou alternatives à l'utilisation d'additifs chimiques et d'antibiotiques est un enjeu mondial. Dans ce contexte, la biopréservation des aliments suscite un intérêt grandissant.

Par ailleurs, le gaspillage alimentaire est une préoccupation mondiale. La France affiche une volonté d'action sur ce front avec un objectif de réduction de moitié du gaspillage alimentaire d'ici 2025 prévu dans le Pacte national de réduction du gaspillage alimentaire[3]. Bien que les aliments les plus gaspillés ne comportent pas de DLC (fruits, légumes, produits de boulangerie)[4], la biopréservation, et notamment les avancées dans le domaine des « active packaging », pourraient apporter des éléments de réponse à cette problématique.

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Ingénierie génomique et métaomique :** Le séquençage à haut débit et les technologies de métaomique permettent d'étudier les systèmes complexes, dont le microbiote intestinal, et peuvent faciliter la sélection de souches probiotiques en identifiant leurs caractéristiques clés et en analysant leur comportement ;

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique :** Les techniques de modélisation et simulation permettent également d'accélérer la sélection de souches et la gestion des souchothèques, en permettant d'anticiper le comportement des probiotiques dans leur environnement hôte ;

■ **Valorisation et intelligences des données massives :** Les procédés de sélection et de production de probiotiques impliquent la génération d'une grande quantité de données, que les technologies de valorisation et intelligence des données massives permettent de traiter.

Les marchés

Le marché des probiotiques est globalement en croissance, porté surtout par le dynamisme des produits avec probiotiques en nutrition humaine. En 2013, il était estimé à 26 milliards de dollars, avec l'écrasante majorité des usages de probiotiques destinés à l'alimentation humaine, et dominés par les leaders mondiaux Chr. Hansen (Danemark), Danisco (Danemark), Danone (France), Nestlé (Suisse), l'Institut Rosell-Lallemand (Canada), BioGaia Biologics (Suède) et Yakult (Japon).

En nutrition humaine, le marché mondial des probiotiques était estimé à 23,4 milliards de dollars en 2013, et devrait atteindre 36 milliards de dollars en 2018[5]. 50 souches différentes sont commercialisées aujourd'hui et intégrées à des aliments (en grande majorité des yaourts) ou vendues en compléments alimentaires, qui représentent 10 % des produits

3 – Données du *Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt*

4 – Avis de l'ANSES 2014-SA-0061

5 – Données de *Probiota*, Conférence 2014

probiotiques. Si le marché des yaourts avec probiotiques est très dynamique en Asie et aux États-Unis, en Europe il s'agit d'un marché plus mature, et les innovations à base de probiotiques sont moins nombreuses, le cadre réglementaire n'étant pas encore clairement défini par l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA).

En nutrition animale, le marché mondial des probiotiques était estimé à 580 millions de dollars en 2014[6] et destiné principalement à la volaille. Si ce marché est encore peu développé, il devrait augmenter à un CAGR de 7,6 % d'ici 2020[7], porté surtout par la croissance en Asie-Pacifique.

Le cas de la biopréservation

Le marché de la biopréservation est encore un marché émergent, pour lequel peu de données sont disponibles. En France, plus de 10 Mt de déchets alimentaires sont produits chaque année, dont 1,2 Mt de produits encore consommables, la majorité étant gaspillée par les ménages. Les souches bioprotectrices, en prolongeant la durée de vie des produits, pourraient fournir des solutions pour réduire le gaspillage. Les applications industrielles sont cependant encore limitées, cette technologie étant relativement récente.

Les défis technologiques à relever

En nutrition, il existe des barrières au niveau de l'efficacité des probiotiques. En effet, les souches sélectionnées doivent pouvoir survivre pour interagir avec l'hôte. Or, les microorganismes probiotiques sont soumis à de fortes perturbations, à la fois durant le procédé de fabrication des produits (décongélation, fermentation, stockage) et au sein du tractus digestif (concentration en oxygène, pH…), qui peuvent impacter leur fonctionnalité. Les connaissances actuelles ne permettent pas de prédire l'impact réel de ces perturbations sur les probiotiques, ainsi que les réactions qu'ils peuvent mettre en place face à ces perturbations. L'action des probiotiques au sein du tractus digestif est ainsi difficile à prévoir, et leur efficacité ne peut être totalement garantie. Le défi consiste donc en premier lieu à développer les connaissances fondamentales sur la biologie des systèmes complexes afin de mieux prévoir le comportement des probiotiques dans leur environnement, et en second lieu à développer les techniques de protection des probiotiques, telles que l'encapsulation.

Concernant la biopréservation, les mêmes barrières limitent les applications industrielles. L'impact des probiotiques sur l'évolution des systèmes microbiens étant mal connu et les mécanismes d'action encore mal maîtrisés, il est difficile de mesurer l'efficacité des flores de microorganismes sur la préservation des aliments ainsi que de s'assurer de leur contrôle et de leur innocuité. L'approfondissement des connaissances ainsi que la modélisation du comportement des souches bioprotectrices dans un système microbien pourraient permettre de lever des verrous dans ce domaine.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'effet bénéfique des probiotiques sur la santé constitue un argument de vente fort pour les industries agroalimentaires. S'ils ont suscité un grand intérêt de la part des consommateurs, ils soulèvent cependant des questions quant à leur efficacité et à leur innocuité. Les principaux défis commerciaux consistent alors à prouver l'efficacité et la pertinence d'une souche probiotique, puis de communiquer sur ses bénéfices santé, sans toutefois afficher d'allégations santé, qui ne sont pas validées par l'EFSA[8]. Les grands groupes adoptent ainsi diverses stratégies, soit en communiquant sur les bénéfices santé de « microorganismes » sans mentionner les probiotiques, soit en communiquant en général sur l'action des probiotiques sans les lier avec leurs marques.

6 – Données de *Marketsandmarkets*

7 – Données de *Grand View Research*

8 – Voir « Les enjeux réglementaires »

Afin d'optimiser la communication, la Ligue Scientifique Européenne pour les Probiotiques a créé un label de qualité pour les probiotiques distribués en pharmacie[9]. Il est destiné à identifier les probiotiques scientifiquement documentés et certifie que les souches sont vivantes et en quantités suffisantes, mais il n'est pas équivalent à une allégation santé.

Les enjeux réglementaires

Le développement puis la commercialisation de souches probiotiques sont soumis à différents enjeux réglementaires.

Concernant leur développement, la mise en œuvre du protocole de Nagoya, soumise en France à l'adoption du projet de loi sur la biodiversité[10] (proposé à l'Assemblée Nationale en 2014 et 2015), pourrait avoir des impacts en recherche & développement. En effet, ce protocole et le projet de loi français visent à protéger les ressources génétiques naturelles de chaque État, comme par exemple les micro-organismes, et à partager les bénéfices commerciaux liés à leur exploitation. Ainsi, les acteurs de la recherche académique comme les acteurs industriels pourraient être soumis à des procédures plus lourdes pour accéder à des ressources naturelles, notamment concernant la preuve de leur origine. Des incertitudes subsistent encore également quant aux modalités de partage des avantages commerciaux, et l'impact pour les centres développant des probiotiques reste à définir.

Par ailleurs, la commercialisation des souches probiotiques comme ingrédients pour l'alimentation humaine pourrait être impactée par la nouvelle réglementation Novel Food[11], qui soumet la mise sur le marché de nouveaux ingrédients alimentaires à une autorisation par les autorités sanitaires des États Membres (en France l'ANSES) et de l'EFSA. La liste des ingrédients soumis à la définition de « Novel Food » est en cours de révision. Cette réglementation vise à protéger le consommateur en évaluant la toxicité potentielle du produit et les éventuels déséquilibres nutritionnels induits par son introduction dans le régime alimentaire. Les effets des probiotiques étant complexes à évaluer, cette réglementation pourrait avoir un impact sur leur commercialisation s'ils y étaient soumis.

Enfin, l'autorisation des allégations nutritionnelles et de santé sont un enjeu majeur pour les probiotiques.

Les allégations sont soumises depuis 2007 à un règlement européen très strict, dans une optique de protection du consommateur. L'autorisation d'une allégation dépend de son évaluation par l'EFSA, et est délivrée par la Commission Européenne. L'EFSA vérifie ainsi l'identification de la bactérie (genre, espèce et souche), la caractérisation de l'effet bénéfique sur la santé de l'hôte, et la justification de l'allégation chez la population cible. La démonstration de l'effet d'une bactérie probiotique est un processus long et coûteux, qui suppose des études *in vitro* et *in vivo*, suivies d'études cliniques. L'invalidation d'un critère suffit à faire rejeter la demande ; aujourd'hui, aucune allégation santé n'a été acceptée par l'EFSA pour les probiotiques. Cependant, la position de l'EFSA pourrait s'ouvrir à des allégations concernant les troubles fonctionnels intestinaux, touchant environ 20 % de la population générale ; les débats en cours sont perçus comme une ouverture par les industriels de l'agroalimentaire sur ce dossier jusqu'alors fermé.

Concernant la biopréservation, il n'existe aujourd'hui aucune réglementation européenne relative à ce domaine. Chaque entreprise doit prouver l'innocuité des souches utilisées, ainsi que leur efficacité ; par ailleurs, la réglementation actuelle ne permet pas l'utilisation de souches de bactéries sur les surfaces d'emballages. Les entreprises les utilisent donc aujourd'hui en tant qu'ingrédient et non comme un additif. Le développement de ce type d'application des souches bioprotectrices pourrait conduire à une évolution de la réglementation, afin de permettre aux entreprises d'utiliser ouvertement les souches sélectionnées en tant que stabilisateurs pour la conservation des produits[12].

9 – Charte du label de qualité de l'*European Scientific League for Probiotics (ESLP)*

10 – *Projet de loi relatif à la biodiversité N°1847*, proposé à l'Assemblée Nationale

11 – Règlement n°97/258 relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires

12 – PIPAME, 2014 : *Les innovations technologiques, levier de réduction du gaspillage dans le secteur agroalimentaire : enjeux pour les consommateurs et pour les entreprises*

Analyse AFOM

ATOUTS

Réseau de recherche développé et structuré, position dominante de l'INRA à l'international

Historique fort de produits fermentés dans l'industrie française et acceptation sociétale des microorganismes comme agents bénéfiques

Acteurs industriels d'envergure internationale sur l'aspect nutrition

FAIBLESSES

Absence d'acteurs industriels leaders sur la biopréservation

Manque de connaissances scientifiques permettant de comprendre et maîtriser les mécanismes d'action des probiotiques et leurs effets bénéfiques

OPPORTUNITÉS

Volonté de réduction du gaspillage alimentaire

Potentiel développement de produits

Bienfaits apportés par l'augmentation de la DLC pour l'export de produits

MENACES

Applications industrielles en biopréservation limitées du fait d'un manque de définition claire du statut des flores protectrices par la réglementation européenne

Promotion des acteurs en nutrition entravée par le refus des allégations santé par l'EFSA

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

- Favoriser des partenariats de co-développement avec des acteurs industriels des marchés applicatifs afin de faciliter l'entrée sur le marché pour de nouvelles souches de probiotiques ;
- Au-delà du développement de nouvelles souches, se positionner sur une offre de biopréservation ou sur des technologies visant à protéger les probiotiques, telles que l'encapsulation.

Concernant les pouvoirs publics :

- Soutenir les efforts de recherche afin d'approfondir les connaissances des systèmes microbiens complexes et de mieux maîtriser les mécanismes d'action des probiotiques et le risque sanitaire ;
- Soutenir les développements de nouvelles souches probiotiques et la valorisation des principes actifs issus de la fermentation ;
- Accompagner les différents canaux de communication sur les bénéfices santé des probiotiques ;
- Favoriser une réglementation claire sur le statut des cultures protectrices et sur les critères de sécurité sanitaire en biopréservation, au niveau européen ou national.

Acteurs clés :

Organismes de recherche et de formation

Des compétences en développement de souches probiotiques se trouvent au sein d'EPST tels que **l'INRA** (notamment le site de Jouy en Josas), qui rayonne sur cette thématique à l'international, d'EPIC tels que **l'Ifremer** positionné notamment sur la biopréservation, ou de structures physiques telles que **l'Oniris (École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation)** ou **l'Institut Pasteur de Lille**.

Start-ups et PME

Plusieurs start-ups et PME sont positionnées sur ce domaine : par exemple **Génibio** ou encore **VF Biosciences** qui développent des souches probiotiques pour des applications en santé ou en nutrition, **BioArmor** qui conçoit des produits pour l'alimentation contenant des probiotiques pour l'élevage, **les Laboratoires Standa** et **Biocéane** qui proposent des produits à base de probiotiques pour les emballages actifs et la biopréservation...

Grands groupes

Des acteurs industriels d'envergure internationale sont positionnés sur les probiotiques, notamment sur des applications en nutrition / compléments alimentaires comme **Danone**, **Lesaffre Human Care, Aragan**, ou **Adisséo** pour l'alimentation animale, ou sur des solutions à base de ferments lactiques pour l'industrie agroalimentaire comme **Bioprox**, le Pôle Industrie alimentaire et solutions biotechnologiques de Proxis Développement. Les plus grands acteurs mondiaux des probiotiques, dont Danone, sont fédérés au sein de la *Global Alliance for Probiotics.*

Écosystème de l'innovation

Les acteurs français des probiotiques sont soutenus par diverses structures, notamment des pôles de compétitivité comme les pôles **Nutrition Santé Longévité ou Vitagora**, les Instituts Techniques Agro-Industriels (ITAI) tels qu'**Actalia**, **Adria Développement**, **IFIP (Institut Français du Porc), Aérial, ADIV (Association pour le Développement de l'Industrie de la Viande). Le RMT (Réseau Mixte Technologique) Florepro « Flores protectrices »** assure un lien entre la recherche académique, les acteurs industriels et les pouvoirs publics positionnés sur cette thématique, et le cluster **Institut de Recherche Pharmabiotique** rassemble des académiques et des industriels du secteur des probiotiques pour développer leur potentiel thérapeutique. Finalement, **MétaGénoPolis** (MGP) met à la disposition de la communauté académique, médicale et industrielle des équipements autour de plateformes innovantes.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

29 Ingénierie tissulaire et cellulaire

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Médecine régénérative ; thérapie cellulaire ; cellules souches et différenciées ; bioéthique ; compétences pluridisciplinaires ; cellules autologues et allogéniques ; bioproduction.

© Fotolia

Définition et périmètre

Définition

D'une manière générale, l'ingénierie tissulaire et cellulaire couvre **l'ensemble des technologies de transformation et d'organisation de cellules, de tissus et de biomatériaux** afin de mieux **prédire, traiter et contrôler** à des fins de santé.

- L'ingénierie cellulaire comprend plus particulièrement l'ensemble des technologies permettant de produire et d'entretenir des modèles cellulaires, d'optimiser les conditions de culture, de réaliser des transfections et des transplantations et de contrôler les lignées cellulaires ;
- L'ingénierie tissulaire quant à elle applique les principes de l'ingénierie et des sciences de la vie afin de développer des substituts biologiques qui vont restaurer, maintenir ou améliorer la fonction des tissus.

Des formes d'ingénierie fortement liées

Ces deux formes d'ingénierie sont intrinsèquement liées et permettent non seulement le développement de la **médecine régénératrice** mais aussi la **production de molécules d'intérêt**.

L'ingénierie tissulaire comme cellulaire, implique également des **compétences pluridisciplinaires** : science des matériaux, biologie cellulaire, chimie, physique et biomécanique.

Autre point commun entre ingénierie cellulaire et tissulaire, la mobilisation de cellules **autologues** (provenant de l'organisme receveur) ou **allogéniques** (provenant d'un organisme compatible).

Ces cellules peuvent être des **cellules différenciées** ou des **cellules souches**, en sachant que les recherches s'orientent davantage sur les cellules souches adultes et embryonnaires, bien que ces dernières cellules fassent l'objet d'une réglementation particulièrement stricte. Une troisième voie a été rendue possible avec la **création de cellules souches pluripotentes induites (IPS)** obtenues par reprogrammation génétique de cellules adultes différenciées. Elles présentent les avantages des cellules souches embryonnaires (plus grandes possibilités de différenciation) sans leurs inconvénients éthiques (destruction d'un embryon). Néanmoins, l'utilisation de ces cellules est très récente et doit encore fait l'objet de progrès techniques.

De nombreuses applications possibles

Les **aires thérapeutiques** couvertes par l'ingénierie cellulaire et tissulaire sont nombreuses, elles s'étendent à l'immunologie, l'oncologie, l'orthopédie mais trouvent également des applications dans les domaines cardiovasculaire, du diabète ou de la peau. À l'horizon 2020, de nouvelles applications pourraient voir le jour pour les maladies neuro-dégénératives.

L'ingénierie cellulaire et tissulaire permet également de développer de nouveaux systèmes de **bio-production** comme par exemple des biomatériaux de *bioprinting* et de génome *editing* (production de molécules à haute valeur ajoutée).

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Des technologies d'intérêt pour l'ensemble des acteurs

À l'échelle internationale, de nombreux investissements sont réalisés pour promouvoir la **recherche** mais également soutenir **les entreprises de biotechnologie** positionnées sur les marchés de l'ingénierie tissulaire et cellulaire.

Les multiples possibilités d'applications que représente l'ingénierie cellulaire et tissulaire (maladie de Parkinson, médecine régénérative, oncologie, cécité, diabète, etc.) suscitent l'intérêt des acteurs de la santé. Les entreprises du médicament et grands acteurs industriels se positionnent ainsi sur ce domaine, à l'instar de Servier qui collabore depuis 2013 avec Cellectis pour traiter des leucémies par thérapie cellulaire allogénique. Via leurs fonds d'investissements, certains industriels se positionnent également sur ce secteur, comme Shire et Boehringer Ingelheim.

Atouts de la France

Bien que le tissu industriel français doive encore accroître sa densité au regard du leader mondial que sont les États-Unis, les **entreprises françaises sont bien positionnées** et les plus importantes bénéficient d'investissements (la plateforme de *CellForCure* a par exemple bénéficié des financements dans le cadre du Programme d'Investissements d'avenir).

La France a en outre été pionnière dans l'utilisation des cellules souches de sang ombilical et conserve aujourd'hui sa bonne position dans le segment très porteur des cellules souches. L'inauguration de la pre-

mière plateforme industrielle pour la production de médicaments de thérapie cellulaire par ***CellForCure*** (filiale du groupe pharmaceutique LFB) marque un pas vers le **rapprochement des domaines académiques et industriels**.

La France s'appuie ainsi sur une **position en R&D très favorable** : les équipes françaises de recherche académique ont une taille critique pour compter au niveau international, le niveau de recherche est particulièrement élevé, et les réseaux/*bioclusters* sont suffisamment structurés.

L'Établissement français du sang (EFS) est également un acteur important du développement de techniques de thérapies cellulaires, à travers notamment l'Atlantic Bio GMP, premier établissement pharmaceutique de statut public en France et plateforme innovante dédiée à la production de médicament pour les phases I et II des essais cliniques, en partenariat avec l'AFM (Association française contre les myopathies), l'Inserm et le CHU de Nantes. L'Unité d'ingénierie et de thérapie cellulaire (composée d'un site de production de produits de thérapie cellulaire et tissulaire ainsi que d'une structure de recherche et de transfert technologique) est une autre réalisation dans laquelle l'EFS est impliqué. L'EFS, *leader* sur le marché national des produits de thérapies cellulaires et tissulaires, est aussi impliqué dans plusieurs projets de recherche européens consacrés aux cellules souches et à la thérapie cellulaire, comme CASCADE, REBORNE et ADIPOA. L'Établissement français du sang a également été impliqué en partenariat avec Sanofi dans l'étude OSMOZ, registre observationnel des patients traités par Mozobil (traitement pour la mobilisation des cellules souches hématopoïétiques en vue d'une autogreffe.)

La France dispose enfin d'une **continuité entre le secteur académique et le secteur clinique** qui permet un accès compétitif au développement clinique.

Liens avec d'autres technologies clés

Le développement de technologies d'ingénierie cellulaire et tissulaire influe fortement sur le développement d'autres technologies clés 2020 :

- **Les nouvelles modalités d'immunothérapie** avec le développement accéléré ces dernières années d'immunothérapie par thérapie cellulaire (engouement qui intéresse des industriels comme Novartis, GSK, Pfizer) ;
- **L'Ingénierie génomique**, qui nécessite dans ses applications en thérapie génique notamment de faire intervenir des cellules spécialisées pour transporter des vecteurs de gènes.

Les marchés

Un marché mondial en très forte croissance à l'horizon 2020

Le marché mondial de l'ingénierie tissulaire et de la thérapie cellulaire approche les 9,9 milliards de dollars en 2014 et devrait atteindre **73 milliards de dollars d'ici à 2025**, sur une base de croissance annuelle moyenne particulièrement élevée, **estimée à 21 %**[1]**.**

Cette forte croissance du marché s'explique notamment par le fait que de nombreuses nouvelles modalités de thérapies cellulaires sont découvertes et entrent sur le marché. D'autres sont également en phases cliniques et devraient arriver sur le marché dans les prochaines années. De plus, il **n'existe aujourd'hui pas d'autres options thérapeutiques en médecine régénérative ou tissulaire**, notamment sur certains segments comme celui des organes déficients[2].

En 2015, les États-Unis dominent le marché mondial. À l'horizon 2020, le marché asiatique devrait enregistrer les plus forts taux de croissance du fait notamment du nombre important de nouveaux produits actuellement en développement dans cette région du monde.

Des segments de marché naissants mais prometteurs

Si seulement 42 produits sont disponibles sur le marché mondial début 2011, le segment naissant des produits de biothérapies cellulaires est quant à lui estimé à 3 milliards de dollars en 2015[3], alors que le segment des thérapies par cellules souches, estimé à 63 millions de dollars en 2015, devrait atteindre les 330 millions de dollars à l'horizon 2020 avec une croissance annuelle moyenne particulièrement importante de 39,5 %[4]. Sur ce dernier segment, plusieurs facteurs sont à l'origine d'une forte croissance. Tout d'abord,

1 – *The Future of Tissue Engineering and Cell Therapy to 2025*, Smithers Apex, février 2015.

2 – *Global Cell Therapy Market Outlook 2020*, KuicK Research, may 2015

3 – Données du LEEM

4 – *Stem Cell Therapy Market Regulatory Landscape, Pipeline Analysis & Global Forecasts to 2020*, RnRMarketResearch, 2014.

les fonds octroyés à la recherche tant par les gouvernements que par les organisations privées permettent de dynamiser le marché. La prise en compte croissante des applications thérapeutiques que promettent d'offrir les thérapies par cellules souches est un autre élément qui pousse les acteurs à se positionner sur ce segment, qui retient particulièrement l'attention des industriels et des investisseurs, comme Novartis, GSK ou Pfizer, dans le domaine de la thérapie cellulaire appliquée notamment à l'oncologie.

Les défis technologiques à relever

Développer les connaissances sur la différentiation cellulaire

Les enjeux technologiques du domaine de l'ingénierie tissulaire et cellulaire concernent notamment l'amélioration de la compréhension de la biologie et des cellules souches. La meilleure maîtrise des techniques de différentiation cellulaire est ainsi un élément essentiel pour le développement de nouvelles thérapies cellulaires et tissulaires plus fiables et efficaces.

Améliorer la résistance et les méthodes d'administration des cellules implantées

La robustesse des méthodes est également un point d'amélioration important, elle concerne par exemple l'amélioration du taux de survie des cellules implantées. Le recours aux nanotechnologies et plus largement aux techniques de vectorisation pourrait permettre d'optimiser le taux de survie des cellules en assurant une meilleure administration de ces dernières dans les organismes où elles sont implantées.

L'adaptation des méthodes existantes d'administration de cellules est également nécessaire puisque de nouvelles applications thérapeutiques, telles que les maladies neuro-dégénératives, vont modifier le type de cellule à implanter dans des zones du corps humain complexes d'accès.

Cellules allogéniques ou autologues : quel modèle pour quelle structure ?

Autre défi technologique en lien avec les défis commerciaux, la nécessité pour les industries pharmaceutiques d'orienter les thérapies vers des modèles utilisant les cellules allogéniques plutôt qu'autologues. Cela permettrait de mieux correspondre aux *business models* habituellement utilisés par l'industrie pharmaceutique, et qui apparaissent plus simples à mettre en œuvre (*i.e. médicament prêt à être utilisé)*.

À noter toutefois, les deux modèles présentent des avantages et inconvénients, et le modèle autologue peut convenir à certaines industries.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Coûts de développement élevés et difficulté d'accès aux financements pour les PME

Les industriels du domaine de l'ingénierie cellulaire et tissulaire sont confrontés à des coûts de développement particulièrement élevés, la thérapie cellulaire nécessitant des technologies avancées. De ce fait, l'accès aux financements est difficile pour les PME, d'autant plus qu'**il n'existe pas en France de fonds publics dédiés** alors que c'est le cas dans les principaux pays concurrents.

Concurrence internationale et thérapeutique

Les États-Unis dominent en outre très clairement le secteur de la recherche sur les cellules souches ainsi que le développement clinique de produits, ce qui laisse peu de place à l'émergence de nouveaux acteurs d'autres pays.

Enfin, des thérapies ciblées, jugées plus simples à mettre en œuvre, sont des concurrentes importantes, notamment sur la problématique du remboursement.

Les enjeux réglementaires

Malgré des évolutions notables ces dernières années, de nombreux enjeux subsistent sur les aspects réglementaires de l'ingénierie cellulaire et tissulaire, sur des **aspects éthiques** en particulier.

La recherche sur les cellules souches embryonnaires : source de débats éthiques.

Longtemps interdite, la recherche sur l'embryon et les cellules souches embryonnaires a été autorisée sous conditions[5] par la loi du 6 août 2013 tendant à modifier la loi du 7 juillet 2011 relative à la bioéthique. Si l'autorisation sous contrainte était déjà établie par la loi de 2004, cette **révision constitue un progrès notable favorisant la recherche pour des thérapies cellulaires et tissulaires,** même si toute recherche fondamentale reste exclue.

À l'échelle européenne, il n'existe pas, malgré plusieurs directives relatives à la santé publique, de législation globale relative à la recherche bioéthique. Il en résulte une grande disparité entre les différentes législations des pays membres, ce qui montre que des **difficultés d'acceptabilité sont encore présentes**.

Un cadre réglementaire complexe et peu lisible.

Le cadre réglementaire national comme européen qui encadre les produits des thérapies cellulaires et tissulaires reste complexe, peu lisible et surtout peu connu des acteurs, particulièrement des structures académiques et des TPE/PME malgré des efforts de communication réalisés au niveau européen et national[6]. Le règlement européen « *médicaments de thérapie innovante* » entré en vigueur en 2008 a permis l'harmonisation des législations à ce sujet mais le besoin de plus de lisibilité est toujours présent.

Analyse AFOM

ATOUTS

Excellence académique et continuité entre l'académique et le clinique

Fortes compétences (cellules de sang ombilical et cellules souches)

FAIBLESSES

Cadre législatif peu lisible pour les acteurs

Tissu industriel peu dense

Accès aux financements difficile pour les industriels

OPPORTUNITÉS

Multiplicité des possibilités d'applications thérapeutiques, en particulier pour les maladies neuro-dégénératives et l'oncologie

Autorisation conditionnelle de la recherche thérapeutique sur les cellules souches embryonnaires

Tendance à l'assouplissement des cadres nationaux en bioéthique

Développement des cellules souches pluripotentes induites (IPS)

MENACES

Forte concurrence des États-Unis

Des freins éthiques et sociaux perdurent

5 – Les projets autorisés doivent répondre à plusieurs critères dont des critères de pertinence, d'éthique et à l'objectif d'apporter des progrès médicaux majeurs qui ne peuvent pas être réalisés en utilisant un autre type de cellule. L'Agence de la biomédecine assure l'encadrement de la recherche.

6 – Dossier de l'*ANSM*

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics

■ Les initiatives pour développer une masse critique du tissu industriel aujourd'hui peu conséquent doivent également être soutenues, sur le modèle de la plateforme *CellForCure* par exemple, ou prendre la forme de **Fonds Unique Interministériel** (Ces fonds existent aujourd'hui pour accompagner des projets d'industrialisation mais sur des financements aux montants limités).

■ Le cadre réglementaire concernant les médicaments de thérapie innovante doit être simplifié et surtout être rendu plus lisible aux acteurs du secteur, TPE et PME en particulier.

Aux industriels

■ Afin de développer le secteur français de l'ingénierie tissulaire et cellulaire, une structuration de la filière industrielle en partenariat avec les pouvoirs publics est nécessaire pour conforter et affirmer le passage du stade de recherche au stade industriel. Les entreprises françaises doivent ainsi **se rapprocher du secteur académique**, par le biais par exemple des pôles de compétitivité et des SATT, ce qui permettrait en outre de favoriser leur développement à l'international

■ En l'absence de fonds dédiés, les entreprises françaises doivent également **aller chercher des financements** dans des programmes européens et internationaux, à l'instar de *EuroStemcell* ou l'*International Stem Cell Forum (*ces projets sont financés dans le cadre du programme H2020).

■ Les PME peuvent également **orienter leurs thérapies utilisant des cellules allogéniques** plutôt qu'autologues, thérapies dont le *business model* est plus simple à mettre en œuvre. Ces cellules sont en effet disponibles en plus grand nombre que les cellules autologues et les procédés les concernant peuvent être standardisés. A noter toutefois, des traitements autologues peuvent constituer des niches pertinentes pour certaines TPE et PME.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

En France, de nombreux organismes contribuent à la recherche sur l'ingénierie cellulaire et tissulaire. C'est le cas notamment du laboratoire d'ingénierie cellulaire et biotechnologie (LICB) du **CEA.** Le Laboratoire **CellTech**, situé dans les locaux de l'école Sup'Biotech travaille également en partenariat avec le CEA sur le développement de modèles de différenciation de cellules IPS en neurones en vue de traiter les maladies neuro-dégénératives.

L'Institut des cellules souches pour le traitement et l'étude des maladies monogéniques ou **I-Stem** est un autre acteur important soutenu par le **Genopole** et issu d'une collaboration entre **l'AFM, l'Inserm et l'Université Evry-Val-d'Essonne**.

L'**EFS** contribue également à la recherche sur les thérapies cellulaires et tissulaires via notamment sa participation aux programmes européens CASCADE, REBORNE et ADIPOA.

De nombreux hôpitaux et instituts sont aussi impliqués dans des programmes de recherche à l'instar du CHU Hôtel Dieu Nantes, de l'Hôpital Necker, de l'Hôpital Saint-Louis, de l'Institut Cochin, de l'Institut Curie, de l'Institut des biothérapies, de l'Institut de recherche biologique, de l'Institut du thorax et de l'Institut Pasteur.

Organismes d'interface

Les pôles de compétitivité, dont **Atlanpole biothérapies et Medicen Paris Région** sont des exemples, soutiennent les entreprises françaises dans leur développement et se situent à l'interface entre les secteurs publics et privés. Le pôle Medicen Paris Région est ainsi par exemple à l'origine du **projet européen IngeCELL,** qui vise notamment le marché de la thérapie cellulaire dans les domaines neuromusculaire, neurologique, hépatologique, et cardiovasculaire.

L'institut Thématique Multi Organisme « Ingénierie et Technologies pour la Santé » du **CVT AVISEAN** rassemble 91 unités françaises de recherche et a pour premier défi de développer des biomatériaux inno-

vants en ingénierie tissulaire et médecine régénérative. Collaborent à cet institut de nombreux organismes tels que l'Inserm, le CEA, l'INRA, le CNRS, l'Inria, l'Institut Pasteur, l'Institut Curie et l'IRD.

Grandes entreprises

La principale grande entreprise française positionnée dans le domaine de l'ingénierie tissulaire et cellulaire est le groupe pharmaceutique **Servier**, qui collabore depuis 2013 avec la société de biotechnologie *Cellectis* pour traiter des leucémies par thérapie cellulaire allogénique.

Startups et PME

Malgré un tissu industriel relativement dense, certaines PME françaises sont bien positionnées dans l'écosystème de l'ingénierie cellulaire et tissulaire. C'est de cas de **Cellprothera**, biotech spécialisée dans la thérapie cellulaire pour la médecine régénératrice cardiaque, **CellForCure**, première plateforme industrielle pour la production de médicaments de thérapie cellulaire, **Celletics**, société spécialisée dans l'ingénierie des génomes **et sa fililale Ectycell**, dédiée aux applications médicales des cellules souches, **ABCell-Bio**, positionnée sur la recherche in vitro et la thérapie cellulaire, **Endocells**, qui développe une plateforme technologique cellulaire, **Icelltis**, fournisseur de cellules humaines, **Neuronax**, qui développe des thérapies cellulaires pour le traitement de pathologies traumatiques et dégénératives du système nerveux central et de **Texcell** qui propose des services de culture cellulaire.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

30 Nouvelles modalités d'immunothérapie

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Thérapie cellulaire ; vaccins thérapeutiques ; anticorps monoclonaux ; biomédicaments.

Définition et périmètre

Définition

Le système immunitaire est un système de défense naturel de l'organisme composé d'un réseau complexe de cellules, d'organes et molécules. Le **but de l'immunothérapie est d'administrer des substances qui stimulent, modifient ou optimisent tous ces composants**.

Initialement orientée autour de la vaccinologie et des greffes de moelle osseuse, l'immunothérapie recouvre depuis quelques années, grâce aux avancées de la médecine, **un nombre plus important de modalités, préventives ou curatives**, faisant appel au système immunitaire des individus. Parmi ces nouvelles modalités qui viennent compléter celles déjà existantes, l'on retrouve :

- Les anticorps monoclonaux spécifiques (mAbs) ;
- Les siRNA (petits ARN interférents) et l'ARNm (ARN messager) ;
- Les médiateurs immunitaires ;
- La vaccination thérapeutique (qui se distingue de la vaccination préventive) ;
- Les thérapies cellulaires et les agents immuno-modulateurs.

Ces nouvelles modalités s'inscrivent parfaitement dans le cadre de la médecine personnalisée puisqu'elles permettent des **thérapies ciblées et spécifiques**.

Un vaste périmètre d'aires thérapeutiques concernées

Les applications de l'immunothérapie sont multiples et **concernent de nombreuses aires thérapeutiques** comme l'oncologie, les maladies infectieuses (VIH et hépatites B et C), les maladies inflammatoires, les maladies de la peau et des os, les maladies du système nerveux central, les allergies, les transplantations, les maladies chroniques ou les maladies auto-immunes.

Des technologies de pointe

L'immunothérapie est un champ thérapeutique en pleine évolution qui utilise des **technologies de plus en plus sophistiquées**, comme par exemple des fragments d'anticorps couplés à des radioéléments, à des récepteurs ou à des peptides.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché des nouvelles modalités d'immunothérapie est liée au développement d'autres technologies clés 2020, comme par exemple :

- L'**ingénierie génomique** qui contribue à la production par exemple de cellules CAR T, cellules de la réponse immunitaire ;
- L'**imagerie pour la santé** qui est un outil de la recherche sur le fonctionnement du système immunitaire.

A l'inverse, le marché de **l'ingénierie cellulaire et tissulaire** est directement influencé par le développement accéléré des modalités d'immunothérapie.

Les marchés

Du fait notamment de la diversité d'applications de l'immunothérapie, **un tiers des médicaments développés dans le monde aujourd'hui relève de ce domaine**[1] et le marché devrait continuer à croître à l'horizon 2020.

Certains segments du marché de l'immunothérapie sont difficiles à évaluer, par manque de maturité pour certains (vaccins thérapeutiques, immunothérapies par thérapie cellulaire, immunothérapies par siRNA et par ARNm). Les principaux segments (vaccins et traitement des cancers) enregistrent quant à eux de fortes croissances et porteront l'ensemble du marché de l'immunothérapie à l'horizon 2020.

Les principaux segments technologiques en croissance.

Les segments de l'immunothérapie enregistrent de forts taux de croissance, comme par exemple le marché des vaccins, qui en 2013 représentait un chiffre d'affaires de 30,5 milliards de dollars et devrait atteindre en **2020 plus de 67 milliards de dollars** sur la base d'une croissance moyenne annuelle de **12 %**[2]**.** Ce segment est particulièrement concentré à l'échelle mondiale puisque les quatre compagnies *leaders* (Pfizer, Novartis, Sanofi et GlaxoSmithKline) contrôlent 74 % du marché.

1 – Données du *LEEM*

2 – *Global Vaccine Market Outlook 2020*, RNCOS, mai 2014

Pour ce qui est du segment particulier des produits d'anticorps monoclonaux, en 2014, 47 produits ont étés approuvés aux États-Unis et en Europe représentant un chiffre d'affaires de près de 75 milliards de dollars. Sur la base du développement de 4 nouveaux produits par an ce sont ainsi 70 produits qui devraient être présents sur le marché en **2020, cumulant des ventes d'environ 125 milliards de dollars**[3]**.** L'Europe et les États-Unis font figure de marchés précurseurs. Toutefois des acteurs concurrents émergent en Amérique du Sud, en Chine, en Asie du sud-est, en Inde et en Russie qui disposent d'une dizaine de produits approuvés sur leurs marchés respectifs, principalement des produits biosimilaires. Le nombre de pathologies pouvant être traités par les produits issus d'anticorps monoclonaux augmente et devrait continuer de croître dans les années à venir.

L'immunothérapie appliquée en oncologie : un marché particulièrement prometteur.

Les produits d'immunothérapie pour traiter les cancers représentent quant à eux **en 2014 plus de 50 % de l'ensemble des médicaments d'oncologie, soit environ 41 milliards de dollars** et devraient enregistrer de fortes croissances à l'horizon 2020[4]. Ces produits, en ciblant uniquement les cellules cancéreuses, ont réussi à s'imposer sur ce marché permettant l'allongement de l'espérance de vie des patients.

L'application de l'immunothérapie en oncologie est particulièrement prometteuse : des médicaments ont déjà démontré leur efficacité (le trastuzumab pour certains cancers du sein, le rituximab pour les lymphomes, le cétuximab pour les cancers du côlon, etc.) et une nouvelle génération de molécules encore plus efficaces devrait entrer sur le marché dans les prochaines années (comme par exemple celles composant le nivolumab dont les premiers résultats des essais cliniques, sur les patients atteints d'un cancer du poumon, font état d'une efficacité thérapeutique supérieure par rapport aux précédents traitements, malgré une toxicité élevée du traitement)

De plus en plus de grands groupes pharmaceutiques s'intéressent ainsi au développement de ces nouvelles thérapies, comme Novartis, GlaxoSmithKline, Roche, Merck ou Pfizer. Ces groupes s'appuient sur les compétences d'entreprises de biotechnologies pour développer leurs produits, notamment avec des *start-up* françaises comme Innate Pharma ou Ose Pharma.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Des applications dans des aires thérapeutiques répondant à des besoins médicaux majeurs

Outre le fait qu'elle constitue un marché important en forte croissance, l'immunothérapie regroupe un ensemble de technologies essentielles dans le développement de nouveaux traitements pour certaines pathologies.

Ces technologies seront particulièrement importantes à l'horizon 2020 puisque ce domaine aura un impact significatif sur quatre aires thérapeutiques répondant à des besoins médicaux majeurs : **les transplantations** (principalement pour des immunosuppresseurs afin de prévenir les rejets), **les maladies auto-immunes**, les **maladies infectieuses** et l**'oncologie**.[5] Cette dernière aire est d'autant plus importante que les cancers totalisaient en 2012 près de 8,2 millions de décès, en faisant la première cause de mortalité à travers le monde[6], ce nombre étant amené à croître fortement au cours des prochaines années.

Les nouvelles modalités d'immunothérapie pourront également trouver à terme des applications pour **les maladies neurodégénératives** dont la prévalence va augmenter dans les pays développés où la population est vieillissante.

Atouts de la France

La France est en bonne position en ce qui concerne l'ingénierie du système immunitaire. Elle possède **d'importantes forces académiques**, notamment avec l'Institut Pasteur et les Labex présents sur son territoire (IGO, IRON). Ses forces industrielles sont également importantes : 58 sociétés de biotechnologie

3 – . Jones SD, Levine HL., *The therapeutic monoclonal antibody market*, mAbs volume 7, issue 1, 2015

4 – *Global & USA Cancer Immunotherapy Market Analysis to 2020*, Research and markets, Avril 2015

5 – Données du *LEEM*

6 – Chiffres de l'*OMS*

et 7 sociétés pharmaceutiques[7] travaillent dans le champ de l'immunothérapie. La France est par ailleurs **historiquement bien positionnée dans le domaine de la vaccinologie**. Elle fait ainsi figure de leader du marché européen et certains de ses industriels comme Sanofi ou Mérial font partie des leaders mondiaux (à noter toutefois, cette position de leader est contrebalancée par le faible volume d'essais cliniques réalisés[8]). Enfin, les compétences de la France sont importantes dans le domaine des **immunomodulateurs**.

Les défis technologiques à relever

Pousser la compréhension des mécanismes du système immunitaire

Une meilleure compréhension du fonctionnement du système immunitaire apparaît nécessaire afin de développer des technologies innovantes en immunothérapie. Pour ce faire, la poursuite d'efforts en recherche fondamentale est nécessaire.

Améliorer la vectorisation des siRNA

L'amélioration de la vectorisation de siRNA (petits ARN interférents qui peuvent empêcher l'expression de gènes) est essentielle pour le développement des immunothérapies. La délivrance de ces ARN interférents nécessite en effet de meilleures formulations pour améliorer l'absorption cellulaire et la localisation cytoplasmique des siRNA afin d'élargir les types de cellules dans lesquels ils peuvent être délivrés.

Améliorer la stabilité et la persistance des anticorps monoclonaux

L'amélioration de la stabilité des anticorps monoclonaux thérapeutiques est un autre enjeu important. Ils se distinguent en effet des médicaments traditionnels par leur structure, dont certaines modifications mineures peuvent rendre les anticorps toxiques pour l'organisme receveur. Cela constitue l'un des **verrous actuels du développement d'anticorps thérapeutiques diversifiés**.

Ces anticorps ont également une durée de vie limitée dans l'organisme et plus particulièrement dans le sang, ce qui limite leur efficacité. L'amélioration de leur persistance constitue un défi technologique clé qui permettrait de réduire la fréquence d'injection chez le patient et donc le coût du traitement.

Thérapies ciblées et sélection des patients

Par ailleurs, les thérapies ciblées permettent d'améliorer l'efficacité d'un traitement mais n'excluent pas la résistance de certains patients. Afin d'améliorer la sélection des patients avant l'immunothérapie et ainsi diminuer la toxicité et les coûts, **l'identification des facteurs prédictifs de réponse est un enjeu primordia**l (il peut s'agir de caractéristiques démographiques ou cliniques, de dosages biologiques, de tests fonctionnels ou de typages génétiques). **L'état des connaissances sur ces types de biomarqueurs** nécessite donc d'être approfondi pour chaque traitement.

Les défis commerciaux à relever

Difficultés dans le transfert technologique

En France, un enjeu commercial majeur concerne la valorisation de la recherche et le transfert technologique. Il s'avère en effet que des difficultés sont présentes dans le passage des milieux académiques vers les milieux industriels, et ce malgré l'action de de SATT et de pôles de compétitivité en matière de transfert technologique. Le défi pour les PME françaises est donc de réussir à se rapprocher du secteur académique et d'échanger sur leurs besoins afin de valoriser les innovations les plus prometteuses.

7 – *Renforcer la filière immunothérapie en France, Leem*. 2012

8 – 7 % des essais cliniques mondiaux réalisés en France en 2011. *Renforcer la filière de l'immunothérapie en France, LEEM, 2012*

L'accès aux financements pour les PME françaises

Du fait du caractère très coûteux du développement de thérapies ciblées, l'accès au financement pour les entreprises est un enjeu difficile à atteindre. De nombreux projets sont ainsi abandonnés par manque de fonds d'amorçage.

Des produits développés peu matures

Le caractère nouveau sur le marché des produits développés par des entreprises françaises, des PME en particulier, est un autre enjeu important. Il induit en effet un manque de visibilité et de preuves de succès, notamment pour les sociétés capables de produire des lots cliniques. Le défi pour les pouvoirs publics est donc d'assurer un continuum de financement afin de soutenir et valoriser les entreprises innovantes.

Les enjeux réglementaires

Relativement peu d'enjeux règlementaires concernent les technologies des nouvelles modalités d'immunothérapie.

On peut tout de même relever le fait que le **seuil d'exigence français est particulièrement élevé** en termes de sécurité virale, ce qui peut engendrer des difficultés dans la mise en place d'essais cliniques de phase 1 et de phase 2[9].

L'immunothérapie cellulaire, qui utilise des cellules souches, est également contrainte par les **lois bioéthiques qui encadrent fortement la recherche thérapeutique** Les contraintes réglementaires sont alors similaires à celles évoquées pour l'ingénierie cellulaire.

Analyse AFOM

ATOUTS

Excellence académique

Tissu industriel important

Leaders mondiaux en vaccinologie (Sanofi, Mérial) et en immuno-modulation (Stallergenes)

FAIBLESSES

Peu d'essais cliniques réalisés

Difficultés dans le transfert technologique

Manque de maturité des produits développés par les entreprises françaises

OPPORTUNITÉS

Impact significatif dans des aires thérapeutiques répondant à des besoins médicaux majeurs

Rôle en santé publique dans la prévention des pandémies et épidémies

Outils de la médecine personnalisée

MENACES

Freins éthiques et réglementaires pour l'immunothérapie cellulaire

9 – *Renforcer la filière de l'immunothérapie en France,* LEEM, 2012

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics

■ Afin d'améliorer le transfert technologique et de valoriser l'expertise académique française, **des équipes de transfert technologique (SATT) avec une expertise spécifique en immunologie** peuvent venir compléter le travail des pôles de compétitivité et des Instituts Carnot ;

■ Prioriser la recherche fondamentale afin de relever les défis technologiques est un autre facteur clé de succès, qui passe notamment par la **création de programmes ANR ciblés en immunothérapie.**

Aux entreprises

■ Pour que les produits des PME françaises gagnent en maturité, il est important que celles-ci puissent trouver des financements ou attirer les investisseurs. Pour ce faire, elles peuvent **accéder à des programmes européens et internationaux**, **effectuer des rapprochements industriels** ou **demander un soutien public pour les preuves de concept ;**

■ L'oncologie est une aire thérapeutique qui apparaît prometteuse pour le développement de nouvelles modalités d'immunothérapie. De nombreuses entreprises se positionnent sur ce marché qui représente un levier de croissance important pour les PME françaises, notamment pour les entreprises de biotechnologies qui mettent en place des partenariats avec les grands groupes pharmaceutiques. L'oncologie est néanmoins une aire thérapeutique sur laquelle il existe une concurrence forte;

■ Les compétences françaises en matière de vaccination doivent également être renforcées, notamment pour assurer un bon positionnement sur la vaccination thérapeutique, approche qui comporte un fort potentiel d'innovation. Les entreprises françaises ont un rôle à jouer dans la valorisation d'innovations sur cette technologie.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

Les principaux centres de recherche et de formation qui travaillent en France sur le développement de nouvelles modalités d'immunothérapie sont **les Labex IRON et IGO, le CNRS, l'Inserm, l'Institut Curie, l'Institut Pasteur, l'Immunopôle de Marseille et l'Université Pierre et Marie Curie**.

L'Unité U932, « Immunité et Cancer » travaille au sein de l'Institut Curie en partenariat avec sept autres équipes de l'institut et trois du Centre d'immunologie de Marseille-Luminy sur la biologie des cellules dentritiques (cellules du système immunitaire). L'ensemble de ces équipes forme **le Labex DCBIOL** depuis 2013. L'immunologie est également un thème de formation dispensée par l'Institut.

Deux autres **Labex, IRON et IGO** contribuent à la recherche académique sur l'immunothérapie. Le Labex Iron s'attache au développement de radio pharmaceutiques innovants et leur transfert en clinique. Le Labex IGO explore quant à lui de nouvelles thérapies contre le cancer ou le rejet de greffe, par une meilleure connaissance des mécanismes de réponses immunitaires de l'organisme.

Le CNRS dispose d'un laboratoire dédié, **le GICC** (Génétique Immunothérapie, Chimie et Cancer), rattaché à l'université François-Rabelais Tours, qui étudie les mécanismes de certaines maladies cancéreuses et immunologiques, afin de développer de nouvelles thérapeutiques et de les personnaliser.

L'Inserm a également des unités spécialisées, comme par exemple l'U844 qui travaille sur des applications d'immunothérapie pour la polyarthrite rhumatoïde.

L'Immunologie figure en outre parmi les six grandes aires thérapeutiques explorées par les travaux de l'Institut Pasteur qui y consacre un département de recherche. Ce département rassemble **14 unités de recherche et 2 plates-formes techniques** qui cherchent à mettre au point de nouvelles stratégies thérapeutiques.

L'Unité de recherche « **Immunologie-Immunopathologie-Immunothérapie** » de l'Université Pierre et Marie Curie a pour objectif l'étude et le développe-

ment de l'immunologie translationnelle, reposant sur des études fondamentales mais aussi cliniques dont les maladies auto-immunes, les maladies infectieuses et le cancer. Une spécialité en immunologie est également proposée en Master 2.

L'immunopôle de Marseille est enfin une structure vouée à l'immunologie fondamentale et appliquée et son objectif est d'accélérer la découverte et le développement d'immunothérapies contre les cancers et les maladies inflammatoires.

Organismes d'interface

Les structures qui accompagnent les entreprises françaises dans leur développement sont en premier lieu les pôles de compétitivité. Sans être exhaustif, nous pouvons citer **Atlanpole Biothérapies, Medicen Paris Région, Alsace BioValley, Eurobiomed et Lyonbiopôle.** À titre d'exemple l'association **MabDesign** mise en place en novembre 2014 au sein du Lyonbiopôle vise à structurer et animer la filière industrielle française de l'anticorps thérapeutique et plus largement de l'immunothérapie. Elle est soutenue financièrement par Bpi France dans le cadre de la réponse à un appel « Filières Industrielles Stratégiques » issu du Programme d'Investissements d'Avenir. Le pôle Eurobiomed favorise également la mise en place d'écosystèmes innovants par le soutien à des acteurs régionaux comme, et c'est un exemple parmi d'autres, Marseille Immunopôle qui a été labellisé Fédération Hospitalo-Universitaire.

Au sein du **Consortium de Valorisation Thématique (CVT) AVISEAN**, un domaine de valorisation stratégique sur les anticorps thérapeutiques est en cours de création.

L'Institut Carnot Curie Cancer mobilise enfin des compétences en immunologie et développe des immunothérapies appliquées en oncologie en partenariat avec des acteurs industriels.

Grandes entreprises

Sanofi, bioMérieux et Pierre Fabre sont les principales grandes entreprises françaises qui développent des nouvelles modalités d'immunothérapie. Sanofi figure ainsi parmi les quatre leaders mondiaux de la vaccinologie. Le groupe pharmaceutique travaille depuis 2013 en étroite collaboration avec Transgène, une filiale de l'Institut Mérieux (bioMérieux), à la fabrication de produits d'immunothérapie, et notamment aux produits thérapeutiques de Transgene. Le Centre d'Immunologie Pierre Fabre développe pour sa part des programmes de recherche dans le domaine de l'immunothérapie des cancers, en particulier l'identification d'anticorps monoclonaux à visée thérapeutique. Ces recherches se concrétisent par le développement du premier anticorps thérapeutique du groupe.

Start-up et PME

Les *start-up* et PME françaises sont positionnées principalement sur les segments de la vaccination thérapeutique et des anticorps thérapeutiques. **Theravectys et Neovacs** développent ainsi des vaccins thérapeutiques. Issue de l'institut Pierre et Marie Curie, Neovacs est une société de biotechnologie qui a mis au point deux médicaments ciblant les pathologies auto-immunes. **Innate Pharma** travaille sur des anticorps innovants contre le cancer et les maladies inflammatoires.

L'aire thérapeutique que représente l'immuno-oncologie est également source d'intérêt des entreprises françaises comme les sociétés **Erytech** et **Proteogenix**.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

31 Dispositifs bio-embarqués

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Dispositifs médicaux implantables actifs, prothèses, organes artificiels, orthopédie, implants dentaires, implants bioniques, interdisciplinarité, stimulation cardiaque, médecine translationelle.

Définition et périmètre

Définition

Les dispositifs bio-embarqués sont des dispositifs médicaux actifs ou non, regroupant des systèmes aux technologies intégrées chez l'homme. Les principales fonctions des dispositifs embarqués sont de **contrôler, suppléer, remplacer une fonction déficiente** de l'organisme dans lequel ils sont implantés ou non. On distingue dans la grande famille des dispositifs bio-embarqués plusieurs types de dispositifs.

Les dispositifs médicaux implantables sont en premier lieu destinés à être implantés en totalité dans le corps humain ou à remplacer une surface épithéliale ou la surface de l'œil. Est également considéré comme dispositif implantable tout dispositif destiné à être introduit partiellement dans le corps humain par une intervention chirurgicale et qui demeure en place après l'intervention pendant une période d'au moins trente jours.

Les **prothèses implantables** sont ainsi des dispositifs implantables particulièrement destinés à remplacer un membre ou une articulation.

Les **implants prothétiques revêtus** sont quant à eux des dispositifs bio-embarqués destinés à remplacer tout ou partie d'un os ou une articulation osseuse.

Entrent également dans le champ du dispositif bio-embarqué, **les dispositifs médicaux implantables actifs**, conçus pour être implantés dans l'organisme pour suppléer ou contrôler une fonction déficiente par électrostimulation directe des organes ou structures en cause[1] (tels des stimulateurs cardiaques implantables ou des implants cochléaires). Entrent dans cette catégorie les organes artificiels implantés qui interagissent biologiquement avec l'organisme, comme par exemple le cœur artificiel implantable.

L'association de dispositifs médicaux dont certains sont implantables, également appelée système, peut également donner naissance à un ensemble portatif destiné à suppléer ou à contrôler une fonction déficiente d'un organe comme les poumons, le pancréas ou le tympan. Cet ensemble constitue un système de dispositifs bio-embarqués dont une partie est située à l'extérieur du corps. Avec la miniaturisation des dispositifs et pour aspects pratiques et de confort de vie des patients, les avancées technologiques conduisent à introduire dans le corps l'ensemble de ces produits.

Un large périmètre d'applications

Les dispositifs bio-embarqués possèdent des applications dans tous les domaines de la santé, du traitement au monitoring en passant par la chirurgie, le sport, le diagnostic ou la E-santé. En ce qui concerne plus spécifiquement les traitements, les applications peuvent prendre la forme de dispositifs avec libération de médicaments (dispositifs intra-utérins, pompes à insuline, etc.), de neurostimulateurs, de cardiostimulateurs, d'organes artificiels (cœur, rétine), d'implants dentaires ou cochléaires, ou bien encore de dispositifs orthopédiques. Le monitoring permet également le suivi du métabolisme, dans le cas du diabète par exemple.

1 – Dispositifs médicaux implantables actifs, réglementation harmonisée au niveau européen, DGE (avril 2015)

© Fotolia

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Des technologies répondant à des besoins croissants

Considérant le vieillissement de la population, l'augmentation du nombre de personnes souffrant de pathologies chroniques, nécessitant des prothèses et souffrant d'insuffisance fonctionnelle (motrice, cardiaque, hépatique, ect.) va augmenter significativement au cours des prochaines années, offrant **d'importantes perspectives de développement** pour les dispositifs bio embarqués.

L'interdisciplinarité comme force

Ces dispositifs résultent de plus d'une **forte interdisciplinarité** : compétences médicales, biologiques, chimiques, physiques (matériaux, mécanique et électronique), microtechniques. Les technologies utilisées peuvent par exemple être issues des secteurs de l'aéronautique et des télécommunications. Les avancées technologiques de ces différents domaines vont donc fortement contribuer au développement des dispositifs embarqués, faisant du rapprochement et de la synergie entre ces différentes disciplines un élément clé pour la croissance du marché.

Atouts de la France

La France dispose de plus d'un bon positionnement dans ce secteur à cause notamment de son expertise historique.

Dans le domaine de la mécanique notamment en fonderie et en forgerie, elle a su profiter **d'excellentes compétences en chirurgie orthopédique** pour développer un savoir-faire particulier sur les prothèses. Près **d'un tiers de l'orthopédie mondiale est produite en France**, et 65 % de cette production est exportée[2]. La France a su capitaliser sur ses compétences et se maintenir à la pointe de l'innovation sur cette brique de production industrielle. Positionnée sur le très prometteur secteur de l'impression 3D Osseomatrix est une entreprise qui a par exemple inventé un procédé de 3D *printing* direct de céramique biologique permettant de réaliser sur mesure des implants osseux minéraux. Grâce à cette innovation de rupture, la société figure parmi les seize lauréats du concours mondial « innovation 2030 ».

Les **compétences françaises dans le domaine de la simulation cardiaque** figurent également parmi les plus élevées au monde. Le premier cœur artificiel total a ainsi été développé par la société Carmat et demeure aujourd'hui le projet le plus avancé, avec trois patients implantés depuis 2013. L'IHU LYRIC de Bordeaux est également un élément clé du développement du secteur cardiovasculaire en France.

Dans le domaine de **l'audition, de la neurologie ou de la diabétologie**, elle dispose également d'un savoir-faire important à l'origine de projets novateurs qui peuvent déboucher sur des innovations majeures.

2 – Données du *Pôle des technologies médicales*

Liens avec d'autres technologies clés

Le développement du marché des dispositifs bio-embarqués est fortement lié à d'autres technologies clés 2020 :

■ **Cobotique et humain augmenté** : besoin de maîtriser les technologies et d'innover pour développer de nouveaux dispositifs bio-embarqués, notamment pour les organes-artificiels ou exosquelettes intelligents ;

■ **Capteurs** : intégrés dans les dispositifs bio-embarqués pour permettre un suivi en temps réel de l'activité d'une fonction du patient ;

■ **Exploitation des données de santé** : certains dispositifs bio-embarqués recueillent des données grâce à des capteurs ;

■ **Ingénierie cellulaire et tissulaire** : la médecine régénératrice combine une partie synthétique avec des cellules différenciées/souches du patient. L'accélération des applications en ingénierie tissulaire peut contribuer par exemple avec les cellules souches à développer des solutions d'implants pour reconstruire le ménisque ou prévenir l'arthrose. Il en va de même pour le développement des *stents*, des valves cardiaques et des greffons, liés aux innovations de l'ingénierie tissulaire ;

■ **Nanoélectronique** : la miniaturisation des systèmes d'alimentation de certains dispositifs est un enjeu important de leur efficacité et endurance;

■ **Microfluidique** : interface souvent indispensable entre le dispositif bio-embarqué et le corps humain ;

■ **Fabrication additive** : mobilisée de plus en plus pour la fabrication de prothèses ;

■ **Matériaux avancés :** permettent de renforcer la biocompatibilité de certains dispositifs ainsi que le meilleur relargage des dispositifs actifs.

Les marchés

Un marché mondial en forte croissance

Les projections de croissance sur le marché des dispositifs bio-embarqués montrent une **forte croissance** d'ici 2020. Estimé à 58 milliards de dollars en 2014, le marché mondial des dispositifs bio-embarqués devrait atteindre **116 milliards de dollars à l'horizon 2020**, sur la base d'une **croissance moyenne annuelle de 10,3 %**.

Cette forte croissance s'explique notamment par l'augmentation de la part âgée de la population ainsi que des prévalences des pathologies cardiaques, orthopédiques et de la colonne vertébrales associées. La combinaison de ces facteurs devrait fortement influer sur la demande mondiale. Les États-Unis dominent et devraient continuer de dominer le marché, suivis par l'Europe[3][4]. Ces deux marchés comptent à eux seuls pour 70 % du marché mondial des dispositifs bio-embarqués en 2013. **Le marché le plus prometteur à l'horizon 2020 est pourtant celui de l'Asie Pacifique** qui devrait représenter 20 % de parts du marché en 2020. Cette forte dynamique de croissance dans la région s'explique notamment par l'augmentation à la fois des maladies chroniques mais aussi du pouvoir d'achat des patients.

© Fotolia

Des segments particulièrement porteurs

■ Le marché mondial des prothèses est le segment le plus important et comprend de nombreux sous-segments : les implants et prothèses dentaires, mammaires, cardiaques, orthopédiques, etc. Le marché total des prothèses est également important en France où chaque année sont implantés 11 millions de prothèses dentaires, plus de 500 000 prothèses mammaires, 140 000 prothèses de hanche, 40 000 prothèses de genou et près de 200 000 *stents* dont la moitié de *stents* délivrant une molécule thérapeutique. **En 2050, on estime qu'un Français sur deux vivra avec une prothèse**[5].

3 – *Global Bio-implants Market (Types, and geography) - Size, Share, Global Trends, Company Profiles, Demand, Insights, Analysis, Research, Report, Opportunities, Segmentation and Forecast, 2013 – 2020*, Research and Markets, 2014

4 – *Global Bio-implants Market (Types, and geography) - Size, Share, Global Trends, Company Profiles, Demand, Insights, Analysis, Research, Report, Opportunities, Segmentation and Forecast, 2013 – 2020*, Research and Markets, 2014

5 – Les dispositifs médicaux implantables « Comment concilier sécurité et innovation ? », Académie nationale de pharmacie, août 2013

Si le marché total est difficile à évaluer, on peut noter que le principal sous-segment est celui des implants et prothèses orthopédiques, dont le marché est estimé à 29,2 milliards de dollars en 2012. Sur une base de croissance annuelle moyenne de 4,9 %, il devrait atteindre 42,8 milliards en 2020[6]. Les entreprises leaders de ce domaine sont américaines (Johnson & Johnson, Zimmer Holdings et Strykers). La position de la France est cependant intéressante sur ce sous-segment puisque 21 entreprises françaises figurent parmi les 54 principales que compte le marché[7].

■ Le marché mondial des organes artificiels a quant à lui particulièrement bénéficié **d'une multitude d'avancées technologiques** au cours des deux dernières décennies. Afin de répondre aux besoins non satisfaits, le marché global devrait atteindre les **39 milliards de dollars d'ici 2020** avec une **croissance annuelle de 9,3 %** entre 2014 et 2020[8].

Le marché mondial des organes artificiels est dominé par les États-Unis, suivi de l'Europe. Biomet et Medtronic figurent au rang des entreprises leaders du marché.[9] **L'Asie Pacifique est la région où le marché se développe le plus rapidement** avec une croissance moyenne annuelle estimée à 11 % entre 2014 et 2020, du fait notamment de l'amélioration des systèmes de soins.

En 2013, le marché mondial était dominé par le segment du rein artificiel qui représentait un revenu de près de 12 milliards de dollars tandis que le segment dont la croissance annuelle estimée est la plus forte est celui du foie artificiel (11 % entre 2014 et 2020).

Parmi les avancées technologiques les plus importantes, l'implantation intégrale du premier organe artificiel est à noter. Il s'agit d'un cœur artificiel développé par la société française Carmat et implanté pour la première fois en décembre 2013. Les industriels se concentrent actuellement sur le développement d'implants bioniques comme des bio-poumons ou des pancréas artificiels pour des pathologies qui ne peuvent être guéries par des traitements alternatifs[10].

■ Selon les estimations, le marché mondial des dispositifs médicaux implantables actifs devrait également connaître une forte croissance et atteindre près de **25 milliards de dollars en 2016** (sur la base d'une **croissance annuelle moyenne de 8,9 %** entre 2010 et 2016).

Si le marché est actuellement dominé par les implants cardiaques et les implants cochléaires, ce sont les neuro-stimulateurs et les pompes à médicaments implantables qui observent les croissances de marché les plus dynamiques (avec des croissances annuelles moyennes respectives de 18,2 %, 10,5 % et 10,5 % entre 2010 et 2016)[11]. Ce segment **profite des nombreuses innovations technologiques** apparues ces dernières années, venues compléter les traditionnels pacemakers. Les entreprises américaines Medtronic et Johnson & Johnson comptent parmi les leaders du marché mondial des dispositifs médicaux implantables actifs.

Les défis technologiques à relever

Miniaturisation des dispositifs

Un défi technologique important pour le développement des dispositifs bio-embarqués concerne la miniaturisation, relevant dans certains cas tant des nanotechnologies que de la robotique. La réduction de la taille des dispositifs entraîne également des enjeux portant sur la miniaturisation des sources d'énergie alimentant les dispositifs afin de pouvoir augmenter leur durée de vie. C'est tout particulièrement le cas des dispositifs médicaux implantés actifs, qui ont besoin de sources d'énergies fiables sur le long terme. Le développement de biopiles inépuisables capables de générer de l'électricité à partir de glucose et d'oxygène présents dans l'organisme sont un exemple de technologies en développement prometteuses. La France s'avère en bonne position pour relever ce défi avec la réalisation du premier essai réussi sur un mammifère par une équipe de chercheurs en 2012.

6 – Orthopedic Devices Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2013 - 2019", Transparency Market Research, 2015

7 – Le marché des dispositifs médicaux implantables analyse et recommandations, aie Franche-Comté, 2011

8 – Global Artificial Organ & Bionics Market By Product (Artificial Heart, Liver, Kidney, Pancreas, Bionic Limbs, Hear Valves, Cardiac, Vision), By Technology (Mechanical, Electronic) Grand View Research, Inc., June 2014

9 – Medical Bionic Implant /Artificial Organs Market - (Vision Bionics/Bionic Eye, Brain Bionics, Heart Bionics/Artificial Heart, Orthopedic Bionics and Ear Bionics) – Trends and Global Forecasts to 2017

10 – Artificial Vital Organs and Medical Bionics Market (Artificial Heart, Kidney, Liver, Pancreas & Lungs, Ear Bionics, Vision Bionics, Exoskeletons, Bionic Limbs, Brain Bionics and Cardiac Bionics) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2012 - 2018

11 – *Microelectronic Medical Implants: Products, Technologies & Opportunities*, BBC Research 2011

Bio-stabilité et biocompatibilité

La bio-stabilité et la biocompatibilité est un autre défi technologique essentiel pour le développement des dispositifs bio embarqués afin d'annihiler les possibilités de rejet. Des systèmes résorbables ne laissant aucun corps étranger quelques mois ou années après leur mise en place peuvent être une solution, ils sont développés notamment dans le cadre de *stents* délivrant une molécule thérapeutique. Le développement de bio-matériaux qui empêcheraient tout rejet est un facteur qui pourrait porter la croissance du marché des dispositifs bio-embarqués.

Les techniques de la fabrication additive permettent de plus la fabrication d'une gamme de plus en plus vaste de prothèses et d'implants et ouvrent les perspectives de développement des dispositifs bio-embarqués. Sur ces techniques, la bio-compatibilité du produit fini demeure cependant un défi technologique majeur.

Sécurité des dispositifs

Enfin, comme pour tout objet partageant des données de santé, la sécurité des dispositifs bio-embarqués est un enjeu essentiel qu'il apparaît important de renforcer. Comme l'a rappelé la FDA américaine, certains dispositifs et logiciels qui leur sont associés présentent en effet des failles de sécurité et sont susceptibles de faire l'objet de cyber-attaques (exemple des pacemakers).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Positionner des leaders industriels

Si la France bénéficie d'une plutôt bonne position concernant les dispositifs bio-embarqués, elle manque de grands acteurs industriels spécialisés dans le domaine, et ce malgré un tissu industriel important d'entreprises des dispositifs médicaux (PME, TPE). Les pays européens concurrents comme l'Allemagne ou la Suisse disposent par exemple d'acteurs industriels importants (NobelBiocare et Straumann en Suisse).

La fabrication française reste de ce fait cantonnée à la production de petites séries alors que le marché peut prétendre à une production plus conséquente.

Structurer un secteur peu intégré

Le secteur français des dispositifs bio-embarqués apparaît également peu intégré et structuré ce qui constitue un enjeu particulier du fait notamment de la multidisciplinarité nécessaire au développement de ce type de dispositifs. La création du **Pôle des Technologies Médicales (PTM)** est un pas encourageant vers la structuration. L'association regroupe en effet entreprises et laboratoires du territoire français et a pour vocation de développer la visibilité des compétences et des savoir-faire locaux et de faciliter l'innovation.

Les enjeux réglementaires

Les cadres réglementaires qui régulent tant l'accès au marché que le remboursement des dispositifs bio embarqués sont amenés à évoluer, notamment en ce qui concerne les dispositifs médicaux implantables. Suite au scandale sanitaire provoqué par la découverte en 2010 d'implants mammaires non conformes, le renforcement de l'évaluation de la sécurité et de la traçabilité des DMI est devenu un élément d'intérêt. Si les propositions de règlements présentées par la commission européenne en 2012 en remplacement de la directive 93/42/CEE n'ont à ce jour pas été appliquées, la nécessité d'adapter les réglementations aux enjeux soulevés par l'évolution des dispositifs bio-embarqués restera d'actualité dans les années à venir.

L'accès au marché pour les industriels peut en outre être freiné par un **manque d'homogénéité des cadres législatifs.** La réglementation est en effet hétérogène selon les dispositifs et peu lisible pour les acteurs des dispositifs bio-embarqués. L'unification des procédures de certification comme la formalisation de nomenclatures au sein des hôpitaux pour financer l'achat de prototypes innovants peuvent ainsi par exemple faciliter la compréhension et l'application de législations parfois complexes. .

À l'échelle européenne comme internationale, **le manque d'harmonisation entre les différentes législations** est un facteur qui contraint également l'accès aux marchés pour les industriels, du fait notamment de différences importantes entre les États-Unis et l'Europe.

Enfin, pour ce qui est plus spécifiquement des organes artificiels et des dispositifs médicaux implantables, **la réglementation actuelle qui régule les essais cliniques est très difficile à respecter pour les industriels**, ce qui représente un frein à leur réalisation.

Analyse AFOM

ATOUTS

Excellence chirurgicale dont orthopédique, cardiaque, auditive, etc.

Très bon positionnement français à l'échelle internationale sur la production orthopédique porté par la qualité de l'innovation

Position forte sur la stimulation cardiaque et le développement de cœurs artificiels (Carmat fait figure de leader sur ce segment)

FAIBLESSES

Manque de structuration de la filière

Peu de grands acteurs industriels d'envergure internationale

OPPORTUNITÉS

Forte croissance de la demande et du marché du fait notamment des évolutions démographiques

MENACES

Concurrence européenne (Suisse, Allemagne) et des États-Unis

Évolution de la réglementation

Facteurs clés de succès et recommandations

Renforcer l'interdisciplinarité

L'interdisciplinarité étant un élément essentiel du développement des dispositifs bio embarqués, son renforcement sur l'ensemble de la filière apparaît nécessaire. Cette consolidation peut passer par la **création de plateformes mutualisées innovantes**, pour le développement et la démonstration notamment.

Structurer la filière française

Le développement de **centres d'excellence en médecine translationnelle** dans ces domaines doit également être favorisé afin de renforcer la conception et accompagner au mieux les PME.

Il est important qu'elles puissent atteindre une taille critique suffisante pour jouer un rôle sur le marché international. Les pouvoirs publics peuvent en ce sens également les soutenir afin de structurer la filière. Le soutien aux entreprises innovantes peut également passer par le **renfort des financements et aides apportés à la recherche et au développement.**

Organiser une réflexion sur la réglementation

Enfin, les PME des dispositifs médicaux ont un rôle à jouer dans l'organisation d'une réflexion avec l'ensemble des acteurs afin d'adapter les exigences réglementaires qui contraignent fortement la réalisation d'essais cliniques sur les organes artificiels et les dispositifs implantables.

Acteurs clés

Acteurs académiques *:*

Les centres de recherches qui contribuent, de manière plus ou moins directe, au développement des dispositifs bio embarqués ont pour particularité d'être des centres multidisciplinaires. Sans être exhaustifs, nous pouvons citer deux équipes particulièrement actives au sein du CNRS, l'**INSIS** qui s'intéresse en particulier à l'ingénierie de la santé et du vivant, et le **BMBI** orienté sur la mécanique du vivant qui sont particulièrement actives. **L'institut hospitalo-universitaire (IHU)** de rythmologie et modélisation cardiaque (**LYRIC)**, à Bordeaux est quant à lui spécialisé dans l'étude, le diagnostic et le traitement des dysfonctions électriques du cœur. **D'autres IHU travaillent également sur des projets de dispositifs médicaux bios embarqués pour suppléer des fonctions permettant aux patients plus d'autonomie. L'institut de la vision** (Labex) accueille dix-sept équipes de recherche travaillant sur les différentes problématiques de la vision. Autre centre de recherche pluridisciplinaire, **l'institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (IRPHE), à Marseille** contribue au développement des dispositifs bio-embarqués à travers ses travaux sur la biomécanique notamment.

Acteurs industriels *:*

Les acteurs qui forment le tissu industriel français des dispositifs bio-embarqués sont répartis selon trois catégories : les PME et TPE, les ETI et les groupements d'industriels.

■ PME/TPE: Le tissu industriel français est essentiellement composé de TPE et PME qui développent des solutions innovantes dans toutes les applications des dispositifs embarqués. Certaines sont développées à l'international et sont fortement spécialisées sur des domaines précis. C'est le cas de **Carmat**, *leader* mondial de son domaine et première entreprise à avoir implanté intégralement un cœur artificiel. **Pixium Vision** développe de son côté des systèmes bioniques de restauration de la vision, **Neurelec** des implants cochléaires, **Tornier** des implants chirugicaux orthopédiques et **Adocia** des pompes à médicaments. **Osseometrix** est enfin une entreprise qui fabrique des prothèses osseuses en céramique par un procédé innovant d'impression 3D ;

■ ETI : Outre les PME et TPE, le tissu industriel compte également quelques ETI, positionnées sur le secteur historique de l'orthopédique pour lequel la France dispose de compétence spécifiques. Des entreprises comme **Ceraver** ou **Orhtoline France** comptent parmi les principales ;

■ Groupement d'industriels : Enfin, **l'Association PTM** regroupe industriels, chercheurs et professionnels de santé dans le but de développer l'innovation technologiques des dispositifs médicaux, prothèses et dispositifs médicaux implantables en tête.

Organismes d'interface et de soutien

Même s'il n'existe pas de structure uniquement dédiée, plusieurs pôles de compétitivité aident le développement des entreprises françaises des dispositifs bio-embarqués. On peut citer pour illustrer un exemple d'engagement de certains pôles, le cas de **LyonBiopole**, dédié à la lutte contre les maladies humaines et les cancers, **Minalogic**, dédié aux micro-nanotechnologies et aux logiciels. De manière plus spécifique, **le pôle européen de la céramique** soutien le développement d'entreprises spécialisées dans les prothèses, implants, matériaux de comblement osseux, filtres et émaux qui utilisent ce matériau.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

32 Technologies d'imagerie pour la santé

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Imagerie fonctionnelle ; interventionnelle ; structurelle ; télé-imagerie ; export ; prévention ; diagnostic précoce ; suivi thérapeutique ; médecine personnalisée ; images multimodales ; traceurs ; équipements ; logiciels ; stockage des données.

© EMEA_GI_PRO-P_Retroview_image_EC-3490Ti

Définition et périmètre

Définition

L'imagerie pour la santé regroupe l'ensemble des techniques utilisées pour l'**acquisition**, le **traitement** et la **restitution d'images** à toutes les échelles du vivant, *in vivo* ou *in vitro*, pour des applications médicales.

L'imagerie est réalisée à partir de différents phénomènes physiques et repose sur plusieurs modalités :

- Les rayons X ;
- L'optique ;
- Les ultrasons ;
- La résonance magnétique ;
- La tomographie par émission de positions (TEP) et la tomographie d'émission monophotonique (SPECT) ;
- Les modalités émergentes : magnétoencéphalographie - MEG, imagerie de résonance paramagnétique RPE, imagerie de représentation des particules magnétiques MPI, etc.

L'imagerie est **utilisée tout au long du parcours de santé** : en prévention, pour le diagnostic, pour le suivi thérapeutique et en intervention (chirurgie/thérapie assistée par l'image). L'imagerie cellulaire et l'imagerie moléculaire sont quant à elles utilisées pour la recherche biomédicale et pharmaceutique.

L'imagerie relève de quatre champs technologiques principaux :

- Les **systèmes d'émission et de détection** dont l'amélioration permet d'augmenter la sensibilité et les résolutions spatiales et temporelle ;
- Les technologies de **traitement du signal et de l'image** qui permettent notamment de superposer des images provenant de plusieurs sources et d'obtenir une vision complète et quasi réelle du patient ;
- Les **agents d'imagerie ou de contraste** (traceurs) qui permettent de fournir des images spécifiques ;
- **L'exploitation des données numériques de santé** avec les PACS qui permettent de constituer un suivi numérique du dossier patient.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Des technologies répondant à des besoins mondiaux croissants en santé

L'imagerie pour la santé constitue un marché dynamique qui devrait continuer de croître de manière importante à l'horizon 2020. Il doit en effet permette de **répondre à des besoins mondiaux croissants** du fait notamment de la place toujours grandissante des images dans le diagnostic et le traitement des maladies. Ces besoins sont particulièrement marqués en ce qui concerne l'amélioration de la prévention et de la réalisation de diagnostics plus précoces (**leviers importants de la maîtrise des dépenses de santé**) mais également dans le cadre de suivi thérapeutique personnalisé[1].

L'imagerie médicale devrait en ce sens permettre d'apporter de plus en plus d'informations indépendantes qui complètent l'examen du patient et s'avère ainsi particulièrement adaptée à la médecine personnalisée, identifiée comme l'une des grandes tendances technologique du secteur de la santé.

L'imagerie médicale est de plus ***adaptée aux dispositifs de télémédecine***, eux aussi en plein essor, bien qu'apparue fonctionnellement depuis plus de 10 ans. Ainsi par exemple les modalités d'acquisition et les technologies de partage et d'archivage des données d'imagerie de type PACS sont mobilisées dans le cadre de Permanences de soins (PDS) en imagerie médicale. Sur ce modèle, plusieurs expériences ont été conduites avec des fonds publics notamment dans la prise en charge de l'accident vasculaire cérébrale (AVC) ou du suivi de pathologies chroniques (diabètes), ces dernières résultant des pratiques et de l'articulation des nombreuses disciplines et professions de santé..

L'Union Européenne investit par ailleurs dans les technologies de l'imagerie pour la santé, à travers notamment le programme Horizon 2020 qui finance l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), institut de recherche collaboratif implanté en France.

1 – *Ibid*

Atouts de la France

Bien qu'il n'y ait pas de *leader* français en équipement d'imagerie, le positionnement de la France en matière d'imagerie pour la santé est favorable.

La recherche académique et clinique est en pleine structuration et son dynamisme profite d'un nombre important de chercheurs, de publications scientifiques, mais aussi de structures dédiées (4 IHU ; 1 IRT ; 16 Equipex ; 11 Labex). Deux réseaux nationaux de plates-formes d'imagerie (France Life Imaging et France Bio Imaging) ambitionnent en outre de favoriser la coopération scientifique et les formations.

La France dispose également d'un **bon positionnement industriel** sur les modalités d'ultrasons (*leadership* mondial de SuperSonic ou Vermon), sur l'imagerie optique, la radiologie du rachis à très faible dose irradiante (MaunaKea Technologie), l'endo-microscopie (Medtech) ainsi que pour le traitement de l'image. La position de **Guerbet** est également à noter puisque l'entreprise fait partie des *leaders* mondiaux et domine le marché européen des agents de contraste avec 25 % de parts de marché. Enfin, la filière industrielle de l'imagerie médicale exporte fortement (44 % du chiffre d'affaires des entreprises, toutes technologies confondues).

Ce positionnement est conforté par **l'accompagnement des pouvoirs publics** à travers une stratégie nationale de déploiement de la télémédecine (décret du 19 octobre 2010 relatif à la télémédecine), dont trois des cinq chantiers prioritaires sont impactant pour l'imagerie :

- permanence des soins en imagerie médicale
- prise en charge des accidents vasculaires cérébraux (Télé AVC)
- santé des personnes détenues

La mise en œuvre de cette stratégie contribue grandement à l'essor de l'imagerie pour la santé.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché des technologies de l'imagerie pour la santé dépend étroitement du développement de technologies qu'elle intègre dans ses systèmes (nanoélectronique et capteurs) mais également de technologies dont certaines de ses applications relèvent directement (exploitation des données numériques de santé). Les technologies de l'imagerie servent enfin à la croissance des marchés d'autres technologies clés (fabrication additive, dispositifs bio-embarqués, modélisation, simulation et ingénierie numérique) :

- **Exploitation numérique des données de santé** : les technologies de traitement du signal et de l'image demandent des vitesses d'acquisition et/ou de traitement de plus en plus rapides et des capacités grandissantes de traitement des flots de données et de leur stockage, en particulier pour l'imagerie biologique qui produit plus de données que l'imagerie médicale. Les PACS constituent en outre une application directe de l'exploitation numérique des données de santé ;
- **Nanoélectronique** : la miniaturisation des systèmes d'imagerie permet de les rendre moins invasifs ;
- **Capteurs** : les technologies de l'imagerie pour la santé comprennent des biocapteurs ;
- **Dispositifs bio embarqués** : obtenir une image d'organes, tissus, etc. peut permettre de développer un dispositif embarqué. Ce développement s'adapte particulièrement bien aux technologies de la **fabrication additive ;**
- **Modélisation, simulation et ingénierie numérique :** les techniques d'imagerie permettent de fournir les données nécessaires à la modélisation par exemple d'organes ou de tissus.

Les marchés

Un marché mondial en croissance

Estimé à 32,3 milliards de dollars en 2014, le marché mondial de l'imagerie pour la santé devrait croître, selon les estimations, sur une base annuelle de **5,4 % à 7 %** d'ici à 2020. Cela signifie que le marché devrait atteindre **entre 35 et 49 milliards de dollars**, représentant une **croissance considérable depuis 2012**[2,3]**.** Bien que l'Europe et l'Amérique du Nord soient les marchés les plus importants et ceux qui adoptent le plus rapidement les nouvelles technologies d'imagerie, c'est le marché asiatique qui devrait enregistrer les plus forts taux de croissance.

---

2 – Chiffres de *HealthImaging*

3 – *Medical Imaging devices : A global market overview*, Research and markets, 2013

Des segments dynamisés par l'essor des BRIC et de l'informatique médicale

Le marché de l'imagerie pour la santé est segmenté entre des **marchés traditionnels**, à savoir le marché des équipements et le marché des agents d'imagerie, et un **segment plus récent en plein développement** : le marché de l'informatique médicale[4].

■ Le marché des équipements de l'imagerie pour la santé est dominé à l'échelle mondiale par des grands groupes tels que Philips et Siemens, qui totalisent à eux seuls 78 % des revenus. Le tissu industriel français est en effet principalement composé de PME comme Mauna Kea Technologies, EOS Imaging, Supersonic Imagine. Les États-Unis concentrent 25 % des parts de marchés devant l'Europe qui représente 19 % de ce même marché.

Les marchés des BRIC apparaissent particulièrement prometteurs et dynamiques, notamment les marchés chinois et indien, qui acquièrent un grand nombre d'équipements du fait de la construction de nouvelles infrastructures hospitalières. Le marché indien devrait ainsi atteindre 1,27 milliard de dollars en 2017. L'échographie est enfin le sous-segment le plus porteur du marché mondial des équipements de l'imagerie avec 6 milliards de dollars de revenus estimés en 2012, dont 240 millions pour la France qui ne dispose pas d'entreprise *leader* positionnée sur ce sous-segment[5].

■ Le marché des agents d'imagerie et de contraste est quant à lui concentré autour de cinq principaux acteurs mondiaux (GE Healthcare, Bayer, Bracco, Mallinkrodt et le français Guerbet) et est principalement porté par les États-Unis qui concentrent 46 % des revenus[6]. Ce segment est dominé par les agents de contraste qui représentent 6,2 milliards de dollars en 2012 ainsi que par les radios pharmaceutiques estimés à 3,8 milliards de dollars.

■ Le marché mondial de l'informatique médicale, qui comprend notamment les systèmes d'archivage, de gestion et d'échange d'images, représente environ 5 milliards de dollars en 2015. Ce segment est principalement porté par le PACS radiologique (ou dossier patient de radiologie) dont **la progression annuelle est estimée à 10 %**[7]**.** À l'échelle mondiale, les PACS sont en grande majorité produits par cinq entreprises internationales (GE Heathcare, Philips Healthcare, Fuji Film, Siemens Healthcare et Agfa-Gevaert). Parmi ces leaders, 4 entreprises sont européennes alors que les États-Unis dominent largement le marché mondial. Le marché européen enregistrera en outre une croissance plus dynamique que le marché américain à l'horizon 2020. Si aucune entreprise française ne figure parmi les leaders mondiaux, le pays se place en deuxième position au niveau européen derrière l'Allemagne en termes de parts de marché et détient le plus fort taux de pénétration ces dernières années.

Les défis technologiques à relever

Interopérabilité des systèmes

L'imagerie de santé doit encore connaître dans les prochaines années des évolutions technologiques afin de répondre à un certain nombre de défis comme la nécessité de rendre les dispositifs interopérables, ce qui passe notamment par la standardisation de la communication entre les différents systèmes. La complexité des contenus échangés impose donc de repenser l'architecture des moyens de communication entre les équipements d'imagerie médicale et les systèmes concernés par la gestion et les communications des informations qu'ils délivrent.

Analyse et stockage de données massives

L'amélioration de l'analyse, du traitement et du stockage des données est également un défi essentiel, qui nécessite de faire évoluer la sensibilité et la spécificité des dispositifs. L'amélioration de l'analyse du signal et des images combinées sur grandes populations est dans ce cadre un enjeu technologique clé, au même titre que le stockage et l'analyse des données sur l'imagerie biologique, qui produit plus de données que l'imagerie médicale.

Couplage de différentes modalités

Il apparait également nécessaire de combiner différentes technologies et modalités afin d'assurer une meilleure efficacité des systèmes. Le couplage des

4 – Comme le précise le rapport PIPAME sur l'Imagerie médicale du futur, les données disponibles sur le marché sont trop disparates pour permettre d'évaluer la répartition des segments de manière fiable.

5 – *Great Growth Potential for Medical Imaging Systems*, Frost & Sullivan, 2012

6 – *Imagerie médicale du futur,* Ministère du Redressement Productif - PIPAME, 2013

7 – *Ibid*

modalités d'imagerie comme celles de diagnostic et d'intervention peut par exemple comprendre les multi-modalités issues du couplage IRM-TEP.

Amélioration des protocoles et standards scientifiques

Enfin, ces défis technologiques nécessitent parfois de lever certains verrous qui ne relèvent pas uniquement du champ scientifique, comme par exemple lorsqu'il s'agit de répondre à des enjeux relevant de l'amélioration des protocoles et des standards.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Consolider le socle industriel

Le principal défi commercial à relever pour le secteur français de l'imagerie pour la santé est de bâtir un socle industriel suffisamment important pour valoriser les innovations. Le tissu industriel français est en effet composé essentiellement de PME et de TPE mais manque de grands groupes d'envergure internationale. Les entreprises françaises, si elles arrivent à exporter à l'étranger, connaissent de plus des difficultés à s'appuyer sur le marché intérieur. Sur certains segments (médecine nucléaire et électrophysiologie notamment) sont ainsi privilégiées les solutions développées par les grands industriels au détriment de celles apportées par les PME[8].

Renforcer l'équipement des structures hospitalières françaises

De plus, si la facilité d'accès à l'imagerie est de plus en plus importante, un certain nombre de structures hospitalières restent encore à équiper en France, alors que les hôpitaux sont des vecteurs de premier choix pour la diffusion des innovations médicales. La France dispose ainsi d'un taux d'équipement en dispositifs d'imagerie médicale dédiés aux soins inférieur à la moyenne des pays de l'OCDE[9]. Faciliter l'achat de solutions d'imagerie par les hôpitaux est donc un enjeu pour les industriels français afin d'améliorer leur accès au marché national.

Faire face à la concurrence internationale

Enfin, la concurrence de nouveaux entrants sur le marché de l'imagerie pour la santé est un autre défi commercial auquel la France devra faire face. Le développement des entreprises chinoises et japonaises telles que Fuji Film ou Fujitsu est par exemple une menace de plus en plus importante pour les entreprises françaises dans le segment de l'informatique médicale pour l'imagerie.

Les enjeux réglementaires

L'imagerie de santé est parfois limitée par des contraintes réglementaires, françaises et européennes, qui sont relatives à la fois aux **dispositifs médicaux** (pour les équipements et logiciels) mais également aux **médicaments** (pour les agents de contraste). Cette différence entre les procédures réglementaires peut induire des difficultés pour faire coïncider le cycle de développement d'un équipement avec la molécule qui lui est associée (le cycle de développement d'un produit est sensiblement plus long que celui d'un équipement)

Les exigences réglementaires pour le **remboursement et la prise en charge** des dispositifs d'imagerie sont de plus très variables selon les équipements. A noter, le tarif bas des actes liés aux dispositifs d'imagerie peut réduire la capacité des hôpitaux à acheter, freinant ainsi potentiellement l'accès des industriels au marché français. Ajouté à cela, le code des marchés publics qui ne favorise pas l'achat innovant par les hôpitaux.

8 – *Imagerie médicale du futur,* Ministère du Redressement Productif - PIPAME, 2013

9 – *Ibid*

Analyse AFOM

ATOUTS

Bon positionnement de la France avec la visibilité internationale de plusieurs équipementiers (Super Sonic Imagine et Vermon). Sur ce segment il manque toutefois d'entreprises en position de *leader*

Savoir-faire industriel unique sur certains segments (modalités d'ultrasons imagerie optique, radiologie du rachis à très faible dose irradiante, l'endo-microscopie, traitement de l'image)

Excellence académique

Leader européen des agents de contraste (Guerbet)

Tissu industriel dynamique à l'export

FAIBLESSES

Manque de structuration sur l'ensemble de la filière

La réglementation trop hétérogène freine le développement

OPPORTUNITÉS

Diversité des applications

Apparition de nouveaux besoins dans des secteurs porteurs

MENACES

Très forte concurrence internationale portée par des entreprises leaders du marché

Arrivée de nouveaux entrants via le développement des marchés chinois et japonais

Facteurs clés de succès et recommandations

Il est essentiel de penser l'imagerie de santé comme *un vecteur d'économies de santé dans le cadre de la médecine personnalisée*[10]. Il est donc particulièrement important pour les entreprises françaises d'être impliquées dans la structuration de la filière ainsi que de pouvoir valoriser leurs compétences et être moteur d'innovation.

10 – *Imagerie médicale du futur,* Ministère du Redressement Productif - PIPAME, 2013

Promouvoir les compétences industrielles françaises

- Sur le plan industriel, des actions de promotion des compétences industrielles pourraient être renforcées. La filière française est en effet fragmentée et se caractérise par une absence de *leader*, notamment sur le secteur de l'équipement ;
- Le soutien aux PME pour qu'elles atteignent une taille critique, des alliances et des rapprochements

entre PME et ETI seront ainsi certainement nécessaires pour **structurer la filière** et porter des projets d'envergure.

Stimuler la demande intérieure et extérieure

■ Les pouvoirs publics doivent aussi **stimuler la demande** en accompagnant les PME nationales dans la pénétration du marché intérieur, auprès des structures hospitalières en particulier ;

■ Il est également important de renforcer leur présence sur les marchés extérieurs concurrents déjà établis (États-Unis, Allemagne, Pays-Bas) comme en développement (Japon, Chine).

Renforcer la recherche partenariale

■ **Le renforcement de l'innovation et de la recherche partenariale technologique** est un autre facteur clé de succès. Les moyens déjà mis en place pour favoriser des collaborations entre secteurs public et privé (Programme d'investissements d'avenir, création des Sociétés d'Accélération de Transfert Technologique) doivent être complétés par un meilleur accès au financement pour des collaborations entre partenaires académiques et des entreprises ;

■ Afin de saisir les opportunités liées à l'émergence de nouveaux besoins dans des secteurs porteurs, les pouvoirs publics peuvent enfin **favoriser le transfert technologique.**

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

Au sein des organismes de recherche, il est possible de distinguer les structures dédiées à l'imagerie de celles actives en santé, et ce afin de saisir avec plus de finesse la structuration de l'ensemble des acteurs académiques des technologies de l'imagerie pour la santé.

■ Organismes de recherche dédiés à l'imagerie : La création de deux infrastructures nationales de recherche, **France Life Imaging** et **France Bio Imaging**, est un projet important financé dans le cadre des investissements d'avenir puisque ces infrastructures ont pour objectif de coordonner à l'échelle nationale les activités de recherche en imagerie afin de mutualiser et valoriser les compétences académique. A ces infrastructures s'ajoutent des Labex : **TRAIL** spécialisé sur les applications médicales de l'imagerie (oncologie, neurologie, cardiologie, etc.), **PRIMES** dont l'objectif est de développer des méthodes d'imagerie appliquées en oncologie et **WIFI** porté sur la physique des ondes et de l'imagerie**.** Le **CREATIS**, unité de recherche spécialisée en imagerie médicale, le **CENIR**, centre de neuro-imagerie de recherche, et l**'institut d'imagerie neuro-fonctionnelle** sont des centres de recherche importants en imagerie et rattachés à des structures institutionnelles (ICM, CNRS, INSERM). La France accueille également l**'ESRF**, centre de recherche collaboratif européen. **Mircen et NeuroSPin** sont enfin des centres de recherche rattachés au CEA qui sont actifs en imagerie pour la santé.

Dans le domaine de la radiopharmarcie, les laboratoires publics **Arronax et ILL** sont un atout dans la recherche et l'optimisation de procédés de production de radioéléments.

■ Organismes de recherche actifs en santé: Bien qu'ils ne soient pas spécialisés dans l'imagerie, d'autres organismes de recherche actifs en santé jouent un rôle notable dans le développement technologique de ce domaine. Il s'agit notamment de l'IRT B-COM, des **Labex** IRON, BRAIN, GRAL, CELya, CAMI, LMH, COMIN Labs et MS2T. A ces organismes de recherche, s'ajoutent des centres nationaux comme le **CEA ou l'Inria.**

■ Organismes de formation : L'**Insa Lyon**, en plus d'être une institution tutelle du CREATIS, a ouvert un parcours en Master 2 à l'interface des sciences et de la santé qui comprend des modules dédiés aux technologies de l'imagerie. Le centre de formation **IRCAD** dispose d'une équipe « informatique et imagerie médicale ». L'école **TélécomParisTech** propose également des formations dédiées aux technologies de l'imagerie avec un département de traitement du signal et des images et d'imagerie ultrasonore.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

La principale Entreprise de taille intermédiaire française est la société **Guerbet** qui est pionnière dans le

segment des produits de contraste (fondée en 1926). Sa position sur le marché français, européen et international est intéressante puisqu'elle figure parmi les *leaders*.

PME et TPE

Certaines PME et TPE du tissu industriel français des technologies de l'imagerie pour la santé sont porteuses de l'innovation française dans ce secteur. Leurs compétences couvrent de nombreux segments de l'imagerie : **Supersonic Imagine et Vermon** font figure de leaders mondiaux sur les systèmes d'ultrasons. Supersonic Imagine a ainsi mis au point une technique d'échographie protégée par 30 brevets internationaux. Vermon est un leader dans la conception et la fabrication des transducteurs ultrasonores. Les fondateurs de **Mauna Kea Technologies** se sont inspirés des technologies de l'astrophysique pour mettre au point un système d'endomicroscopie capable de fournir des images en temps réel. **EOS Imaging propose** des systèmes innovants d'imagerie par rayons X basse dose**. Trixell,** *joint-venture* entre les géants de l'imagerie Thalès, Philips et Siemens, est également positionnée sur le secteur des rayons X et fabrique des détecteurs numériques destinés à la radiologie médicale.

Dans le domaine radio pharmaceutique, la France compte 3 entreprises : **Cyclopharma** qui propose des solutions d'imagerie moléculaire pour l'aide au diagnostic et le suivi thérapeutique en oncologie, neurologie et cardiologie et **CIS bio international** qui propose quant à elle des médicaments radio pharmaceutiques tant en diagnostic pour tomographie par émission de positons (TEP) ou pour la tomographie d'émission monophotonique (TEM) qu'en thérapie. Enfin, l'ETI **Advanced Accelerator Applications (AAA)** conçoit et commercialise des produits diagnostiques thérapeutiques de médecine nucléaire moléculaire dans les domaines de l'oncologie, la neurologie, la cardiologie et les maladies infectieuses et inflammatoires.

Organismes de soutien et d'interface

- Structures dédiées à l'imagerie : pour soutenir les entreprises françaises un IHU dédié a été créé, le **MIX-Surg**, auquel s'ajoutent **neuf Equipex** qui touchent directement les secteurs de l'imagerie pour la santé (LILI, 7T AMI, ULTRABRAIN, ANINFIMIP, Morphoscope2, ImaginEx BioMed, IMAPPI, Paris-en-Résonance, SENS) ;

- Structures actives en santé : d'autres structures ne sont pas spécifiquement vouées au développement de l'imagerie pour la santé mais contribuent aux innovations dans ce domaine. C'est le cas de cinq **pôles de compétitivité** (Alsace BioValley, Cancer Bio Santé, Medicen, Lyonbiopôle, Systematic), **de deux IHU** (A-ICM, LIRYC), **d'un IRT** (B-COM), et **de sept Equipex** (ARRONAXPLUS, S3, MUSIC, Flowcytech, REC-HADRON, ROBOTEX, FIGURES).

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

33 Exploitation numérique des données de santé

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, **SANTÉ ET BIEN-ÊTRE**, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Intégration ; échange ; smart data ; prise en charge des patients ; technologies de l'information ; protection ; sécurité.

© Fotolia

Définition et périmètre

Définition

L'exploitation numérique des données de santé comprend les technologies permettant l'**intégration**, l'**échange** et l'**utilisation** de **l'ensemble des données médicales** multimodales, pour une application donnée. Ces données peuvent prendre des formes très diverses dans leur contenu comme dans leur format de diffusion. À titre d'exemples, sont ainsi comprises dans les données de santé :

- Les données statistiques à l'échelle d'une population : prévalence et incidence des maladies, maladies émergentes, etc. ;
- Les caractères génétiques, considérés comme des données de santé en France depuis la loi du 6 août 2004 ;
- Les données personnelles relavant du domaine de la santé, particulièrement encadrées par la loi et uniquement diffusables par dérogation pour la recherche médicale et pharmaceutique ;
- Des données sociales sur les individus susceptibles d'influencer leur état médical (âge, sexe, IMC, alimentation, etc.).

Le développement des technologies de communication numérique modifie en profondeur l'utilisation de ces données en médecine.

Les technologies de l'exploitation numérique des données de santé permettent la **création de valeurs sur un ensemble de données traitées et valorisées** pour devenir des *Smart Data* utiles à la **prise de décision et à la recherche médicale**. Elles se distinguent ainsi des données massives ou *Big Data* puisque leur finalité est clairement établie.

Un large périmètre d'applications

L'exploitation numérique des données de santé trouve de nombreuses applications dans des domaines variés de la santé :

- En médecine de **précision** ;
- En médecine **ambulatoire** : l'exploitation numérique des données de santé soutient les soins post-hospitaliers à domicile, par le biais notamment de la télésurveillance médicale qui permet de recueillir et d'interpréter à distance des données de santé ;
- En médecine **préventive** sur les patients à risque : l'accès aux données de santé contribue à l'amélioration de la prise en charge des patients ainsi qu'à la pharmacovigilance ;
- **Pour l'amélioration des essais cliniques**, en particulier ceux effectués sur de grands ensembles de population ;
- En **recherche préclinique**, à travers une meilleure compréhension des mécanismes des maladies *via* l'analyse à grande échelle des données pharmacologiques, pharmacocinétiques et toxicologiques ;
- En **épidémiologie**, *via* l'analyse de données de santé sur un ensemble de population.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Répondre à des besoins croissants de prise en charge

L'amélioration de la prise en charge des patients permise par l'exploitation numérique des données de santé, est un enjeu particulièrement clé. En effet, selon l'OMS, le coût des dépenses de santé liées à une mauvaise prise en charge des patients est estimé entre 6 et 29 milliards de dollars par an dans les pays développés[1].

Le recours aux technologies de l'information pour l'enregistrement et le partage des données médicales des patients est, pour l'organisation mondiale, un élément nécessaire pour tous les professionnels de la prise en charge, en ce qu'il permet une **meilleure maîtrise des dépenses** dans un contexte où les systèmes de santé sont de plus en plus sollicités.

Par ailleurs, l'exploitation numérique des données de santé constitue un facteur important du développement de la médecine de précision.

Atouts de la France

Le positionnement des acteurs français sur cette technologie est d'autant plus important que la France dispose d'une **recherche académique de haut niveau** dans le domaine du développement de logiciels, grâce à l'Inria, établissement public de recherche dédié aux sciences du numérique. L'intégration des données de

1 – *Smart Healthcare Systems Market Segment Forecasts up to 2022*, Transparency market research, juin 2015

santé est, quant à elle, partiellement assurée par le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (LETI), rattaché au CEA.

Autre atout pour la France, le **bon niveau de la recherche médicale** favorise son positionnement sur le marché de l'exploitation numérique des données de santé.

L'existence **d'un système national des données de santé** (SNDS) est un autre élément qui mérite d'être relevé, alors que le projet de loi de modernisation du système de santé prévoit la centralisation et l'ouverture des données. La France bénéficie en effet d'importantes bases de données publiques nationales, issues historiquement du système de remboursement de l'assurance maladie. Collectées par plusieurs institutions publiques, elles s'avèrent particulièrement complètes et précises et sont déjà utilisées depuis quelques années par les industriels et chercheurs dans le cadre d'études cliniques. Le recours à ces données permet à la fois d'améliorer la prévention, de valider l'efficacité de certaines solutions thérapeutiques, et de contribuer à l'efficacité du système de santé.

Par ailleurs, la **coopération entre les secteurs publics et privés** est très développée en France, s'appuyant sur un tissu industriel essentiellement composé de PME et TPE qui concentrent leurs activités sur l'exploitation des données de santé au sein des hôpitaux ainsi que sur l'échange des données entre les différentes structures de soin. Cet univers industriel travaille ainsi en étroite coopération avec les acteurs publics (ARS, MiPih, etc.) sur des projets de partage des données de santé à l'échelle d'un territoire.

La **volonté des pouvoirs publics** d'accompagner l'émergence des technologies numériques de santé est concrétisée en 2009 par la création de l'ASIP, l'Agence des systèmes d'information partagés de santé. Cette agence a notamment pour mission la maîtrise d'ouvrage des projets de systèmes d'information en santé et la définition de référentiels, standards ou produits contribuant à l'interopérabilité de ces même systèmes. Alors qu'elle était également en charge de la production et du déploiement du dossier médical partagé (DMP), celui-ci devrait très prochainement être confié à la CNAMTS.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché de l'exploitation numérique des données de santé est liée à la maîtrise de production de données ainsi qu'à leur exploitation et à leur analyse.

Technologies de production de données :

- Certains **dispositifs bio embarqués** récupèrent et communiquent des données précises de santé de l'individu dans lequel ils sont implantés (*pacemakers*, pompes à insuline, etc.) ;
- Les **capteurs** peuvent par extension être des composants des dispositifs embarqués et servir à la production de données de santé ;
- De manière indirecte, l**a nanoélectronique** aide également à la production de données de santé. En effet, la miniaturisation des circuits intégrés dans les dispositifs et capteurs permet de pouvoir produire un nombre toujours plus important de données.

Technologies d'exploitation et d'analyse des données :

- **L'imagerie pour la santé** : les systèmes d'archivage et de transmission d'images, ou *Picture Archiving and Communication System* (*PACS)* sont des systèmes d'archive et de partage des données patient particulièrement utiles puisqu'ils constituent un support à la prise de décision médicale.
- **La valorisation et l'intelligence des données massives (*Big Data*) :** les solutions de *Big Data* sont indispensables à la création de logiciels d'aide à la décision. Les capacités d'analyse de gros volumes de données aident ainsi par exemple au développement de la médecine de précision.

Les marchés

Le marché mondial de l'exploitation des données numériques de santé devrait selon les estimations connaître **une forte croissance à l'horizon 2020**, atteignant **66 milliards de dollars**[2].

Facteurs explicatifs de cette forte croissance

Ce marché devrait être principalement porté par l'accroissement de la demande pour des données

2 – *Healthcare IT: A Global Strategic Business Report*, Global Industry Analysts, 2014

personnelles couplées aux avancées technologiques rapides dans le domaine de la santé numérique. La meilleure acceptation du partage d'informations entre les structures médicales est un autre facteur de croissance du marché, encouragée notamment par des initiatives gouvernementales promouvant les technologies de l'information au sein des structures hospitalières[3]. En France, ces initiatives prennent par exemple la forme de programmes, tels que « Territoire de soin numérique » qui bénéficie de 80 millions d'euros de financement dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir sur la période 2014-2017 et « Hôpital Numérique » qui définit un plan de développement et de modernisation des systèmes d'information hospitaliers sur la période 2012-2017.

Le marché devrait principalement être porté par le segment des **systèmes d'information technologiques cliniques**, dont les prévisions de croissance sont les plus fortes. À noter que ces systèmes permettent de réduire les erreurs médicales comme par exemple le *PACS* (système permettant de gérer les images médicales grâce à des fonctions d'archivage).

Répartition mondiale du marché

Aujourd'hui, les États-Unis dominent ce marché, du fait notamment d'initiatives gouvernementales favorables mais aussi de la présence d'infrastructures de technologies de l'information sophistiquées.

Le marché de l'Asie Pacifique est celui qui devrait connaître la plus forte croissance à l'horizon 2020 avec une croissance moyenne annuelle estimée à 11 %[4]. Cette dynamique s'explique à la fois par l'augmentation des dépenses gouvernementales de santé et le développement des investissements dans les structures de soin.

Au rang des acteurs les plus importants du marché de l'exploitation des données de santé se trouvent des producteurs de données spécialisés en santé, tels que General Electric Healthcare, Philips Healthccare, Agfa Healthcare et Samsung Electronics. Certaines sociétés numériques devraient rapidement devenir incontournables sur ce secteur dans les années à venir, à l'instar d'Intel, d'Oracle ou bien de Google.

3 – *Healthcare IT: A Global Strategic Business Report*, Global Industry Analysts, 2014

4 – *Healthcare IT: A Global Strategic Business Report*, Global Industry Analysts, 2014

Les défis technologiques à relever

L'interopérabilité des systèmes

L'évolution rapide et profonde des technologies et des standards constitue un enjeu important de l'exploitation des données de santé puisqu'elle complexifie la compatibilité des systèmes et favorise l'instabilité. L'intégration de données peut en effet prendre plusieurs années, du fait notamment du caractère complexe de l'opération, alors que les technologies dans lesquelles elles sont intégrées peuvent entre-temps être dépassées. Le renfort d'interopérabilité des différents systèmes de données est donc un élément clé pour le développement de l'exploitation des données numériques de santé. Il doit prendre en compte les deux dimensions de l'intégration : l'intégration des systèmes au sein d'une structure et l'intégration permettant l'échange entre différentes structures.

La sûreté des systèmes et le stockage de données massives

La sûreté des systèmes est un autre enjeu important qui doit être mieux pris en compte par l'ensemble des acteurs de l'exploitation numérique des données de santé. Elle concerne tant la sûreté des dispositifs médicaux, qui collectent directement les données, que les logiciels et systèmes, qui exploitent et partagent ces données.

Développer des applications dans les secteurs clés

D'autres défis technologiques de l'exploitation numérique des données de santé résident dans la capacité à développer des applications dans des secteurs clés, notamment la validation des médicaments. Les données de santé pourraient en effet aider les industriels à valider de manière plus rapide leurs nouvelles molécules et à identifier de nouvelles cibles, par le biais notamment du recours à la médecine de précision. La rationalisation de l'approche thérapeutique par la mesure de l'efficience des médicaments sur les populations étudiées est une autre application importante.

La miniaturisation des technologies de production de données de santé

La capacité à réaliser des circuits intégrés dans les systèmes bio-embarqués et des capteurs, miniaturisés et intégrant le bon volume de données nécessaires au suivi médical, constitue également un défi technologique d'importance.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Structurer un marché fragmenté

Un premier défi commercial de l'exploitation numérique des données de santé concerne la structuration du marché, qui apparaît aujourd'hui fragmenté par une diversité d'acteurs pluridisciplinaires (éditeurs de logiciels, prestataires de services informatiques, fabricants de dispositifs médicaux et de matériels électriques, etc.) ainsi que par le manque de réalisations à l'échelle nationale et la multiplicité d'expérimentations régionales[5] (exemple des Espaces numériques régionaux de santé mis en place pour intégrer les échanges entre ARS).

Le tissu industriel français est en outre principalement composé de PME et de TPE et ne dispose pas de grandes entreprises capables de concurrencer les leaders mondiaux américains.

Se développer à l'international

Les entreprises françaises sont également très peu actives à l'export et sur la scène internationale. Cela est en partie lié au fait que certaines données dépendent du cadre national (langue, organisation du système de soin, etc.). Ce point pourrait cependant être amélioré si des standards d'intégration à l'échelle internationale étaient élaborés.

Former les professionnels de santé

Enfin, le manque de formation des professionnels de santé aux enjeux de l'exploitation numérique des données de santé, au partage d'informations et au travail en réseau apparaît être un autre point susceptible de freiner le développement du marché.

Les enjeux réglementaires

La protection des données : entre exigences de confidentialité et sécurité des patients.

La protection des données stockées et échangées est un enjeu particulièrement important dans le domaine de la santé, puisque celles-ci relèvent au niveau réglementaire à la fois de la protection de la vie privée mais aussi du droit d'accès du malade à toutes les informations qui le concernent. Ainsi, si la CNIL encadre les conditions d'accès et d'utilisation des données personnelles en France, l'ASIP est amenée à délivrer sous conditions des agréments aux centres d'hébergement des données de santé.

Les industriels doivent également intégrer l'enjeu de sûreté au sein même de leur systèmes bio-embarqué, le piratage des données contenues pouvant avoir des conséquences directes particulièrement néfastes, à l'instar du détournement à distance du fonctionnement d'un pacemaker par un expert en sécurité informatique.

Le **renforcement des standards de sûreté** des dispositifs bio-embarqués apparaît donc nécessaire. Sur ce point, l'ASIP compte parmi ses missions *la définition, la promotion et l'homologation de référentiels, standards, produits ou services contribuant à l'interopérabilité, la sécurité et l'usage des systèmes d'information de santé*.

© Sigma Informatique

5 – Dossier de *Cap Digital*

Analyse AFOM

ATOUTS

Positionnement favorable sur le développement de logiciels (Inria)

Collaboration forte entre secteurs publics et privés

Création d'une Agence spécialisée (ASIP Santé)

Existence d'un système national de données de santé (SNDS) qui devrait être renforcé

FAIBLESSES

Compatibilité des systèmes complexes

Absence de grande entreprise française capable d'assurer la place de leader à l'international

Manque de formation des professionnels de santé sur ces enjeux

OPPORTUNITÉS

Amélioration de la prise en charge des patients

Réduction des dépenses de santé

Création de bases de données permettant de croiser et de valoriser les informations

MENACES

Risques sur la protection des données (piratage, etc.)

Concurrence des États-Unis, *leader* du marché

Développement de la concurrence sur les marchés de l'Asie-Pacifique

Facteurs clés de succès et recommandations

Afin de pouvoir améliorer le positionnement français sur le marché de l'exploitation numérique des données de santé, il apparaît nécessaire de structurer ce marché aujourd'hui fragmenté. Cette structuration peut consister à :

- Soutenir la coopération entre PME ;
- Renforcer les économies d'échelle pour passer d'expérimentations locales à un marché d'ampleur national ;
- Accompagner des premiers déploiements à grande échelle par des aides financières (R&D, fonds propres, capital-risque).

Les PME françaises doivent en effet réussir à **étendre leur périmètre**, du niveau local au niveau national pour pouvoir atteindre le marché international.

La spécialisation est un autre facteur important du développement des entreprises françaises qui n'apparaissent **pas toujours assez spécialisées sur la chaîne de valeur**. Cela permettrait d'améliorer / renforcer leur positionnement sur ce marché.

L'émergence de standards et de normes, sur la protection des données et la sécurité des dispositifs en particulier, est essentielle pour fluidifier le marché très sensible des données personnelles de santé. Sur ce point, la France bénéficie du fait qu'elle a déjà adopté les standards américains et participé à leur évolution.

Enfin, la formation des professionnels de santé aux enjeux des technologies de l'information est importante pour permettre l'évolution des pratiques de santé.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

L'Inria et le LETI, rattaché au CEA, sont en France les principaux organismes de recherche sur l'exploitation des données numériques de santé. Alors que le LETI s'intéresse principalement aux technologies d'intégration des données de santé, l'Inria développe une activité sur la production logicielle pour l'exploitation de ces données. L'institut travaille également en étroite collaboration avec des entreprises, telle que Microsoft avec qui il a développé le projet *A-Brain*, pensé pour comparer efficacement d'importants volumes de données dans le but d'améliorer le diagnostic de certaines maladies du système nerveux.

Structures institutionnelles

Les structures institutionnelles ont un rôle particulier au sein de l'écosystème français de l'exploitation numérique des données de santé puisqu'elles constituent les principaux clients des entreprises. Ainsi par exemple les **ARS comme l'ASIP Santé** font appel à des entreprises pour réaliser des projets pilotes à l'échelle locale, actuellement pour la mise en place du dossier médical personnel numérique.

Les **établissements de santé** sont également d'importants fournisseurs d'offres pour le tissu entrepreneurial français, centres hospitaliers en tête. Ils sont représentés par un **groupement d'intérêt public, le MiPih,** qui rassemble plus de 400 établissements de santé qui œuvrent à construire le système d'information hospitalier de demain.

La **CNIL** est enfin un organisme institutionnel important pour l'exploitation numérique des données personnelles de santé puisqu'elle délivre notamment des autorisations d'accès aux données médico-administratives.

Start-up et PME

Les entreprises de l'exploitation numérique des données de santé sont en France essentiellement des PME dont l'activité principale est le développement de solutions logicielles. La plus importante est **Gegedim**, qui propose des solutions numériques pour les professionnels de santé, les assureurs, ainsi que les entreprises de santé. **Docapost** a mis au point pour l'Ordre national des médecins la gestion numérique du dossier pharmaceutique (DP). La société **DataMedCare** propose quant à elle des solutions aux acteurs de la santé qui prennent la forme de plateformes informatiques. Par exemple, l'une d'entre elles permet le suivi de patients télé-surveillés pour des pathologies chroniques. L'informatisation du dossier patient est également au cœur des activités d'**iCanopée** ou **Umanlife.** La PME **Enovacom** propose de son côté des solutions de sécurité et d'interopérabilité pour l'exploitation des données de santé. La société I**nteragen** propose des services de biostatistique et de bioinformatique pour exploiter les données génomiques. Enfin, **Medissimo** développe un système d'information assistant la préparation des doses de médicaments à administrer aux patients.

Organismes d'interface

Les pôles de compétitivité **Cap Digital, Medicen et Systematic** œuvrent au transfert et à la valorisation des innovations académiques ainsi qu'à la connexion avec les entreprises de l'exploitation numérique des données de santé. Ils soutiennent et accompagnent également ces entreprises par le biais d'appels à projets.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

34 Authentification forte

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, **SÉCURITÉ**
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Biométrie multimodale, biométrie révocable, multifacteurs, cryptologie, secure element, monétique, fraude, Identity and Access management, cyber sécurité, sécurité des données, contrôle d'accès.

© Fotolia

Définition et périmètre

L'authentification est le processus permettant de garantir qu'une entité (personne, machine etc.) est bien celle qu'elle prétend être. Elle permet par exemple de déterminer si une personne qui cherche à accéder à certaines données ou lieux (compte bancaire, profil internet, compte/abonnement divers, téléphone ou ordinateur personnel, etc.) est bien habilitée à le faire. Il ne faut pas confondre cette notion avec l'identification qui correspond à une entité de décliner son identité. L'identification permet donc à une entité d'annoncer son identité et l'authentification permet de la vérifier.

Traditionnellement, trois types de facteurs permettent d'authentifier un individu : ce qu'il sait (mot de passe, code pin, question secrète, etc.), ce qu'il possède (jetons, cartes, etc.) et ce qu'il est (iris, voix, empreinte digitale, etc.). L'authentification est alors qualifiée de forte lorsqu'elle a recours à une combinaison d'au moins deux de ces méthodes. D'un point de vue technologique, nous décrirons 3 types de technologies : les cartes à puces et autres dispositifs externes (*secure elements*), les mécanismes de cryptographie et la biométrie.

■ Les *secure elements* : éléments de sécurité physique

Ces éléments font généralement référence aux puces électroniques que l'on trouve dans nos cartes de paiement, cartes SIM, passeport électronique, puces sécurisées des téléphones et des ordinateurs (TPM) etc.

Dans un nombre grandissant de pays (aux États-Unis depuis 2015), la sécurité des transactions bancaires est assurée par une puce installée sur la carte bancaire. Développée suivant le standard EMV (Eurocard MasterCard Visa), cette puce contient des informations protégées qui permettent d'autoriser (ou non) des transactions. Il en est de même pour le paiement sans contact par carte bancaire.

Comme pour les cartes bancaires, des clés USB cryptographiques contiennent généralement une puce dotée d'un ou plusieurs certificats électroniques associés à une clé privée utilisable à l'aide d'un code PIN. C'est cette clé qui, utilisée dans le cadre d'un processus cryptographique, permettra de réaliser l'authentification des paiements, authentification qui pourra être validée grâce au certificat.

■ Protocoles cryptographiques et méthodes de chiffrement

Il existe deux méthodes de chiffrement : la cryptographie symétrique (ou à clé secrète) et la cryptographie asymétrique (ou à bi-clé privée/publique). La cryptographie symétrique est une méthode basée sur une clé (secrète) permettant de chiffrer et déchiffrer un message. La clé de chiffrement/déchiffrement est alors partagée entre les deux correspondants. Sa compromission engendre immédiatement la capacité de déchiffrement des messages qu'elle a chiffrés pour l'attaquant.

La cryptologie asymétrique se base sur le même principe de clés, sauf que le chiffrement est assuré par une clé publique et le déchiffrement par une clé privée. Cette méthode est certes plus lourde et plus complexe à mettre en place (et généralement plus gourmande en ressources) mais elle possède des caractéristiques réduisant les risques de compromission des échanges chiffrés en cas de perte ou de vol des clés cryptographiques, notamment grâce à l'utilisation de protocoles implantant le concept de « *perfect forward secrecy* ». La cryptographie asymétrique facilite également la gestion et la distribution des clés ce qui permet, par exemple, d'utiliser une même bi-clé pour s'authentifier auprès d'un nombre arbitrairement grand d'entités.

Ce sont les protocoles cryptographiques bâtis à partir de ces primitives qui permettront de construire un schéma d'authentification.

■ One Time Password (OTP)

Lors d'une opération sensible sur une plateforme (achat, banque, etc.), un code est envoyé, généralement par SMS, sur le mobile de la personne liée au profil concerné. Ce code n'est utilisable qu'une seule fois dans un délai très court. Cette pratique s'est fortement démocratisée via son utilisation dans le protocole 3DSecure permettant le renforcement de la sécurité des opérations de paiement en ligne sur internet.

■ Jetons (Token) OTP

Ces (petits) dispositifs génèrent, en général toutes les minutes, un mot de passe qu'il faut entrer en plus de son mot de passe habituel. L'un des dispositifs le plus couramment employé par les entreprises est le *token Secure ID* de la société RSA et ce malgré l'intrusion informatique majeure dont a été victime la société et lors de laquelle la sécurité des jetons d'authentification de ses clients pourrait avoir été compromise.

■ Biométrie

Il existe plusieurs grandes familles de techniques de reconnaissance biométrique : la reconnaissance de l'empreinte digitale, du réseau veineux du doigt, de l'iris, de la voix et de la forme du visage, etc. L'utilisateur se soumet alors à une première phase – l'enrôlement – où il présente à l'autorité en charge de l'enrôlement une ou plusieurs données biométriques qui est modélisée puis stockée comme référence. La seconde phase consiste à s'authentifier, en présentant son empreinte biométrique qui sera comparée à celle référencée.

Les systèmes de reconnaissance biométrique sont largement utilisés dans l'univers de l'identification des citoyens (passeports, douanes, etc.) et de plus en plus au niveau des entreprises et des particuliers pour des problématiques d'authentification. Une caractéristique biométrique est par définition irrévocable : on ne peut par exemple pas changer son empreinte digitale. La mise en place de systèmes de biométrie révocable à partir de caractéristiques biométriques irrévocables est indéniablement un enjeu crucial (cf. paragraphe 5). La biométrie est aujourd'hui considérée comme le futur de l'authentification à la condition qu'elle soit utilisée en complément, et non en remplacement, des techniques plus anciennes comme le mot de passe ou les codes PIN. L'authentification forte prend alors tout son sens.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La protection des données sensibles et des infrastructures critiques est un besoin sans cesse croissant. La France tient également une position de leader avec de nombreux acteurs mondialement présents sur la scène de la cybersécurité et de l'authentification forte qu'elle se doit de maintenir.

La technologie clé « authentification forte » pourra également participer à la concrétisation des ambitions de la solution « confiance numérique » de la NFI (Nouvelle France Industrielle). En effet, plusieurs actions de cette solution sont relatives au développement de l'offre de confiance en matière de cybersécurité et de la demande. Les technologies d'authentification constituent « une racine de confiance » pour bien des produits dont le développement sera soutenu dans ce cadre.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent l'authentification forte sont :	
2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel

Les technologies influencées par l'authentification forte sont :	
5	Internet des objets
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs
10	Cobotique et humain augmenté
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées

Les marchés

De par le large spectre couvert par les techniques d'authentification forte, une estimation globale du marché reste assez délicate. Le marché de la biométrie, évalué à près de 10 Md$ en 2014 est estimé à 24,5 Md$ en 2020[1].

D'une manière plus globale, les entreprises des secteurs français de la cybersécurité et du contrôle d'accès continuent leur progression et atteignent respectivement un chiffre d'affaires de 2,3 Md€ et 1,3 Md€ en 2013. Des entreprises françaises comme Morpho et sa filiale Dictao, Thales, Gemalto, Oberthur, ou Open Trust fournissent notamment des solutions d'authentification pour les marchés nationaux et internationaux.

■ Un marché tiré par la hausse de la connectivité mondiale et la dématérialisation par la transition numérique

Le marché de l'authentification forte bénéficie de la hausse de la connectivité mondiale ainsi que les applications et pratiques qui y sont liées. Selon l'agence des Nations Unies spécialisées dans les technologies de l'information et de la communication *International*

1 – Traitement Erdyn : « Next Generation Biometrics Technology Markets »

Telecommunications Union, 2,7 milliards de personnes avaient accès à internet dans le monde. 84,4 % de la population en Amérique du Nord et 35,4 % pour l'Europe et l'Asie Occidentale. En France, 82 % de la population en 2013 avaient individuellement accès à internet.

Avec d'autres technologies du Cloud Computing et de du Big Data, cette montée de la connectivité conforte également la montée de la transition numérique et de la dématérialisation, qu'elles soient au niveau des entreprise ou des particuliers (démarches et e-administration, intranet, commerce électronique, etc.). À titre d'illustration, selon la Fédération du E-commerce et de la vente à distance (FEVAD), les transactions financières liées au e-commerce sont toujours en croissance et ont atteint 56,8 Md€ en 2014 en France, en hausse de 11 % par rapport à 2013.

Figure 1 : Chiffre d'affaires généré par le e-commerce en France 2005-2014 (Source : ICE/FEVAD)

Cela coïncide fortement avec la montée en flèche de la cybercriminalité (fraude, piratage, usurpation d'identité) en France comme dans le monde. Le Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale place la sécurité et la défense des systèmes d'information au cœur des priorités stratégiques de la Nation. Rob Wainwright, directeur d'Europol (European Police Office) élève la cybercriminalité au même rang que le terrorisme comme première préoccupation mondiale en termes de sécurité.

Selon SafeNet et Gemalto, près de 1,023 milliard de données ont été volées en 2014 (1 571 incidents) au monde, en croissance de 78 % par rapport à 2013[2].

2 – SAFENET, GEMALTO, 2015: 2014 Year of Mega Breaches & Identity Thefts: findings from the 2014 BREACH LEVEL INDEX.

Les défis technologiques à relever

Les technologies existantes, comme les OTP, éléments de sécurité physique sont aujourd'hui techniquement suffisamment robustes. Toutefois, les solutions biométriques, encore émergeantes, montrent encore quelques verrous à lever.

■ La biométrie multimodale : vers plus de fiabilité

Si l'authentification forte a permis de réduire la proportion de transactions frauduleuses dans les transactions bancaires, le nombre d'attaques informatiques ne cesse d'augmenter. La biométrie a récemment montré certaines limites dans la fiabilité avec la reproduction de l'empreinte digitale de la ministre de la défense allemande à partir de photos haute résolution. Il est donc possible de « voler » ces caractéristiques uniques et propres à chaque humain. C'est alors que les techniques de biométrie multimodale prennent tout leur sens. La biométrie multimodale, association de plusieurs données biométriques est actuellement en pleine évolution, à l'image d'entreprises comme BioID (Suisse), ComBiom (Suisse) ou encore McAfee qui combinent plusieurs signatures biométriques pour la protection de données (accès smartphone, accès postes de travail, accès cloud, etc.). En juin 2011, la CNIL a attribué à Natural Security l'autorisation d'utiliser conjointement deux techniques de biométrie (l'empreinte digitale et le réseau veineux du doigt de la main).

À ce titre, l'Institut Mines Telecom et PWC ont signé un contrat de partenariat de 4 ans en 2012 autour de la sécurisation des transactions commerciales sur Internet pour réduire les fraudes à la carte bancaire. Les axes de recherche sont la biométrie révocable, la génération de clés crypto-biométriques et l'authentification biométrique associée à la voix, au système veineux et au visage.

■ Vers la biométrie révocable

Un des défis de taille pour la biométrie est de pouvoir, à terme, diversifier les empreintes issues d'une seule et même empreinte biométrique. La biométrie révocable peut exploiter la biométrie dynamique (analyse des mouvements dans une vidéo etc.), ou encore des procédés cryptographiques visant à rendre dépendante l'empreinte biométrique d'une donnée secrète. La biométrie serait alors de plus en plus révocable. Le Groupe

de recherche en informatique, image, automatique et instrumentation de Caen (GREYC) est connu pour ses travaux poussés sur la conception de systèmes biométriques plus complexes de biométrie révocable.

La conception et la mise en œuvre pratique de systèmes de biométries révocables est critique dans la mesure où, en l'état actuel de l'art, la compromission d'une donnée biométrique entraîne la compromission de l'ensemble des systèmes sur laquelle elle est exploitée.

■ Enjeux de la vie privée : anonymat du stockage des données de références.

La biométrie jouera de plus en plus un rôle important dans l'authentification forte. Toutefois un des freins à l'expansion de cette technologie réside dans le stockage des données (profils) biométriques des personnes, qui relève de la vie privée et provoque une réticence à l'utilisation. Des solutions permettant de stocker anonymement les données biométriques sans réduire la fiabilité de l'authentification s'avèreraient essentielles pour le développement de la biométrie. C'est en ce sens que plusieurs acteurs dont la startup française United Biometrics, créée en 2014, ont développé des plateformes d'authentification biométrique multimodale cryptée à stockage anonyme des données de références. L'accès aux données biométrique se fait en temps réel par double authentification : locale (sur le support) et à distance (sur une base de données).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'émergence d'une concurrence dynamique faite de startups, PME ou de grands groupes témoigne de la tendance au déploiement de solutions biométriques civiles (hors applications douanières), en même temps qu'elle dynamise la concurrence sur ce marché.

Véritable vivier d'excellence technologique, les startups peuvent avoir l'ambition de devenir des partenaires clés de l'innovation technologique des géants donneurs d'ordres des secteurs de la sécurité et de l'internet. À l'image des GAFA (Google, Apple, Facebook, Amazon), les grands acteurs de l'Internet accentuent l'*open innovation* sur le créneau de l'authentification forte et de la biométrie, considérées comme apportant robustesse et fiabilité à leurs applications (mobile ou web).

Les enjeux réglementaires

En matière de réglementation

■ **Mise en œuvre des dispositifs biométriques**

La CNIL a publié en octobre 2012 la délibération n°2012-322 portant sur la modification de l'autorisation de mise en œuvre de dispositifs biométriques reposant sur la reconnaissance du contour de la main initialement pour le contrôle d'accès, la gestion des horaires et la restauration sur les lieux de travail. La gestion des horaires n'est plus autorisée par la CNIL, mais le contrôle d'accès le reste.

Une proposition de loi, soumise au printemps 2014, vise à encadrer plus précisément au niveau législatif les situations pour lesquelles le recours à la biométrie est autorisé.

	Finalité du traitement			
Dispositif utilisé	**Contrôle d'accès salariés/visiteurs sur le lieu de travail**	**Accès aux ordinateurs portables professionnels**	**Contrôle d'accès à la cantine scolaire**	**Autre finalité**
Contour de la main	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-007)	Demande d'autorisation	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-009)	Demande d'autorisation

	Finalité du traitement			
Dispositif utilisé	**Contrôle d'accès salariés/visiteurs sur le lieu de travail**	**Accès aux ordinateurs portables professionnels**	**Contrôle d'accès à la cantine scolaire**	**Autre finalité**
Empreinte digitale	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-008)	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-027	Demande d'autorisation	
Réseau veineux de la main	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-019)	Demande d'autorisation	Demande d'autorisation	Demande d'autorisation

En matière de certification

La confiance dans les produits ou schémas d'authentification est un enjeu critique. La confiance ne peut se décréter, elle doit faire l'objet d'une évaluation indépendante par des laboratoires compétents et conforte la nécessité d'un haut niveau d'exigence en matière de certification pour les applications sensibles.

En France, cette évaluation est réalisée par les centres d'évaluations de la sécurité des technologies de l'information (CESTI) dans le cadre du schéma international des critères communs ou de schémas nationaux tels que la certification de sécurité de premier niveau. Cette évaluation donne lieu à une certification par l'Autorité nationale de sécurité des systèmes d'information (l'ANSSI).

La France croit à la nécessité du maintien d'un haut niveau d'exigence en matière de certification pour les applications sensibles.

Les entreprises françaises doivent pouvoir disposer de solutions vertueuses en matière de protection des données personnelles et de sécurité adaptés aux enjeux.

Analyse AFOM

ATOUTS

Leadership technique dans le domaine de la biométrie, secure element (carte à puce) et transactions monétiques

FAIBLESSES

Tissus d'entreprises français important mais individuellement de taille trop modeste face aux géants américains de l'Internet et de l'électronique

OPPORTUNITÉS

Besoin croissant en protection des données personnelles

Lutte contre la fraude à l'identité (bancaire, droit aux aides sociales)

MENACES

Intégration verticale des technologies par les fournisseurs de *smartphones*

Leadership américain dans le domaine des fournisseurs de solution de sécurité numérique

Facteurs clés de succès et recommandations

D'une manière générale, la réussite des technologies de l'authentification forte de demain réside dans la démocratisation de la biométrie, encore émergente, face aux autres technologies déjà matures et ancrées dans l'écosystème.

À l'image du domaine du paiement, qui est déjà fortement normé et standardisé (standard EMV), il serait judicieux de mettre en place un environnement standardisé pour le développement des futures technologies de la biométrie pour d'autres applications émergentes : authentification d'un fichier source pour la fabrication additive, authentification de produits, etc.

En France, l'exemple de Natural Security Alliance et du GIE Cartes Bancaires est important à citer. Natural Security était une startup créée en 2008 et qui développait des systèmes d'authentification biométrique digitale et veineux. Natural Security a mené une enquête pilote auprès d'utilisateurs et de commerçants. Cependant, la startup a redirigé son activité sous forme d'alliance. Natural Security Alliance travaille aujourd'hui avec le GIE Cartes Bancaires afin d'inscrire la biométrie dans les standards de paiement par carte bancaire.

Acteurs clés :

Entreprises	Atos, CapGemini, CybelAngel, Gemalto, Ingenico, Insidesecure, Morpho, Oberthur, Opentrust, United Biometrics…
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX…
Instituts Carnot	TSN…
Autres centres de recherches	ENSICAEN, Laboratoire GREYC – ENSICAEN, Laboratoire SAMOVAR, Télécom Sud-Paris/Institut Mines Télécom…
Pôles de compétitivité	Images et Réseaux, SCS, Systematic, TES…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	CNIL, GIE carte bancaire, Natural Security Alliance…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

35 Gestion intelligente de l'eau

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Gestion intelligente de l'eau, smart water network, smart water resources, smart metering, big data, interopérabilité, sécurité des données, ville durable.

© Photothèque VEOLIA - Olivier Guerrin

Définition et périmètre

Définition

La gestion intelligente consiste à **collecter** des données au moyen notamment d'équipements *hardware* (capteurs) et à les transmettre, les sélectionner et les **analyser** au moyen d'équipements *software* (SIG[1], outils d'aide à la décision, etc.).

Alors que la consommation d'eau mondiale devrait drastiquement augmenter dans les prochaines années sous l'effet de la croissance démographique et des efforts réalisés sur l'accès à l'eau[2], la gestion intelligente de l'eau constitue de fait un levier d'innovation pour **limiter le gaspillage de ressources hydriques**. Elle cherche à répondre aux nouveaux enjeux sociétaux d'ampleur planétaire qui portent sur :

- Les pressions sur les ressources en eau ;
- Le suivi de la qualité des eaux avec notamment l'apparition de nouvelles substances décelables (micropolluants, métaux, etc.) ;
- La maîtrise des coûts d'investissement et de fonctionnement liés à la gestion des réseaux ;
- La gestion des évènements extrêmes, qui nécessitent une réponse rapide.

Applications

Elles couvrent tout le cycle de l'eau (qualité et disponibilité de la ressource : *smart water resources* / gestion patrimoniale des réseaux : *smart water network* / comptage : *smart water metering*). Pour les réseaux d'eau, la gestion intelligente de l'eau peut couvrir les applications suivantes :

La gestion intelligente de l'eau trouve également sa pertinence en milieu industriel et agricole. Pour l'industrie, elle peut permettre d'assurer une maintenance prédictive des installations d'eau pour anticiper et éviter les arrêts de l'activité (ex : refroidissement des centrales nucléaires, usage de l'eau dans les procédés

industriels de l'industrie agro-alimentaire, etc.). Appliquée à l'agriculture, elle sert à optimiser l'irrigation et prévenir les intempéries (ex : risque de gel).

Technologies

La gestion intelligente de l'eau mobilise des technologies aux 3 grandes étapes de la chaîne de gestion des données :

Volet Hardware	Volet Software	
Collecte/transport des données	⇨ **Traitement des données**	⇨ **Visualisation des données**
Capteurs Drones Radio-identification Communication (WiFi, en champ proche, 5G, etc.) *Cloud*	Intelligence artificielle Technologies de *data mining*	Interfaces homme-machine Système d'information géographique Réalité augmentée Simulation 3D Terminaux mobiles embarqués Informatique portative Applications mobiles

1 – Système d'information géographique.

2 – Selon le dernier *Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau* des Nations Unies (WWDR4 – 2012), la consommation d'eau dans l'agriculture, premier poste de consommation, devrait augmenter de 19 % d'ici 2050.

Au vu de l'état actuel de développement des technologies du *smart water*, les enjeux sur le plan technologique portent aussi bien sur l'**optimisation technologique** que sur le **développement de nouveaux services innovants**. Dans le domaine de l'agriculture par exemple, le déploiement de capteurs sans fil permet d'ajuster les débits d'eau à la teneur en humidité des sols. L'utilisation de drones aquatiques commence également à se développer pour mesurer la quantité et la qualité des ressources disponibles[3].

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le bénéfice de la gestion intelligente de l'eau n'est pas seulement écologique : il est sociétal et aussi économique. Dans un contexte de rationalisation des dépenses, ces technologies de gestion intelligente contribuent à la réalisation d'**économies substantielles** pour les secteurs industriels, les collectivités, les exploitants et les particuliers. En 2012, ce potentiel d'économies était estimé au niveau mondial entre 7,1 et 12,5 milliards de dollars par an par le fournisseur de technologies intelligentes Sensus[4]. Les principaux postes de réduction sont la diminution des fuites et l'optimisation des investissements d'infrastructures.

Par ailleurs, ces technologies participent à la préservation d'une ressource de qualité qui contribue à l'attractivité d'un territoire et à ses capacités de développement. Elles répondent aussi à des enjeux de sécurité publique et de santé en facilitant la gestion des flux : les pluies torrentielles peuvent être déviées dans des bassins d'orage pour éviter la saturation des stations d'épuration, les eaux de ruissellement étant alors directement rejetées dans les cours d'eau, parfois non loin d'un captage d'eau potable.

Pour capter un marché en forte progression, la France dispose d'**atouts solides**. Ses principaux opérateurs de services à l'environnement et de TIC[5] sont bien implantés à l'international. Par ailleurs, ils se sont déjà engagés dans des collaborations avec des PME et des acteurs académiques pour développer des offres intégrées de gestion intelligente de l'eau.

Liens avec d'autres technologies clés

Les six technologies clés suivantes ont une influence forte sur la gestion intelligente de l'eau :

- **Capteurs :** leur perfectionnement peut permettre de renforcer la qualité/précision des données collectées, en permettant par ailleurs de remonter des données de zones difficiles d'accès.
- **Internet des objets :** la gestion intelligente de l'eau repose sur des équipements communicants.
- **Modélisation, simulation et ingénierie numérique :** le traitement prédictif des données peut être affiné par l'amélioration des technologies de visualisation numérique.
- **Intelligence des données massives :** la gestion intelligente de l'eau revient à collecter et traiter des grands volumes de données. Le Big Data s'avère donc clé, notamment pour la mise en place de systèmes de gestion intelligente à l'échelle de grandes agglomérations.
- **Intelligence artificielle :** la collecte et le traitement des données se perfectionne avec l'amélioration des technologies d'intelligence artificielle.

Les deux technologies clés suivantes ont une influence faible sur la gestion intelligente de l'eau :

- **Infrastructures de 5ème génération** : la 5G devrait fluidifier les transferts de données des capteurs aux centrales de traitement, tant sur le plan du volume que de la rapidité des transferts ;
- **Diagnostic rapide (eau, air et sol)** : ces technologies peuvent permettre d'améliorer les données sur la qualité de l'eau, et ainsi perfectionner les dispositifs de gestion intelligente de l'eau.

Les marchés

Le marché mondial de la gestion intelligente de l'eau connaît un **développement rapide**. Selon l'institut d'études de marché américain Researchandmarkets, il était estimé à 6,06 milliards d'euros en 2015, contre 4,32 milliards d'euros en 2012, soit une hausse de 40 % en trois ans[6].

3 – Le Figaro, 20/02/2015 : « La high-tech envahit les champs ».

4 – Sensus, 2012 : *Water 20/20, bringing Smart Water Networks into focus*.

5 – Technologies de l'information et de la communication.

6 – ResearchandMarket, 2015 : *Smart Water Management Market by Solutions (Network Monitoring, Pressure Management, Analytics, Meter Data Management), by Services (Valve and Information Management, Pipeline Assessment), by Smart Meter Types, by Region - Global Forecast to 2020*.

À l'horizon 2020, il devrait continuer de **progresser**, même si les estimations des experts divergent. Le groupe IBM table sur un chiffre d'affaires de 18 milliards d'euros en 2020. La dynamique du marché serait tirée notamment par le **segment du *software*,** dont la croissance annuelle est estimée à 25 % par an[7]. Les estimations de Researchandmarkets et du cabinet américain Lux Research sont plus mesurées mais toujours dans la même dynamique positive. Elles s'élèvent à respectivement 16,47 milliards d'euros et 14,7 milliards d'euros en 2020.

Concernant le *smart water metering*, la zone nord-américaine représentait à elle seule **70 % des compteurs d'eau intelligents** en 2010[8]. L'Europe représentait quant à elle environ 25 % des compteurs, l'Asie près de 5 %. Dans cette dernière zone, la demande se concentre dans certains pays émergents comme l'Inde, la Chine ou les Philippines.

Concernant le *smart water network*, la France, pays dans lequel 50 % des canalisations d'eau sont antérieures à 1972, constitue un **marché porteur**. Près de 20 % de l'eau potable seraient encore gaspillés lors de sa distribution[9], ce qui s'avère en-dessous de l'objectif de rendement de 85 % affiché dans la loi Grenelle II (12 juillet 2010). Tiré par cet objectif réglementaire, le marché l'est également par la prise en compte croissante de critères de développement durable dans l'aménagement du territoire. À titre d'exemple, l'aménagement d'éco-quartiers ou la construction de bâtiments alignés sur les standards de Haute-Qualité Environnementale intègrent souvent l'installation de dispositifs de gestion intelligente de l'eau.

Les défis technologiques à relever

Les défis technologiques à relever concernent principalement la collecte et le traitement de données, la compatibilité entre les différentes technologies et la sécurisation des données.

Améliorer la collecte et le traitement des données

Au niveau de la collecte des données, le développement de **capteurs sans fil, autonome, multi-paramètres**[10] **et à coût maîtrisé** constitue un défi de premier plan. Pour la gestion des réseaux d'eau, un tel capteur pourrait en effet faciliter la couverture de superficies importantes ou de zones isolées, aujourd'hui complexe à mettre en œuvre.

Pour les industries, l'enjeu porte plutôt sur le **traitement de données collectées sur plusieurs sites industriels**, parfois dans différents pays.

Par ailleurs, quel que soit l'usage de l'eau, domestique ou industriel, la **précision des données collectées** reste un champ de recherche prioritaire. Si la mesure des paramètres liés à la quantification de l'eau est globalement maîtrisée, celle des paramètres liés à sa qualification est encore en voie de perfectionnement.

Des solutions qui ne sont pas toujours compatibles

L'**interopérabilité** entre les différentes technologies *hardware* et *software* représente un second défi. En milieu industriel notamment, les systèmes d'informatique décisionnelle (DSS) utilisés pour la gestion intelligente de l'eau ne sont pas toujours compatibles avec les équipements de mesure/contrôle utilisés directement sur le terrain, comme les terminaux distants (RTU) ou les automates programmables industriels (PLC). Ces situations peuvent conduire à des **systèmes « captifs »**[11] : l'absence d'interopérabilité entre les technologies de différentes marques oblige le gestionnaire à utiliser les équipements d'un seul fabricant.

7 – Frost & Sullivan, novembre 2012 : Global Smart Water Market 'Unearthing the REAL Value of Water and the Industry.

8 – IMS, 2011 : *The World Market for Water Meters*.

9 – France Libertés, 60 millions de consommateurs, 2014 : *Eau : le grand gaspillage*.

10 – Le capteur peut remonter des données multiples (quantité, qualité, débit, etc.) et sous différents formats.

11 – Analyse du site *www.smartgrids-cre.fr*.

La sécurisation des données : un enjeu croissant

Enfin, la **sécurisation des données** reste un frein majeur[12]. La gestion intelligente de l'eau implique la collecte et le stockage de données massives qui renforcent la vulnérabilité des réseaux aux failles de sécurité (cyberattaques, fuites de données des usagers, etc.). Pour les réseaux d'eau étendus, en particulier, la multiplication de points de collecte rend plus complexe leur contrôle systématique. Sur le plan technologique, garantir la sécurisation et la confidentialité des données appelle le développement de technologies d'algorithme pour la détection de risques potentiels et de systèmes d'identification plus performants. Tout l'enjeu revient ensuite à diffuser ces dispositifs de contrôle à des coûts abordables pour les collectivités et les industries.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Des collaborations technologiques nécessaires

Le développement d'offres sur le marché de la gestion intelligente passe par la **formation de partenariats industriels solides** dans la mesure où il implique la mobilisation à la fois de capitaux conséquents et de technologies/expertises diversifiées (connaissance du milieu et de ses spécificités, conception de capteurs, gestion de réseaux, TIC[13], SII[14], modélisation, etc.). À titre d'exemple, les deux principaux opérateurs de services à l'environnement français, Veolia et Suez Environnement, ont récemment formé des alliances avec Orange et IBM pour le premier et SFR pour le second. Ces opérateurs peuvent apporter une compétence « métier » en gestion de réseaux d'eau. Pour les start-up et PME souhaitant se positionner sur le marché de la gestion intelligente de l'eau, un enjeu fort consiste donc à s'associer à des partenaires en capacité de porter une offre intégrée[15].

Nouer des liens dans les pays émergents

À l'international, le marché nord-américain apparaît verrouillé par les leaders américains du secteur : General Electric, IBM, Itron, etc. Toutefois, les **pays émergents** pourraient représenter des débouchés prometteurs. Connaissant une urbanisation forte, ces pays sont confrontés à des problématiques importantes de rareté, de fuites et de vols d'eau. Par ailleurs, ils sont généralement en phase de primo-équipement et susceptibles de faire rapidement un saut technologique. Enfin, certains d'entre eux ont déjà engagé des stratégies de villes intelligentes. À titre d'exemple, l'Inde a déjà annoncé la mise en œuvre de 100 projets de *smart city* d'ici 2022[16]. La pénétration de ces marchés passerait notamment par la construction de **partenariats** avec des acteurs locaux, pouvoirs publics comme équipementiers[17].

Adapter l'offre aux besoins

Enfin, la plus-value d'offres innovantes et permettant de se différencier sur un marché concurrentiel reposera sur leur adéquation avec les attentes des usagers. Les technologies proposées doivent donc être définies avant tout à partir d'une approche qui parte du point de vue du « *end-user* » : particuliers, gestionnaires de réseaux, collectivités publiques, industriels, etc.

Les enjeux réglementaires

Des cadres internationaux et nationaux globalement favorables

La gestion de l'eau constitue une préoccupation majeure régulièrement au programme des **grands rendez-vous internationaux**. L'objectif mondial pour le développement n°7, adopté en 2000 par les États-Membres de l'ONU, visait à réduire de moitié d'ici 2015 le taux de la population qui n'a pas accès à l'eau potable et à l'assainissement. Atteint en 2010, cet objectif a été complété par la reconnaissance comme droit de l'homme de l'accès à une source d'eau potable, lors du conseil mondial de l'eau organisé à Istanbul en 2009.

Par ailleurs, des stratégies et réglementations sont mises en œuvre aux **échelles nationales et territoriales** pour mieux gérer les ressources hydriques, avec parfois le soutien de la coopération internationale pour les pays en développement. À titre d'exemple, les collectivités françaises interviennent aux côtés des autorités locales du Sud pour renforcer leurs politiques de gestion de l'eau dans le cadre de la coopération

12 – La Tribune, 14/01/2015 : « La cyber-sécurité, clé de l'avenir des *smart cities* ».

13 – Technologies de l'information et de la communication.

14 – Services en ingénierie informatique.

15 – Au sens d'une offre permettant de couvrir tout le cycle de l'eau.

16 – INDIA TV, 11/06/2015.

17 – McKinsey, 2013 : *Partnering to build smart cities*.

décentralisée. Ces dynamiques internationales comme locales créent des conditions propices au développement des technologies de gestion intelligente de l'eau.

Des technologies en phase avec les exigences de la réglementation française

Le cadre réglementaire français s'avère également **favorable**. D'une part, ces technologies peuvent répondre à l'obligation imposée aux exploitants par la loi Grenelle 2[18] de produire un descriptif détaillé de leurs réseaux de distribution d'eau potable, en permettant par exemple de mesurer le vieillissement des canalisations[19]. D'autre part, la loi Grenelle 2 définit également une obligation pour les collectivités de fixer un plan d'action pour la réduction des pertes d'eau sur leur réseau de distribution, lorsque ces dernières dépassent un seuil de 15 %. La mise en place d'une gestion intelligente constitue une piste de solution pour répondre à ce problème.

Le défi de la protection juridique des données personnelles

Des enjeux réglementaires subsistent toutefois sur le plan de la **protection des données des usagers**. En ce sens, les enjeux de la gestion intelligente de l'eau recoupent plus largement ceux de la gestion du *Big Data*. Les particuliers sont souvent peu enclins à transmettre leurs données personnelles de consommation sans garantie de sécurisation. Or, si un cadre juridique en matière de protection existe bien[20], un flou subsiste sur le stade précis du protocole de collecte/traitement où la réglementation commence à s'appliquer[21]. Prises séparément, les données collectées sur un usager ne permettent pas de l'identifier. Toutefois, l'étape suivante de traitement/croisement entraîne sa ré-identification. En conséquence, le gestionnaire du réseau ne sait pas s'il doit mettre en œuvre les obligations qui lui incombent[22] en amont ou pendant le traitement, alors même que sa responsabilité est engagée au pénal. Si le gestionnaire fait le choix de l'amont, il est tenu d'expliquer à l'usager l'utilisation qui sera faite des données personnelles, mais cette utilisation n'est pas toujours clairement connue à cette étape. Cette situation de flou juridique ne permet de rassurer ni l'usager sur l'utilisation qui sera faite de ses données, ni le gestionnaire sur les risques encourus en les utilisant.

18 – Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010.

19 – Actu-environnement.com, 02/06/2014 : « Les réseaux intelligents, un levier pour la connaissance patrimoniale ? ».

20 – La loi française encadre l'usage de données à caractère personnel ou confidentiel. De ce fait, le traitement d'information survenant dans le cadre de technologies de gestion intelligente doit faire l'objet d'une qualification juridique préalable pour appliquer les garanties légales.

21 – L'Usine Nouvelle, 09/01/2014 : « Big data : le cadre juridique existe ».

22 – Ces obligations impliquent par exemple d'informer l'usager, d'obtenir son consentement, de lui indiquer l'usage qui va être fait des données, etc.

Analyse AFOM

ATOUTS

Une implantation internationale de grands groupes français facilitant la pénétration de nouveaux marchés

La constitution d'alliances pour le développement d'offres intégrées

Des objectifs réglementaires en termes de gestion de l'eau favorables aux technologies de gestion intelligente

FAIBLESSES

Un positionnement très faible des acteurs français sur des marchés nord-américains verrouillés

Des usagers français souvent réticents à communiquer leurs données personnelles

OPPORTUNITÉS

Des besoins forts pour une meilleure maîtrise des consommations d'eau, aussi bien dans les pays en développement que dans les pays développés

Un marché mondial en forte croissance

La prise en compte de critères environnementaux dans les opérations d'aménagement du territoire

MENACES

Une concurrence forte, en particulier des SII américains, allemands ou encore israéliens

Une problématique de sécurisation des données

Facteurs clés de succès et recommandations

Pour les pouvoirs publics :

■ Engager une réflexion sur les verrous réglementaires du *Big Data*. La protection du « patrimoine informationnel » par le biais des contrats opérateurs/usagers apparaît notamment comme une piste de solution jugée pertinente par certains observateurs[23].

Pour les entreprises :

■ Nouer des partenariats avec des entreprises locales dans les pays émergents pour développer des offres adaptées aux capacités d'investissement de ces pays ;

■ Valoriser des références solides (études de cas, projets pilotes, etc.) fondées sur des analyses coûts/avantages chiffrées pour convaincre les investisseurs publics ou privés.

Pour les académiques :

■ Poursuivre les travaux dans le champ de la précision des données ;

■ Consolider les recherches autour du perfectionnement des capteurs (autonomie énergétique, robustesse, granulométrie, coût, etc.).

Acteurs clés

Le secteur de la gestion intelligente de l'eau regroupe en France :

- Des grands groupes :
  - Les principaux opérateurs de services à l'environnement, proposant une offre structurée ou en cours de structuration en partenariat souvent avec des SII : Suez Environnement et SFR, Veolia et Orange, Saur, etc.
  - Les équipementiers : Schneider Electric[24], Saint-Gobain Pont-à-Mousson, etc.
- Des PME proposant généralement des équipements spécialisés (capteurs, logiciels de modélisation, etc.) : Lacroix Sofrel, Hydreca, Perax, Ponsel, Sensus France, Sappel, Grundfos France, Eseco systems, Hydrelis, DSI, Fluidion, EFS, Advitam, etc.
- Des start-up : Smarteo Water, Biomae, etc.

Dans le domaine du *hardware* comme du *software*, la R&D est principalement tirée par les activités de recherche de ces entreprises. La gestion intelligente de l'eau s'inscrit également parmi les axes stratégiques des pôles de compétitivité Advancity, Axelera, DREAM Eaux & milieux, Hydreos et le pôle EAU. L'IRSTEA et l'INRIA travaillent également sur ce sujet, et plus largement sur les réseaux intelligents.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

23 – CVML, juin 2013 : « Big data : les enjeux juridiques d'une (r)évolution technologique ».

24 – Schneider Electric est l'un des membres fondateurs du Smart Water Networks (SWAN). Lancée en mai 2011, cette alliance mondiale regroupe des entreprises de premier plan dans la gestion intelligente de l'eau (TaKadu, Sensus, Derceto, i2O Water, etc.).

36 Technologies de diagnostic rapide (eau, air, sol)

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Diagnostic rapide, métrologie, capteurs communicants, data mining, pollution, échantillonnage sur un tube adsorbant, kits colorimétriques, spectroscopie UV, fluorescence X, bioindicateurs, biomarqueurs

© ETHERA

Définition et périmètre

Définition et applications

Les technologies de diagnostic rapide appliquées à l'environnement permettent de collecter et traiter des données issues de différentes « matrices » (eau, air, sol) dans un laps de temps court, voire en temps réel pour les diagnostics en continu. Outils de surveillance des milieux, elles concernent les applications suivantes :

- Diagnostic de la qualité de ressources naturelles ;
- Évaluation des pollutions ;
- Anticipation des besoins en traitement ;
- Prévention d'un risque naturel (éboulements, inondations, etc.).
- Evaluation des expositions individuelles ou collectives

Elles visent *in fine* à faciliter l'aide à la décision pour les pouvoirs publics (dépollution d'un sol, mise en place d'une politique de qualité de l'air, etc.) et les entreprises (optimisation de procédés industriels, contrôle de la qualité des effluents, etc.), voire les citoyens ou consommateurs. Par rapport à des analyses différées en laboratoire, elles offrent une rapidité d'intervention susceptible de limiter l'impact d'une pollution ou d'un aléa naturel.

Périmètre technologique

Le diagnostic rapide pour l'eau, l'air et le sol repose sur des technologies de métrologie et de traitement des données (capteurs communicants, transmetteurs, technologies de *data mining,* etc.), la plupart du temps déployées sur site. Le choix d'une technologie ou d'une combinaison de technologies varie selon plusieurs paramètres :

- L'usage et la précision attendus du diagnostic (contrôle de la qualité, dépistage de polluants, etc.) ;
- Les types de polluants ciblés en cas de surveillance d'un milieu ;
- Le type d'utilisateur (industriel, collectivité, particulier, etc.) ;
- Le milieu concerné (complexité, fragilité, etc.) ;
- Le délai souhaité de traitement des données (en continu ou ponctuel / instantané ou avec un délai de quelques minutes, etc.) ;
- La mise en œuvre sur un site fixe ou un « porteur » mobile ;
- Le coût.

L'adaptabilité des technologies de diagnostic rapide à ces différents paramètres, en conservant des coûts maîtrisés, représente un vrai enjeu. C'est le cas également de l'adaptation de technologies issues d'autres secteurs, des biotechnologies par exemple, aux besoins de mesurage environnemental.

Technologies de l'air

Développées depuis les années 1990, notamment pour la mise en œuvre de la loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, les technologies de surveillance de la qualité de l'air apparaissent comme les plus matures, même si le diagnostic rapide est plus récent. Elles se décomposent en 2 familles : actives et passives. Pour les premières, la méthode de prélèvement de référence fixée par la Directive européenne 2008/50/CE est l'échantillonnage sur un tube adsorbant, mobilisant des équipements lourds (pompes, débitmètres, etc.). Les méthodes passives, plus récentes et moins sériées sur le plan de la normalisation, mettent en œuvre des équipements plus légers (capteurs de faible capacité, tubes, etc.). De ce fait, elles sont généralement plus adaptées pour la mesure de l'air intérieur. Les progrès récents en termes de traçage des sources de pollution ainsi que ceux en termes de miniaturisation ouvrent des perspectives pour de nouveaux services.

Technologies de l'eau

Le diagnostic rapide de l'eau comprend une gamme de technologies déjà relativement perfectionnées permettant de mesurer la potabilité de ressources, surveiller des filtres, enregistrer la pression dans une canalisation, contrôler des processus de dessalement ou encore surveiller des systèmes d'assainissement. Elles incluent des technologies de mesure ponctuelle (kits colorimétriques, laboratoires de terrain, etc.) et de mesure en continu (analyseurs de toxicité à l'aide de bactéries nitrifiantes, instruments de spectroscopie UV, etc.).

Technologies des sols

Pour les sols, des technologies de diagnostic sur site ont été lancées ces dernières années sur le marché pour des usages précis. La plupart d'entre elles restent encore peu matures. Les diagraphies et sondages MIP

(Membrane Interface Probe) ou les mesures géophysiques permettent un screening complet d'une zone, sans toutefois identifier directement les polluants. Les appareils portatifs à photo-ionisation ou les kits colorimétriques renseignent sur la famille de polluants et l'étendue de la pollution. Les appareils portables de fluorescence X garantissent souvent une identification plus précise des polluants. Le CEA Leti a par ailleurs développé une approche plus exploratoire par capteurs électrochimiques pour caractériser en continu la composition d'un sol. L'Université de Pau et des pays de l'Adour a développé une compétence forte dans le domaine de la mise au point de capteurs électrochimiques pour l'analyse en continu de métaux lourds.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le développement du diagnostic rapide pour l'air, l'eau et les sols constitue une problématique environnementale forte. En détectant et caractérisant les pollutions d'un milieu, il va permettre de donner les clés à la puissance publique, aux entreprises et aux particuliers pour mieux le préserver, voire d'en faire un atout concurrentiel pour un territoire. L'identification des polluants est également un sujet-clé de santé publique.

La France dispose d'un tissu de PME à la pointe dans le domaine de la métrologie[1], même si l'offre française reste peu structurée. Des structures d'excellence offrent par ailleurs de bonnes capacités de recherche fondamentale et appliquée.

Liens avec d'autres technologies clés

Quatre technologies clés ont une influence sur les technologies de diagnostic rapide pour l'environnement :

- **Les capteurs** (influence forte) : étant donné que le diagnostic rapide repose en grande partie sur ce type d'équipements, leur perfectionnement permet d'améliorer la précision de l'analyse ;
- **La métaomique** (influence forte) : les méthodes d'analyse ciblant différentes molécules (ADN, ARN, protéines, etc.) pour étudier des communautés microbiennes dans les milieux peut permettre de mieux connaître et comprendre les pollutions, et améliorer leur traitement ;
- **La microfluidique** (influence forte) : l'étude et la caractérisation des fluides prélevés permettent un diagnostic rapide des pollutions environnementales et de leur toxicité ainsi que des phénomènes mis en jeu ;
- **La robotique autonome** (influence faible) : le diagnostic rapide mobilise des équipements d'analyse autonome. La robotique autonome correspond ainsi à une piste de développement pour cette technologie.

Par ailleurs, le diagnostic rapide a une influence sur le développement des deux technologies suivantes :

- **La gestion intelligente de l'eau** (influence faible) : le diagnostic rapide peut être considéré comme l'un des maillons de la *smart water* ;
- **Le traitement des sols pollués** (influence forte) : un diagnostic rapide et précis d'un sol permet de renforcer la qualité du traitement et la rapidité de sa mise en œuvre.

Les marchés

Au niveau mondial, le marché de l'analyse environnementale a modérément progressé ces dernières années. Il était estimé à 8,1 milliards d'euros en 2008 et à 9,1 milliards d'euros en 2014, soit une croissance de 2 % par an[2]. En 2015, les États-Unis représentaient le premier marché mondial, avec un chiffre d'affaires estimé à près de 2 milliards d'euros[3]. Le marché se caractérise par une multiplicité de PME spécialisées, mais dont les chiffres d'affaires cumulés représentent une proportion mineure de l'activité totale générée. L'essentiel de cette activité est ainsi réalisé par plusieurs grands groupes non spécialisés européens (60 % des fournisseurs en 2011) et américains. Pour l'eau, les leaders sont principalement américains (Emerson Process, Teldyne, Hach Lange, etc.), japonais (Horiba, Yokogawa, etc.) et allemands (Siemens, Sick, Endress+Hauser, etc.).

En 2011, le Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement jugeait que les

1 – Avec notamment des leaders technologiques au niveau européen sur le sous-segment de la qualité de l'air.

2 – Estimations du BCC citées par le *Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (les filières industrielles stratégiques de l'économie verte)*, 2011. Ces données incluent l'observation satellitaire.

3 – EBIonline, 2015 : *Environmental Testing & Analytical Services.*

marchés de l'analyse des sols et de l'air étaient les plus attractifs pour les entreprises françaises : le premier apparaît encore faiblement concurrentiel, et le second présente un fort potentiel de développement.

Sous-segment de l'analyse environnementale, le diagnostic rapide apparaît comme un marché plus récent[4], contrairement au marché mature de la mesure en laboratoire, dont le chiffre d'affaires s'élevait à 146 millions d'euros par an en France en 2013[5]. En conséquence, il reste globalement mal évalué. Néanmoins, le rapide développement de la mesure en continu, qui représentait 80 millions d'euros de chiffre d'affaires en 2013 en France[6], laisse inférer une dynamique de croissance du marché des technologies de diagnostic rapide dans son ensemble.

Elle pourrait être consolidée à l'horizon 2020, son développement apparaît fortement dépendant des avancées réglementaires et normatives. Le renforcement des législations et des objectifs de développement durable (lutte contre les pollutions, préservation des ressources naturelles, protection de la biodiversité, etc.) laisse présager de bonnes perspectives de croissance. Sans toutefois s'ouvrir aux particuliers (kits d'auto-diagnostic) : certains observateurs jugent peu probable le développement d'un marché de masse d'ici 2020, le coût des technologies restant trop élevé et la conscience individuelle des enjeux sanitaires et environnementaux trop faiblement développée.

Les défis technologiques à relever

Des défis transversaux

Trois enjeux ressortent pour les technologies de diagnostic dans leur ensemble à l'horizon 2020.

Le premier concerne la définition d'indicateurs ou de combinaisons d'indicateurs adaptés aux différentes situations à diagnostiquer, dans le cas notamment de multipollutions qui nécessitent un spectre large d'analyse. Le diagnostic environnemental peut reposer sur une gamme variée d'indicateurs : indicateurs chimiques, bioindicateurs[7], biomarqueurs[8].

La question des indicateurs pose plus largement celle de l'adaptation de la technologie de diagnostic rapide à l'usage attendu. Dans ce domaine, les préoccupations actuelles de la métrologie portent sur la définition d'un niveau de granulométrie pertinent, d'un nombre de paramètres adéquat et du rythme de traitement idoine (en continu, périodique, etc.) pour une analyse optimale.

Enfin, les qualités physiques des équipements de diagnostic restent un champ d'amélioration de premier plan. Leur déploiement en milieu difficile (accès compliqué, conditions hostiles) nécessitent notamment de renforcer leur robustesse et leur autonomie énergétique, avec pour objectif de simplifier les besoins en maintenance.

Le développement de capteur à bas coût (investissement et utilisation) est également un facteur de développement de la filière.

Des défis plus spécifiques à l'air

Pour une question de santé publique, la mesure de la qualité de l'air extérieur a nécessité de développer des outils de haute précision et fiabilité, et de ce fait relativement lourds à mettre en œuvre. Avec l'émergence notamment du sujet de la qualité de l'air intérieur, il devient plus pertinent de flexibiliser les instruments de

4 – Le mesurage rapide et *in situ* des sols est tout particulièrement un marché de niche.

5 – Hydreos, Onema, Pôle DREAM, Pôle EAU, 2013 : *Intérêts technico – économiques de l'analyse en continu de la qualité de l'eau et des milieux au regard des pratiques actuelles.*

6 – Ibid.

7 – Organismes sensibles à un polluant donné présentant des effets visibles macroscopiquement ou microscopiquement, afin d'évaluer la qualité d'un milieu (par exemple les lichens).

8 – Changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, qui révèle l'exposition présente ou passée d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant (par exemple, nombre de poissons dans un lac).

mesure pour mieux les adapter aux usages. Cela consiste notamment à viser une précision moins importante en conservant toutefois une qualité suffisante pour l'usage attendu. Ce type de configuration peut s'avérer particulièrement pertinent lorsqu'une décision doit être prise rapidement (diagnostic de la qualité de l'air avant le lancement d'un chantier de rénovation, par exemple).

Des défis plus spécifiques à l'eau

Si la capacité d'analyse et la précision des outils de diagnostic rapide sont limitées par rapport à des analyses en différé, elles s'avèrent souvent suffisantes et assez fiables pour un contrôle ponctuel ou le déclenchement d'une alerte pollution[9]. Les enjeux portent davantage sur le choix de paramètres adéquats pour simplifier le diagnostic[10] et la diminution de l'empreinte environnementale et sanitaire des équipements (réduction des déchets d'analyse, suppression des produits classifiés cancérigènes, etc.)[11].

Des défis plus spécifiques aux sols

Les diagnostics rapides des sols restent encore très imprécis et loin de la qualité d'un diagnostic en laboratoire[12]. La diversité et l'hétérogénéité des données mesurées ne permettent pas aujourd'hui une démarche de traitement automatique et exhaustive, nécessaire pour obtenir la photographie complète d'un site.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

La nécessité de diminuer le coût global des solutions

Les technologies de diagnostic sont encore perçues comme globalement onéreuses, tous coûts considérés (achat, installation, maintenance, recyclage), même si ces coûts ont tendance à diminuer très rapidement. Or les collectivités et les entreprises cherchent de plus en plus à rationaliser leurs dépenses. Pour les fournisseurs de technologies, développer des solutions plus accessibles en optimisant les coûts de production et en adaptant la qualité aux usages attendus représente donc un enjeu de premier plan. C'est par ailleurs une condition d'accès au marché de masse des solutions de diagnostic pour les particuliers, aujourd'hui embryonnaire.

L'accompagnement du client, une demande émergente

Devant la diversité des solutions aujourd'hui sur le marché et une réglementation en évolution constante, les clients sont de plus en plus demandeurs de conseils personnalisés[13]. Sur le plan commercial, cela implique de mettre en place une offre complète et adaptée aux besoins des collectivités/entreprises, incluant notamment une expertise en amont de la vente et un SAV. Dans certains cas, cela va jusqu'à proposer une offre complète de service, le produit final étant la donnée et son exploitation et non pas le seul équipement de mesure.

S'inscrire dans des offres intégrées

Le diagnostic rapide peut être conçu comme une brique importante des technologies intelligentes, ouvrant de nouveaux débouchés pour les fournisseurs de technologies de métrologie. Auprès des collectivités et des entreprises, les technologies de diagnostic rapide peuvent notamment être intégrées au sein d'offres plus globales de gestion intelligente de l'eau. Cela passe par des partenariats synergiques entre les industriels de la ville intelligente et les métrologues.

Les enjeux réglementaires

Des technologies tirées par la réglementation

Quelle que soit la matrice concernée, la réglementation constitue le premier levier pour développer le marché du diagnostic environnemental. Ces standards sont définis au niveau européen. En 1996, la directive[14] concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air a soudainement créé un marché dans ce domaine au niveau européen.

---

9 – Hydreos, Onema, Pôle DREAM, Pôle EAU, 2013 : *Intérêts technico – économiques de l'analyse en continu de la qualité de l'eau et des milieux au regard des pratiques actuelles.*

10 – Les outils de diagnostic rapide pour l'eau affichent généralement une multiplicité de paramètres, avec pour effet de complexifier l'analyse.

11 – L'eau, l'industrie, les nuisances, n°368, janvier 2014 : « Analyse de l'eau – Associer baisse des coûts, délais rapides et qualité de service ».

12 – Vecteur Environnement, GODOY DEL OLMO S., SEMAOUNE P., PLASSART G., novembre 2014 : « Couplage des méthodes géostatistiques et mesures sur site pour améliorer la caractérisation d'un site pollué ».

13 – L'eau, l'industrie, les nuisances, n°368, janvier 2014 : « Analyse de l'eau – Associer baisse des coûts, délais rapides et qualité de service ».

14 – Directive 1996/62/CE.

La directive cadre sur l'eau[15] a également eu un effet levier très fort pour les technologies de diagnostic en imposant l'adoption de « programmes de surveillance », avec l'objectif de réduire les pollutions et mieux contrôler les ressources. Les programmes de surveillance, applicables depuis le 22 décembre 2006, sont eux-mêmes composés de différents programmes : suivis quantitatifs, contrôles de surveillance, contrôles opérationnels... pour chacun des bassins hydrographiques. Leurs résultats sont consultables sur Internet[16].

Pour le diagnostic des sols, les règles sont plus éclatées au sein de différents textes, le principal étant la directive relative aux émissions industrielles[17]. Tout l'enjeu pour les fabricants consiste alors à adapter leurs solutions de diagnostic rapide, généralement moins précises que les analyses en laboratoire, aux standards établis par ce cadre réglementaire exigeant.

15 – Directive 2000/60/CE.

16 – Voir : http://www.surveillance.eaufrance.fr/programmes/

17 – Directive IED 2010/75/UE.

Un cadre normatif européen toutefois peu lisible à l'international

Lorsqu'une entreprise souhaite commercialiser une solution métrologique à l'étranger, elle est tenue d'obtenir une certification[18] et une homologation[19] du pays-cible. Ce processus est généralement long et coûteux. Or, au niveau mondial, le système de normes européen s'avère particulièrement complexe[20], faiblement protecteur et peu lisible. De ce fait, les entreprises rencontrent souvent des difficultés pour faire certifier leurs produits hors de l'Union, malgré l'exigence des normes européennes. Cette situation nuit à leur compétitivité et leurs stratégies commerciales.

Une réglementation pour l'air peu flexible

Elle fixe des normes de précision et de qualité très strictes. Celles-ci ont pour effet d'alourdir les équipements déployés et le prix des solutions pour le client. Elles constituent un facteur bloquant pour le développement d'outils de diagnostic rapide moins précis mais plus adaptés à la prise de décision en temps limité, pour laquelle des mesures dites « indicatives » suffisent. De tels outils moins coûteux permettraient également d'effectuer des diagnostics rapides à grande échelle.

Une réglementation pour l'eau lacunaire

Dans le domaine de la métrologie appliquée à l'eau, l'absence de réglementation et de normes *ad hoc* pour les outils de diagnostic en continu incite peu les industriels européens à les utiliser[21]. C'est un frein pour le développement du diagnostic rapide. Cependant, une norme européenne sur la détermination des performances des capteurs devrait prochainement être publiée.

18 – La certification permet de s'assurer que la solution est en adéquation avec les normes du pays-cible.

19 – L'homologation permet de démontrer que les tests de la solution ont été réalisés dans des conditions conformes à celles du pays cible.

20 – Il repose notamment sur la directive 2009/34/CE relative aux dispositions communes aux instruments de mesurage et aux méthodes de contrôle métrologique.

21 – Hydreos, Onema, Pôle DREAM, Pôle EAU, 2013 : *Intérêts technico – économiques de l'analyse en continu de la qualité de l'eau et des milieux au regard des pratiques actuelles.*

Analyse AFOM

ATOUTS

Une recherche académique de grande qualité dans tous les domaines relatifs au diagnostic rapide (optique, capteurs, etc.)

Des atouts industriels et un vrai savoir-faire

Des directives européennes ambitieuses pour la préservation et/ou la restauration des ressources naturelles, avec des risques de contentieux et d'amendes en cas de non-atteinte des objectifs

Des PME leader au niveau mondial pour l'air

FAIBLESSES

Un cadre normatif européen complexe et peu lisible à l'international

Une réglementation de l'eau peu incitative pour les industriels

Des solutions de diagnostic rapide dans l'ensemble perçues comme très coûteuses

Une offre industrielle française dispersée

OPPORTUNITÉS

La hausse des standards réglementaires au niveau mondial

Une demande toujours forte dans les pays de l'OCDE

L'émergence d'une conscience environnementale au niveau politique dans des pays comme la Chine

Une demande sociétale de plus en plus forte pour un environnement plus sain

MENACES

Une concurrence forte de pays comme les États-Unis, l'Allemagne et le Japon (tout particulièrement pour l'eau)

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

- Soutenir la structuration d'une offre française dans une filière du diagnostic rapide,
- Porter une réflexion sur les règles européennes de normalisation dans une optique de compétitivité ;
- Mettre en place des incitations réglementaires et financières pour favoriser la mesure en continu de la composition de l'eau et de l'air auprès des industriels.

Aux entreprises :

- Moduler davantage la qualité des solutions de métrologie selon les usages attendus et le prix consenti par les clients ;
- Inscrire ces solutions dans des offres intégrées (gestion intelligente de l'eau, domotique, etc.), en relation avec les leaders industriels des secteurs considérés
- Développer le conseil personnalisé pour faciliter le choix des clients ;
- Rechercher une structuration de filière pour mieux répondre aux différents enjeux.

Aux académiques :

- Renforcer la cartographie des risques potentiels et des solutions adaptées ;
- Travailler la granulométrie des solutions selon les usages ;
- Accroître le travail collaboratif avec les entreprises.

Acteurs clés

Pour l'air

La France est très bien positionnée sur le marché mondial de l'analyse de l'air, grâce en particulier à un vivier de PME dynamiques. Les entreprises du secteur incluent :

- Grands groupes : Endentec (Veolia), Cofely Services (Suez Environnement), etc.
- PME : Environnement SA, Ecomesure, Ecologicsense, Enviro-Option, Ethera, Enexco, Metrohm France, etc.
- Start-up : Airboxlab, Aykow, Netatmo, etc.

La France dispose également de structures de recherche de grande qualité. Celles-ci comprennent notamment l'Institut Pasteur de Lille, dont les recherches portent sur les pathologies liées à la qualité de l'air, le LCQSA, groupe d'intérêt scientifique qui regroupe l'INERIS, le LNE et les Mines de Douai et qui appuie le Ministère de l'écologie sur les questions de surveillance de l'air, ou encore l'ANSES, qui a notamment en charge l'encadrement des pratiques des solutions de métrologie sur le marché. Par ailleurs, l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur réalise un travail d'étude et de documentation sur la qualité de l'air au niveau national.

Pour l'eau

Comme pour l'air, le tissu d'entreprises françaises est composé des filiales de grands opérateurs de services à l'environnement et d'une diversité de PME.

- Grands groupes : Schneider, Endentec (Veolia), Edelway (Suez Environnement), etc.
- PME : Enviro-Option, Bamo Mesure, Izitec, Orchidis, PCE Instruments, Metrohm France, Delta OHM, EFS, 2G Métrologie, Aqualabo, etc.
- Start-up : Klearia, Biomae, AquaMS, Ubertone, etc.

Plusieurs équipes universitaires ont pour domaine de recherche la métrologie des ressources en eau. C'est le cas par exemple du Laboratoire des sciences chimiques de Rennes ou des Mines de Douai. Par ailleurs, les pôles de compétivité DREAM, EAU et HYDREOS, structures d'interface spécialisées dans la gestion des ressources hydriques, ont entamé en commun une démarche de structuration et contribuent à des projets dans le domaine de l'analyse.

Pour les sols

Marché de niche, le diagnostic rapide des sols est encore tiré par les activités de recherche d'acteurs privés et publics. Les entreprises positionnées sur le marché sont principalement des PME comme Enviro-Option, Secomam, Metrohm France ou Galys. Un certain nombre de laboratoires travaillent également sur la thématique, comme laboratoire de chimie organique, bio-analytique et environnement de l'université de Pau.

À l'interface

Plusieurs structures de R&D conduisent des activités de métrologie portant sur plusieurs milieux. Ces organismes comprennent notamment le BRGM, l'INERIS, le CEA Leti, le LNE, le N.A.N.C.I.E, l'IRSTEA ou encore les pôles de compétitivité Optitec et Route des Lasers dans le domaine de l'optique et de la photonique.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

37 Traitement des sols pollués

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Dépollution, traitement in situ, traitement sur site, traitement hors site, biodégradation, venting, bioventing, extraction rapide triple phase, désorption thermique, barrières réactives, soilmixing, phytotechnologies (phytodégradation, phytostabilisation, phytoextraction)

© Phytorestore

Définition et périmètre

Définition

Le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie définit par « sol pollué » un sol « *qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement* ». Ces pollutions proviennent généralement d'anciennes pratiques d'élimination des déchets, de fuites et épandages de produits chimiques ou encore de retombées de rejets atmosphériques accumulés depuis parfois plusieurs années.

Technologies

Les technologies de traitement des sols ont pour objectif de supprimer ou diminuer à un niveau tolérable[1] le niveau de risque de ces sols contaminés. Ces technologies peuvent être segmentées en quatre familles et trois modes de mises en œuvre :

Familles	**Physicochimiques** ■ *Venting* : mise en dépression du sol par aspiration puis traitement des gaz extraits ■ Lavage des sols : lavage à l'aide d'eau ou d'un solvant ■ *Stripping* : suppression d'un soluté gazeux par l'action d'un gaz laveur ■ Solidification/stabilisation : piégeage des polluants, notamment par *soil-mixing* (utilisation d'un liant) ■ Oxydation chimique : injection d'un oxydant dans le sol ■ Réduction chimique : injection d'un réducteur dans le sol ■ Extraction double/triple-phase : traitement en simultané des polluants gazeux du sol et liquides des nappes phréatiques ■ Oxydation hydrothermale supercritique : traitement d'effluents liquides en milieux aqueux **Thermiques** ■ Incinération : combustion aérobie pour destruction des polluants ■ Désorption thermique : application de chaleur pour extraction par volatilisation des polluants ■ Vitrification : stabilisation des sols par élévation de la température **Biologiques** ■ Biolixiviation : lavage des sols à l'aide d'un produit biologique ■ *Bioventing* : couplage du *venting* avec l'injection d'organismes qui décomposent biologiquement les contaminants ■ Bioréacteur : mélange de sols pollués avec de l'eau et différents additifs ■ Bioremédiation : utilisation de (micro)organismes pour transformation des polluants. La bioremédiation inclue les phytotechnologies (utilisation d'espèces végétales et les microorganismes associés). **Confinement :** installation d'une barrière étanche sur le site pour empêcher la propagation des polluants
Modes de mise en œuvre	**Traitement *in situ* (sans excavation)** **Traitement sur site (avec excavation)** **Traitement hors site**

1 – En vertu de la note ministérielle du 8 février 2007 relative aux sites et sols pollués, des études d'impact approfondies doivent permettre de fixer des objectifs de dépollution « *en fonction de l'usage ultérieur du site* ».

Le choix d'une technologie pour la dépollution d'un sol dépend d'une diversité de paramètres : environnement des travaux pour la gestion des nuisances (bruit, pollutions, etc.), taille et encombrement du site, nature et concentration des polluants, fragilité du milieu, coût anticipé, etc. La durée du traitement est notamment un critère capital. Lors d'opérations immobilières nécessitant généralement un traitement rapide, le traitement hors site est préféré dans 95 % des cas en France[2]. Pour les sites industriels, aux délais souvent moins contraints[3], le traitement sur site ou *in situ* à l'action plus lente que le traitement hors site est plutôt privilégié.

Les techniques *in situ* représentent à court et moyen termes le principal champ d'innovation dans le secteur de la dépollution des sols. D'une part, les traitements hors-sites sont aujourd'hui globalement bien maîtrisés. D'autre part, l'émergence du concept de « dépollution durable »[4] amène les acteurs du secteur de la dépollution à se tourner vers les techniques dites « vertes » comme la biodégradation, souvent pratiquées *in situ*. Par ailleurs, ces dernières permettent d'éviter les impacts environnementaux liés à l'excavation et au transport des terres générés lors de l'utilisation de techniques hors site.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La dépollution des sols est un marché en croissance aussi bien en France que dans le reste du monde, et s'accompagne d'enjeux forts en termes de **santé publique** et de **protection de l'environnement.** Dans le cadre du programme FEDER 2014-2020, des financements sont ainsi octroyés à des projets comprenant la dépollution des sols.

Par ailleurs, la France s'inscrit parmi les **leaders du marché**, dispose d'un tissu d'entreprises dynamiques (grands groupes avec une forte implantation à l'international et PME) et de structures de recherche publiques et privées d'excellence, formant un écosystème d'innovation performant.

Liens avec d'autres technologies clés

Deux technologies ont une influence sur le développement des technologies de traitement des sols pollués :

- **Technologies de diagnostic rapide (eau, air, sol)** (influence forte) : leur perfectionnement peut permettre d'améliorer l'efficacité des procédés de traitement en renforçant la qualité du diagnostic initial.
- **Métaomique** (influence forte) **:** l'étude des écosystèmes peut permettre de renforcer les connaissances scientifiques relatives au comportement des sols, et faciliter ainsi le choix du traitement le plus approprié pour la dépollution.

Le marché

Le marché international de la dépollution des sols est **attractif**. Évalué à 32,4 milliards d'euros en 2012, il s'élèverait à environ 36 milliards en 2015[5].

Situation en 2015

Dominé par des entreprises américaines (TRS Group, Therma-Flite, etc.), le premier marché mondial reste les **États-Unis**. L'Europe devrait toutefois conserver son **potentiel de croissance** : seulement 15 % des 340 000 sites potentiellement contaminés (localisés pour beaucoup dans les pays de l'est) avaient été traités en 2014[6].

Les pays émergents représentent également des **marchés porteurs**. En Chine, notamment, le marché est estimé à 5,7 milliards d'euros pour 2015 (15 % du marché mondial)[7]. 28 % des sols de la région du Delta contiendraient des pollutions aux métaux lourds[8]. Par ailleurs, l'urbanisation a un impact positif sur la demande pour les technologies de dépollution, dans la mesure où l'assainissement de sites pollués permet

2 – ADEME, 2009 : *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filière de traitement des sols et eaux souterraines pollués en France*.

3 – Par rapport aux opérations immobilières, qui nécessitent de pouvoir utiliser rapidement le site dépollué, les sites industriels entraînent souvent une réhabilitation à plus long terme.

4 – ADEME, 2009 : *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filière de traitement des sols et eaux souterraines pollués en France*. La dépollution durable consiste à prendre en compte des critères de développement durable à toutes les étapes du processus de dépollution.

5 – Estimations réalisées par l'institut d'études de marché américain *The Mcilvaine Company* en 2012.

6 – Commission Européenne, 2014 : *Progress in the management of Contaminated Sites in Europe*.

7 – Données de *China Securities Journal*.

8 – Market Watch, 15/07/2013: *"China's Guangdong comes clean on soil pollution"*.

de libérer de nouveaux terrains pour l'aménagement d'espaces résidentiels ou de commerce.

En France, le marché de la dépollution a **rapidement progressé** depuis le début des années 2000 (+ 6,5 % par an en moyenne entre 2005 et 2012)[9], atteignant 470 millions d'euros en 2010[10]. Le chiffre d'affaires de l'Union des professionnels de la dépollution des sites (UPDS), qui représente 2/3 du marché de la dépollution, a été multiplié par 3 entre 2002 et 2012[11]. L'activité est notamment tirée par le processus de désindustrialisation, qui ouvre de nouveaux chantiers de reconversion (40 % des sites pollués se situent en Île-de-France, dans le Nord-Pas-de-Calais et en Rhône-Alpes). Si les entreprises leader au niveau mondial sont américaines ou australiennes (Xylem, AECOM, Cardno, etc.), certaines entreprises françaises comme GRS Valtech, Sita Remédiation ou Serpol sont bien implantées sur le marché européen.

Perspectives pour 2020

Malgré un infléchissement de la croissance en 2014, dû en particulier à la contraction de la commande publique[12], les **prévisions sont optimistes à moyen terme**. Le chiffre d'affaires du secteur devrait progresser de 4 à 7 % par an entre 2015 et 2020 en France, grâce en particulier à un contexte législatif et réglementaire favorable (Loi ALUR)[13].

Des segments de marché aux marges du secteur des sites et sols pollués pourraient s'avérer particulièrement prometteurs, comme par exemple celui de la **gestion des boues de curage et de dragage**[14]**.** Tous les ans en France, 50 millions de m^3 sont dragués en moyenne dans les ports[15] et 900 000 tonnes par an de boues de curage sont produites[16]. Quand ces

boues sont sans danger pour l'homme, elles sont valorisées sous une forme agricole (fertilisation des sols) ou industrielle (fabrication de briques, construction de panneaux d'isolation, construction routière, etc.), des débouchés qui offrent des perspectives intéressantes de croissance.

Tendances d'usage

Sur le plan technologique, le **traitement biologique hors site**[17] et le ***venting / bioventing in situ*** restaient les deux techniques les plus utilisées en 2012 en France (60 % des terres traitées)[18]. Comme le *venting*, d'autres techniques développées dans les années 2000 sont aujourd'hui couramment utilisées, telle l'extraction rapide triple phase sur site. Encore en perfectionnement, certaines technologies plus récentes sont proposées par un nombre croissant d'industriels, appréciant leurs atouts économiques et environnementaux. C'est le cas notamment de la désorption thermique[19] ou encore des barrières

9 – Xerfi, 2013 : *La réhabilitation des sites et des sols pollués*.

10 – SOeS.

11 – Données UPDS.

12 – Ibid.

13 – La loi ALUR introduit notamment le principe du « tiers payeur » : lorsqu'un exploitant propriétaire cède un terrain à un tiers, celui-ci doit définir l'usage envisagé et présenter un mémoire de réhabilitation qui justifie ses capacités financières et techniques.

14 – Boues issues de l'entretien des réseaux d'assainissement industriels, autonomes et de la vidange des fosses. Elles proviennent de 2 opérations : le dragage (extraction des matériaux) et le curage (nettoyage des sédiments).

15 – Données IFREMER.

16 – Données Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (ASTEE).

17 – Biodégradation des sols assurée par des (micro)organismes hors site.

18 – Données de l'*ADEME*.

19 – Volatilisation des polluants par chauffage. Cette technologie est particulièrement bien adaptée pour les hydrocarbures.

réactives pour le traitement des panaches de nappes phréatiques[20].

Enfin, **certaines technologies émergentes** en France ouvrent des voies prometteuses pour l'avenir du secteur, comme l'utilisation de mousses de surfactants pour le traitement de sols contaminés ou les phytotechnologies (phytodégradation, phytostabilisation, phytoextraction). Performantes pour le traitement des métaux lourds et considérées comme des technologies « vertes »[21], les phytotechnologies restent toutefois utilisées pour l'essentiel dans le traitement des eaux usées, contrairement à d'autres pays comme le Canada ou les États-Unis où elles sont développées à l'échelle industrielle pour le traitement des sols. Selon le bureau d'étude et d'ingénierie spécialisé dans la gestion des sites et sols pollués IDDEA Ingénierie, deux raisons peuvent notamment expliquer cet état de fait[22] :

- La lenteur du traitement, qui incite les opérateurs à privilégier des techniques plus rapides.
- Le besoin de constituer des équipes interdisciplinaires aussi bien pour la recherche que pour les applications.

Les défis technologiques à relever

L'enjeu du diagnostic

Le **perfectionnement des techniques de diagnostic** utilisées avant, pendant et après l'opération de traitement apparaît comme un chantier essentiel.

- Le diagnostic préalable aux travaux demeure parfois imprécis ou partiel. Le renforcement des connaissances scientifiques sur la toxicité des pollutions pourrait notamment permettre de l'améliorer. Cet aspect reste très lié à la qualité des études historiques, souvent difficiles à conduire.
- Un suivi en continu de l'évolution des sols est également utile lors du traitement. En ce sens, des outils d'aide à la décision de plus en plus sophistiqués sont utilisés par les industriels. Ils permettent de mieux anticiper les ressources mobilisées ou faciliter le passage d'une technique de dépollution à une autre, dans le cas notamment de situations de multi pollution.
- En aval, les évaluations de résultats s'avèrent essentielles pour démontrer la performance de techniques peu matures auprès de la maîtrise d'ouvrage. Pour des traitements de long terme, comme lors de l'utilisation de technologies *in situ*, ces évaluations sont toutefois compliquées à mettre en œuvre.

Réduire l'empreinte environnementale de la dépollution

La diminution de l'**impact environnemental des traitements** est également un enjeu de premier plan. Elle passe notamment par la maîtrise des consommations d'énergie, la réutilisation des terres traitées, le choix d'agents chimiques respectueux de la biodiversité, la restauration des fonctions des sols après le traitement et la diminution des transferts de pollution du sol vers l'air. Elle constitue un axe de progression particulièrement fort pour les techniques hors site, qui entraînent le transport de terres contaminées du site pollué au centre de traitement et induisent de ce fait des consommations d'énergie et de ressources supplémentaires.

---

20 – Interception d'un panache de pollution par l'implantation d'une barrière perméable depuis la surface du sol jusqu'à la base de l'aquifère.

21 – Xerfi, 2013 : *La réhabilitation des sites et des sols pollués*. Leur développement devrait être en partie tiré par la commande publique. Les phytotechnologies représentent en effet l'opportunité pour les acheteurs publics de remplir leur fonction d'éco-exemplarité en ayant recours à ces techniques de dépollution « verte »

22 – Actu-Environnement, 17/06/2013 : « Phytoremédiation : le projet phytocyane, enjeux et perspectives ».

Gérer les pollutions difficiles

L'amélioration du traitement à grande échelle des **pollutions dites « difficiles »** constitue enfin un défi majeur pour le secteur. Ces situations difficiles incluent par exemple les cas de pollutions inorganiques (aux métaux par exemple) ou les cas de pollutions multiples d'un sol, qui peuvent nécessiter la combinaison de plusieurs techniques de traitement.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les enjeux de l'internationalisation

Actuellement, la concurrence de plus en plus intense sur le marché français pousse les entreprises françaises à rechercher de **nouveaux débouchés à l'international**. Si la présence d'une offre locale bien développée limite les opportunités de croissance en Amérique du Nord et en Australie, les acteurs historiques du marché français de la dépollution sont déjà bien implantés en Europe et dans les pays émergents[23]. Pour les nouveaux entrants du secteur, l'internationalisation nécessitera le déploiement d'équipes commerciales dans les pays-cibles. Dans les pays émergents, les acteurs français devront composer avec la structuration d'une offre locale de dépollution des sols.

Etendre l'offre de services

Pour capter de nouveaux marchés et traiter des situations de pollution toujours nouvelles, certaines entreprises font également le choix d'étendre leur gamme de prestations. À titre d'exemple, Veolia se positionne depuis 2013 sur le marché de la dépollution post-démantèlement des centrales nucléaires. Si une stratégie de diversification est adoptée par d'autres acteurs, cette stratégie devrait entraîner une reconfiguration de leur offre dans les prochaines années.

Les enjeux réglementaires

Un cadre réglementaire favorable

La politique française dans le domaine des sites et sols pollués s'appuie sur un nombre limité de principes, permettant d'aborder ce problème de manière claire et raisonnée : démarche de prévention des pollutions futures, connaissance des risques potentiels et traitement adapté à l'impact effectif du site sur l'environnement et à l'usage auquel il est destiné. Plusieurs guides méthodologiques ont été élaborés par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, en collaboration avec l'ADEME (circulaires du 8 février 2007).

Le contexte réglementaire en France s'avère ainsi propice au développement du marché. En permettant à un exploitant industriel de transférer la responsabilité de la dépollution à un « tiers intéressé », la loi ALUR[24] a modifié sensiblement le droit des installations classées pour la protection de l'environnement et permis de fluidifier un cadre réglementaire jusque-là flou. Cette mesure devrait stimuler le marché. En effet, l'obligation de remettre un site industriel en état en fin d'activité peut désormais être endossée par un autre débiteur (comme les promoteurs) que l'exploitant, tant que le premier justifie de ses capacités techniques et financières pour assurer les travaux de dépollution.

Avant cette mesure, les promoteurs assumaient la plupart du temps la maîtrise d'ouvrage de ces travaux sans base légale solide. Cette situation incitait peu le lancement de projets sur des sites pollués[25].

Des normes qui se renforcent

Un cadre normatif est également en train d'être construit depuis le début des années 2010. Un référentiel de certification des prestations a été élaboré par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) en 2011. Les nouvelles technologies mises sur le marché peuvent également être « labellisées » au niveau européen par l'*Environmental Technology Verification* (ETV) depuis 2015. Ces démarches sont capitales pour « rassurer » la maîtrise d'ouvrage sur la qualité des travaux réalisés, en particulier lorsque des techniques encore peu matures sont mises en œuvre.

À l'international, le durcissement des normes environnementales dans les pays émergents devrait par ailleurs stimuler la demande sur ces marchés.

23 – ADEME, 2011 : *Le savoir-faire français dans le domaine de la dépollution des sols et des eaux souterraines.*

24 – Loi nº 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové.

25 – FIDAL, 21/03/2014 : « Le marché de la dépollution est relancé par la loi «ALUR» ».

Analyse AFOM

ATOUTS

Des groupes bien implantés sur le marché européen et les marchés émergents.

Un écosystème d'innovation performant.

Une réglementation favorable au développement d'une filière de la dépollution.

FAIBLESSES

Une concurrence exacerbée sur le marché français.

Une absence de leadership industriel sur la phytoremédiation par rapport à d'autres pays de l'OCDE (États-Unis, Allemagne, etc.).

OPPORTUNITÉS

Des débouchés à l'international, en particulier dans certains pays émergents.

Des pressions sur le foncier incitant à la dépollution de sites pour l'aménagement d'espaces de vie.

Des possibilités pour les entreprises d'étendre leur expertise pour répondre à des nouvelles situations de pollution.

MENACES

Une contraction possible de la commande publique.

Une concurrence forte, notamment d'entreprises locales dans les pays émergents.

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

- Soutenir les technologies de dépollution émergentes en France pour stimuler le secteur. À titre d'exemple, la phytoremédiation reste une technologie encore trop peu explorée en France par rapport aux États-Unis, à l'Allemagne ou les Pays-Bas, alors même que l'impact environnemental s'affirme comme une préoccupation croissante de la maîtrise d'ouvrage ;
- Mettre en place des dispositifs incitatifs à destination des acheteurs publics ;

Aux entreprises :

- Déployer/renforcer les équipes dans les pays porteurs ;
- Engager une réflexion stratégique sur les voies de diversification possibles pour les entreprises ;

Aux académiques :

- Mettre en place des plateformes de démonstration pour les technologies émergentes.

Acteurs clés

Représentés notamment par l'UPDS, les entreprises du secteur de la dépollution des sols regroupent :

- Des groupes internationaux, pour certains très bien positionnés sur les marchés mondiaux : filiales d'opérateurs de services à l'environnement européen (Seché Environnement, Colas Environnement, Suez Environnement, Veolia, etc.), groupes du BTP (Bouygues, Vinci, Ramery Environnement, etc.), acteurs spécialisés (Serpol, Valgo, Silex International, Biogénie Europe, etc.), ingénieristes (Artelia, Egis, Burgeap, Socotec, Antéa France, etc.).
- Des bureaux d'études, au niveau ingéniérie : Apave, Antéa Group, Burgeap, Bureau Veritas, etc.
- Des PME : Soléo Services, Sol Environnement, Kidova, Geovariance, Phytorestore, Biobasic Environnement, IDDEA Ingénierie, etc.
- Des start-ups : IVEA, etc.

La France dispose également d'un tissu de recherche d'excellence, avec notamment le BRGM, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), le réseau RECORD, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), les pôles de compétitivité AXELERA et TEAM², le Groupement d'intérêt scientifique sur les friches industrielles (GIFSI) en Lorraine, le Département Génie civil et environnemental des Mines de Douai ou encore l'Institut national de recherche agronomique (INRA).

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

38 Systèmes de rénovation du bâti existant

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, **HABITAT**, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Habitat, rénovation, efficacité énergétique

Définition et périmètre

Les rénovations des bâtiments prennent de plus en plus en compte l'amélioration des performances énergétiques. Les cinq cibles prioritaires de la rénovation énergétique mentionnées dans la démarche OPEN (Observatoire permanent de l'amélioration énergétique des bâtiments) de l'Ademe sont les suivants :

- toiture ;
- agencement (cloison, isolation, plâtrerie, plafond) ;
- ouverture (portes, fenêtres, volets, véranda) ;
- chauffage (chauffage, eau chaude, ventilation, climatisation) ;
- façade (ravalement, crépis, bardage, isolation façade).

Les systèmes de rénovation du bâti existant doivent permettre une rénovation rapide, sans perte importante de volume habitable et doivent être déployables par des PME.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Un tiers des émissions de CO_2 sur le sol français provient du gaspillage énergétique des bâtiments. L'efficacité énergétique des bâtiments est donc un enjeu prioritaire. Or la part du neuf dans le parc immobilier français est faible (les logements construits en 2012 représentent moins de 1 % du parc immobilier en 2012 d'après les données de l'Ademe (Chiffres clés du bâtiment, 2013)). Ainsi, il existe un véritable enjeu pour la rénovation thermique du bâti existant.

La rénovation thermique des bâtiments fait d'ailleurs partie des 34 plans de la Nouvelle France Industrielle et des neuf solutions de l'industrie du Futur, dont la Ville durable.

Les technologies d'isolation ou de production d'énergie en elles-mêmes ont atteint un bon niveau de performances techniques. Il est nécessaire de veiller à leur accessibilité financière comme à la qualité des installations et à leur durabilité. Ce sont donc surtout les technologies permettant une mise en œuvre facile, nécessitant notamment peu de formation et apportant un gain de temps lors de l'installation pour limiter le coût final de rénovation qui sont indispensables pour atteindre les objectifs ambitieux de rénovation sur le territoire.

Liens avec d'autres technologies clés

Cette technologie est significativement liée à la modélisation, simulation et ingénierie numérique (4), en particulier avec l'essor attendu du BIM (Building Information Model) pour faciliter les chantiers de rénovation, mais aussi pour bénéficier d'aide à la décision sur les systèmes à rénover grâce à des simulations pointues. Pour les mêmes raisons, les systèmes de rénovation du bâti existant sont influencés par les technologies immersives (14) qui permettent des visites virtuelles de logements et de bâtiments. Par exemple, Bouygues Construction intègre depuis plusieurs années les technologies immersives dans ses offres commerciales : superposition d'une image en 3D à un plan permettant de se déplacer dans la maquette du bâtiment et d'y apporter des changements en temps réel.

La technologie est également liée aux systèmes constructifs à haute qualité environnementale (39) dans la mesure où des techniques ou technologies peuvent être adaptées à la fois aux bâtiments neufs et aux bâtiments rénovés, notamment sur l'utilisation de produits biosourcés.

Les marchés

Au niveau européen, le marché de la construction (y compris travaux publics) représente 1 211 Md € de chiffre d'affaires en 2014. La réhabilitation et la maintenance des logements représentent 28 % soit 339,1 Md €[1].

En France, le gisement de rénovation représente 30 millions de logements.

En 2013, le marché OPEN (tel que défini ci-dessus) concerne 46 % des 9,7 millions de logements rénovés soit environ 4,5 millions de logements et 16,6 Md €. La majorité des travaux ne concernent pas la totalité du logement, ce qui explique le décalage avec les chiffres présentés plus haut qui considèrent une rénovation globale. Sur ces 4,5 millions de logements, seulement 200 000 logements par an sont rénovés dans leur ensemble[2] afin d'améliorer leurs performances énergétiques et de les placer presqu'au même niveau d'exigence que les logements neufs, tout en respectant leur valeur patrimoniale et architecturale et en veillant à appliquer des solutions qui ne génèrent pas de dégradation du bâti existant.

---

1 – FIEC, 2015 : *Key figures 2014*

2 – Gouvernement français, 2013 : *La nouvelle France industrielle, présentation des feuilles de route des 34 plans*

D'après l'OPEN, le poste « Ouverture » représente, en 2013, 40 % des travaux de rénovation avec un impact sur les performances énergétiques du bâti.

D'après son étude sur les marchés de la rénovation énergétique dans le tertiaire, le cabinet Coda Strategies table sur un parc rénové de 16 % d'ici 2019, soit 160 millions de mètres carrés. Une hypothèse basse, argumentée par les incertitudes économiques et celles du périmètre retenu dans l'éventuel décret sur l'obligation de travaux[3].

En France, le plan de rénovation énergétique du bâtiment lancé par le gouvernement donne pour objectif 500 000 rénovations par an à partir de 2017. Les segments moteurs attendus sont la maison individuelle et les bâtiments de logements collectifs avec un seul propriétaire. Ainsi l'objectif fixé se découpe en la rénovation de 380 000 logements privés par an et 120 000 logements sociaux par an.

Les défis technologiques à relever

Cinq postes majeurs de travail sont ciblés pour l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un bâtiment rénové. Par exemple, des technologies rapides existent pour la rénovation des fenêtres et leur existence fait du changement de fenêtre une opération de routine menée en masse

Le principal enjeu actuel est de passer à la rénovation de toute les parois avec une approche similaire à celle mise en place pour les fenêtres : choix sur catalogue, préfabrication sur mesure, rapidité de pose.

Le panneau d'isolants sous vide (PIV) représente une nouvelle génération d'isolant combinant excellentes performances thermiques et faible encombrement en comparaison des techniques d'isolation traditionnelles. À titre d'exemple, 1 cm de PIV est équivalent à 6 cm de polystyrène expansé ou 9 cm de laine minérale[4]. Plusieurs freins subsistent néanmoins. Notamment, le matériau est délicat à manipuler et à intégrer au bâti car il est fragile, ne peut être découpé et doit être intégré sur des surfaces planes. De plus, ce matériau est actuellement cher. Ces verrous font l'objet de recherche, à l'image du projet VIPeR démarré en 2013 et financé par l'ADEME dans le cadre du programme énergies décarbonées des investissements d'avenir.

Le développement des technologies 3D, ou du calepinage numérique, doit aussi permettre d'augmenter la productivité des chantiers de rénovation. Il s'agit de reconstruire rapidement en 3D (avec le support généralement du BIM – Building Information Model) l'environnement à rénover. Le passage au numérique permet d'accélérer la production à façon des pièces de rénovation. Des mesures précises et une production de pièces tout aussi précise assurent aussi la performance énergétique des rénovations, par exemple en diminuant les ponts thermiques et en améliorant l'étanchéité à l'air. De telles solutions existent pour les cuisinistes ou pour les installateurs de fenêtre et devraient se développer dans les autres applications de la rénovation.

Les technologies de mesure dimensionnelle existent sur le marché (technique de numérisation 3D). L'effort porte surtout sur les moyens de reconstruction automatique (modélisation) sous CAO, à partir des mesures terrain, et sur la communication avec les systèmes de production de pièces de rénovation, sous forme de plateforme collaborative gérée par le BIM.

Le développement de la domotique permet d'intégrer facilement des solutions performantes dans la rénovation, notamment avec les équipements de chauffage connectés qui seront pilotables à distance par tablette ou smartphone. Le principal obstacle concerne alors les protocoles de communication entre les équipements de l'habitat et les compteurs d'énergie. La création d'un métalangage pour un nouvel équipement positionné entre le compteur d'énergie et les équipements de l'habitat peut aider à résoudre ces problèmes d'interfaçage.

© Fotolia

3 – Source : Le Moniteur ;17 avril 2015.

4 – http://isolation.comprendrechoisir.com/comprendre/piv

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'enjeu commercial est fort pour développer l'intérêt des ménages pour les travaux de rénovation pour l'amélioration des performances énergétiques. Les technologies doivent susciter l'envie en mettant en avant un ensemble de fonctions : décoration, isolation thermique, confort thermique et acoustique, étanchéité à l'air… La rapidité de réalisation et la garantie du résultat doivent donner confiance à l'acheteur.

Une offre packagée proposée par des regroupements d'artisans faciliterait également la décision d'achat en garantissant l'accompagnement sur une vision globale de la rénovation avec un seul interlocuteur.

L'article 4bis de la loi sur la transition énergétique a imposé la mise en place du carnet de santé numérique de suivi et d'entretien. Obligatoire (article L 111-10-5 du Code de la construction) dès 2017 pour toutes les constructions neuves, il sera obligatoire pour tous les biens immobiliers vendus en 2025. Il intégrera :

- Le diagnostic de performance énergétique (DGE),
- L'état des installations intérieures de gaz et d'électricité,
- Le constat de risque d'exposition au plomb,
- L'état mentionnant la présence ou l'absence de matériaux ou produits contenant de l'amiante,
- L'état relatif à la présence de termites,
- L'état des risques naturels technologiques, etc.

Il permettrait également d'enregistrer les travaux effectués au cours de la vie du bâtiment. Les technologies de BIM (Building Information Model) sont en développement pour ces applications, mais cela nécessite aussi une organisation adéquate de la filière, sur laquelle le Plan Bâtiment Durable et le Conseil National de l'Industrie travaillent aussi.

Faisant suite au plan de construction, Sylvia Pinel a lancé courant 2015 trois programmes :

- le programme d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique (PACTE) doté de 30 millions d'euros ;
- le plan Transition numérique du bâtiment doté de 20 millions d'euros;
- le plan de recherche et de développement pour le traitement de l'amiante dans le bâtiment doté de 20 millions d'euros.

Le PTNB (programme interministériel) programmé pour trois ans a pour objectif de disposer d'**un effet levier pour atteindre les objectifs de numérisation de la filière bâtiment et de massification de la construction,** ceci se faisant autour de trois grands axes :

- Expérimenter, capitaliser, convaincre pour donner envie à tous les acteurs ;
- Accompagner la montée en compétences des professionnels et impulser le développement d'outils adaptés aux petits projets ;
- Développer un écosystème numérique de confiance.

Parmi les actions à réaliser dans le cadre du PTNB, certaines ont été repérées comme prioritaires :

- **Le BIM pour tous : Développement d'outils numériques de bureaux et de chantier à destination des petites et moyennes structures.** Cette action vise à mettre au point des kits BIM (offre matérielle, logicielle et services) calés sur les besoins des TPE/PME et notamment des artisans du bâtiment, afin d'éviter la césure de la filière entre ceux qui peuvent suivre la dynamique de la numérisation et les autres.
- **Le carnet numérique de suivi et d'entretien du logement.** À rappeler que la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte prévoit la création d'un carnet de suivi et d'entretien du logement obligatoire pour toute construction neuve à compter du 1er janvier 2017.
- **La normalisation des processus et des échanges.** L'enjeu de cette action est de préserver et de renforcer la spécificité de la filière bâtiment française constituée en grande partie de petites et moyennes entreprises et ceci face aux grandes structures étrangères.

La numérisation de l'existant pour la rénovation et l'exploitation des ouvrages. Il existe des outils facilitant la numérisation du bâti existant (laserométrie, Scan 3d, photogrammetrie, thermographie, infrarouge, etc.). Ces briques devraient permettre à terme pour des bâtiments conçus sans maquette numérique d'en disposer permettant par la même occasion une gestion optimisée du bâtiment.

Les enjeux réglementaires

La rénovation de l'habitat a déjà été identifiée par les pouvoirs publics comme un enjeu fort dans le cadre de la transition énergétique. Un plan d'investissement pour le logement a été présenté par le Président de la République le 21 mars 2013. Il décline notamment le plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH), plan d'actions de l'État mis en place pour atteindre l'objectif de rénover 500 000 logements par an à l'horizon 2017.

La loi de transition énergétique pour la croissance verte a été promulguée le 17 août 2015. Les dispositions impactant dès à présent le secteur de la construction sont les suivantes[5] :

■ Construction des bâtiments à caractéristiques énergétiques et environnementales renforcées : le plan local d'urbanisme peut imposer aux constructions de couvrir une part de leur consommation d'énergie par la production d'énergie renouvelable (Article 8-I).

■ État exemplaire – Économies d'énergie : Mise en place d'actions de sensibilisation à la maîtrise de la consommation d'énergie auprès des utilisateurs des nouvelles constructions de l'État, de ses établissements publics et des collectivités territoriales (Article 8-II).

■ Expérimentations et innovations en matière d'économies d'énergies : les collectivités et établissements publics établissant un Plan climat énergie territorial peuvent conclure un partenariat avec les établissements publics à caractère scientifique, culturel et professionnel (universités, grandes écoles,…) à cette fin (Article 8-III).

■ Conditions de performance énergétique minimale s'appliquant aux logements sociaux vendus à des personnes physiques : extension aux logements individuels des dispositions actuellement en vigueur pour les logements collectifs, bénéficiant le plus souvent à des accédants issus du parc social (Article 13).

■ Maintien des aides aux travaux d'amélioration de la performance énergétique quand il y a obligation de travaux : pour faciliter la réalisation des travaux (Article 14-II).

■ Copropriétés – vote à la majorité simple des travaux de rénovation énergétique : dans les bâtiments en copropriété, simplification des opérations d'amélioration de l'efficacité énergétique à l'occasion de travaux affectant les parties communes (Article 14-IV).

■ Simplification de l'application de la règlementation thermique aux nouvelles constructions : les organismes certificateurs spécialisés dans la performance énergétique des bâtiments peuvent délivrer l'attestation de prise en compte de la réglementation thermique à la fin d'un chantier de construction, lorsqu'ils signent une convention à cet effet avec l'Etat, ce qui simplifie les démarches pour la construction de bâtiments certifiés (Article 15).

■ Mise en place des plateformes territoriales de la rénovation énergétique : définition de leurs missions et renforcement de l'accompagnement technique et financier proposé aux particuliers lors de leurs travaux de rénovation énergétique. Cela inclut ainsi le réseau existant des 450 Points Rénovation Info Service qui couvrent l'ensemble du territoire (Article 22).

■ Information des consommateurs sur leurs frais réels de chauffage et facturation selon leur consommation réelle : généralisation de l'obligation d'individualisation des frais de chauffage dans les immeubles pourvus d'une installation collective de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire (Article 26).

■ Soutien aux véhicules à faibles émissions : Les collectivités peuvent prévoir dans les plans locaux d'urbanisme que le nombre de places de stationnement exigé ordinairement soit réduit d'au moins 15 % en contrepartie de la mise à disposition de véhicules électriques en autopartage. Il s'agit d'encourager les promoteurs immobiliers à s'associer avec des opérateurs de location de véhicules propres en libre-service (Article 42).

Les textes portant l'éco-conditionnalité des aides publiques de l'État que sont le CITE (Crédit d'impôt pour la transition énergétique) et l'Eco-PTZ (éco-prêt à taux zéro) ont été publiés au Journal officiel en date du 18 juillet 2014. Ils précisent les critères de qualification (notamment la qualification RGE «Reconnu garant de l'environnement») à remplir par les professionnels. Compte tenu des besoins du marché et de la nécessité d'accompagner l'émergence d'une économie verte autour du bâtiment, des mesures visant à fluidifier l'accès des entreprises au label RGE sans pour autant dégrader le niveau d'exigences sont en cours d'examen.

Enfin, au niveau international, la présence de représentants de la France au sein des comités décisionnaires du cadre normatif des technologies liées au BIM (Building Information Modeling) doit être maintenue afin de garantir la possibilité d'exportation des systèmes développés en France.

5 – Source : MEDDE (ministère en charge de l'écologie).

Analyse AFOM

ATOUTS

Grande pratique de l'isolation thermique par l'intérieur ou par l'extérieur

Fort réseau d'artisans capables d'intervenir localement

FAIBLESSES

Nécessité de porter une offre qui dépasse le métier actuel d'un artisan

OPPORTUNITÉS

Existence d'incitations fiscales

MENACES

Baisse du prix de l'énergie, qui diminue le retour sur investissement des travaux de rénovation énergétique

Solvabilité des ménages incertaine

Crainte d'une instabilité fiscale par une partie de la profession

Facteurs clés de succès et recommandations

Aujourd'hui, de nombreuses études ont été réalisées afin de déterminer les principaux postes à rénover, les objectifs de performance à atteindre ou encore de comparer l'impact d'une rénovation en une seule fois par rapport à une rénovation en plusieurs étapes. Le sujet est bien pris en main et doit maintenant se doter d'outils technologiques, organisationnels et réglementaires performants favorisant le déploiement de la rénovation à grande échelle.

Le développement des technologies rapides de rénovation pourra être favorisé par le financement d'appels à projets (ADEME, PREBAT…).

L'optimisation des modes organisationnels des maîtres d'œuvre permettra un accès facilité des ménages à la rénovation énergétique[6]. Les organisations à privilégier seront des regroupements tels que les groupements momentanés, les groupements permanents ou les actions groupées non contractuelles. De plus, des offres adaptées aux différents bâtiments (logement individuel, copropriété, lotissement, petit tertiaire…) devront être conçues et mises en avant par les acteurs de la construction.

Les pouvoirs publics pourront accélérer la généralisation des regroupements d'artisans en en faisant la promotion, en adaptant les régimes juridiques notamment en termes de responsabilité au sein des groupements momentanés d'entreprises et en développant des méthodologies pour choisir la forme de regroupement adaptée en fonction des situations.

Afin de promouvoir la rénovation énergétique de qualité, il est nécessaire de rendre davantage visible le label RGE et de développer des documents harmonisés pour l'ensemble des acteurs dans le but de construire un mouvement cohérent.

La formation des professionnels est également essentielle pour garantir une rénovation favori-

6 – Basili S., Nappi-Choulet I., 2014 : *Rénovation Énergétique et Filière Bâtiment* (dans le cadre du débat national sur la transition énergétique)

sant réellement la performance énergétique. En ce sens, l'axe 2 du programme PACTE (moderniser les règles de l'art de la conception) et différentes actions PTNB (plan transition numérique dans le bâtiment qui a notamment pour mission d'adapter les formations initiales et continues) vont renforcer les outils pédagogiques et les formations à destination des professionnels. Le rapport « Rénovation Énergétique et Filière Bâtiment » insiste sur le développement d'outils numériques (de type e-learning) basés sur une participation collaborative permettant une diffusion au plus grand nombre et une appropriation plus efficace des différents enseignements.

Enfin, les efforts en matière d'incitation fiscale sont à poursuivre dans le but d'aider les ménages (payeurs finaux) à financer leur projet de rénovation.

Acteurs clés

Fabricants de produits de construction : Saint-Gobain, Lafarge, Vicat

Acteurs de la distribution de matériaux : Point P

Constructeurs de maisons individuelles se positionnant sur la rénovation : Maison France Confort, Siniat

Industriels de la pose des fenêtres : Tryba

Industriels du calepinage numérique : Procal, FS2I

Groupements de maîtres d'œuvre : Bâtir Eco, Domocreuse

Entreprises de services en lien avec les performances énergétiques : Delta Dore

Centres techniques industriels : CERIB (Centre d'étude et de recherche de l'industrie du béton), FCBA (Institut technologique forêt cellulose bois-construction Ameublement), CTICM (Centre technique industriel de la construction métallique), CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), Tipee (plateforme technologique dédiée à la réhabilitation des bâtiments)

ITE : INEF4

Pôle de compétitivité : Fibres Energievie

Association : Thermorenov

Autre : ANAH (Agence nationale de l'habitat)

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

39 Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, **HABITAT**, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Habitat, HQE, système constructif, BEPOS, Analyse de cycle de vie, impact environnemental, énergie grise, éco-conception

Définition et périmètre

La Haute Qualité Environnementale (HQE) des bâtiments est une démarche de management de projet visant la réalisation de bâtiments en maîtrisant son impact sur l'environnement extérieur tout en assurant un environnement intérieur confortable et sain. La démarche HQE comprend trois volets indissociables[1] :

- Un système de management environnemental de l'opération (SME) où le maître d'ouvrage fixe ses objectifs pour l'opération et précise le rôle des différents acteurs.
- 14 cibles qui permettent de structurer la réponse technique, architecturale et économique aux objectifs du maître d'ouvrage.
- Des indicateurs de performance.

Ces trois volets constituent le référentiel générique de la démarche HQE formalisé dans trois documents normatifs : les normes NF P01-020-1 et XP P01-020-3 et le guide d'application (GA) P 01 030.

Pour les systèmes constructifs, cela se traduit notamment par le recours à des matériaux reconnus comme étant à faible impact environnemental selon une analyse de cycle de vie, des associations innovantes de matériaux associant les qualités de chacune (par exemple bois/béton), des modes de construction plus industrialisés (préfabrication par exemple), des solutions requérant moins de matière, des matériaux plus facilement réutilisables, des matériaux émettant moins de polluants dans l'air intérieur… Le point clé est l'éco-conception globale du système constructif et du bâtiment dans son ensemble.

Les systèmes constructifs bois sont aujourd'hui qualifiés et donc moins détaillés dans la présente fiche technologies clés. Le plan d'actions techniques de la DHUP[2] a permis de démontrer la capacité des solutions bois à répondre aux exigences techniques et réglementaires du secteur du bâtiment.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les référentiels et certifications des bâtiments neufs sont en train d'évoluer vers la prise en compte des impacts environnementaux reposant sur une analyse multicritère (consommation d'énergie, émission de gaz à effet de serre, production de déchets, consommation d'eau, etc.) sur le cycle de vie du bâtiment, à l'instar des travaux démarrés au printemps 2015 par la DHUP avec les professionnels du secteur du bâtiment pour la création d'un référentiel d'évaluation de la performance environnementale du bâtiment neuf sur son cycle de vie.

Des réflexions sont menées par le groupe de travail RBR (Réflexion bâtiment responsable, groupe de travail du Plan bâtiment durable, lui-même chargé par les ministères du logement et de l'énergie de mettre en œuvre et de piloter le nouveau plan de performance énergétique des bâtiments). Dans son rapport publié en 2014[3], il met l'accent sur trois éléments :

- Ne pas se limiter à la seule efficacité énergétique mais aller vers « un bâtiment sobre en énergie, mais aussi bien connecté à son territoire, soucieux de son empreinte carbone et de sa faible utilisation de ressources primaires dans tout son cycle de vie, anticipant ses mutations possibles comme sa déconstruction, se préoccupant de la santé et du confort de ses usagers, et économique en exploitation ».
- Créer un tronc commun entre les différents labels qui seront autant d'incitations fortes dans une logique d'incitation, d'amélioration progressive et de modulations régionales.
- Définir rapidement les tests et indicateurs de performance du bâtiment responsable.

Un certain nombre de défis sont résolus ou en passe de l'être dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments au cours de leur exploitation/utilisation. En effet, au cours de cette dernière décennie, l'émergence des bâtiments basse consommation a permis de réduire de près de 60 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'utilisation des bâtiments neufs[4] en raison de la diminution des consommations énergétiques liées à cette utilisation.

En revanche, il est constaté dans le cadre d'une analyse de cycle de vie[5] que la seule construction d'un bâtiment

1 – Source : Association HQE.

2 – Direction de l'Habitat, de l'Uranisme et des Paysages – Ministère de l'écologie du développement durable et de l'écologie (MEDDE).

3 – *Cap sur le futur « Bâtiment responsable »*, Rapport de recommandation #3 du groupe RBR 2020-2050, Septembre 2014

4 – Source : Sinteo < http://www.cleantechrepublic.com/2011/12/23/batiment-bas-carbone %C2 %A0-un-nouvel-enjeu-pour-les-maitres-d %E2 %80 %99ouvrages/ >

5 – "Les fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES) permettent par une étude détaillée (selon la norme NF P01-010) de réaliser un bilan environnemental des matériaux de construction pouvant être utilisés dans un projet. ». Source : < http://fdes.fr >

BBC consomme autant d'énergie que son utilisation pendant 30 ans. De plus, 60 à 80 % des émissions de gaz à effet de serre de la phase de construction sont attribuables aux matériaux de construction (voir Figure 1).

Par conséquent, le marché va devenir à court terme demandeur de systèmes constructifs à faible impact environnemental, notamment à la production et à l'installation, et à coûts maîtrisés.

Figure 1 : Consommations énergétiques moyennes sur 30 ans. Source : Sinteo, 2011, repris par Erdyn

Liens avec d'autres technologies clés

Cette technologie est liée de manière significative aux systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment (40) car l'intégration d'énergies renouvelables au bâtiment est un point clé pour concevoir des bâtiments à haute qualité environnementale. De plus, le choix des systèmes constructifs influence la sélection des systèmes énergétiques. Cette technologie est également liée aux procédés relatifs à la chimie verte (8) qui peuvent permettre d'utiliser des matériaux à faible empreinte environnementale sur tout le cycle de vie. Elle est également liée aux systèmes de rénovation du bâti existant (38) dans la mesure où des techniques ou technologies peuvent être adaptées à la fois aux bâtiments neufs et aux bâtiments rénovés.

Les marchés

Les marchés de la construction sont principalement des marchés nationaux. De plus, différents labels ont été développés dans plusieurs pays et ceux-ci ne recouvrent pas exactement les mêmes définitions. Ainsi, il n'existe pas de données consolidées sur les logements à haute qualité environnementale en Europe ou dans le monde. À titre d'exemple, la figure 2 compare différents pays européens.

Figure 2 : Surfaces de logements à haute qualité environnementale (en millions de m²)[6]

D'après les données de l'observatoire BBC, en France, 138 251 logements et 1 057 621 m² de tertiaire ont été

6 – Sustainable Building Alliance (traitement Erdyn)

certifiés Bepos Effinergie, Effinergie+ ou BBC Effinergie en 2014. Cela représente encore une part conséquente des logements neufs : 37 % des 374 500 logements autorisés à la construction en 2014[7].

Le marché concerne l'ensemble des bâtiments neufs mais il est probable qu'il se développera dans un premier temps dans les secteurs demandeurs de certification environnementale (le tertiaire et les logements collectifs) comme cela est déjà le cas aujourd'hui. En effet, en 2014, 116 892 logements collectifs ont été certifiés Bepos, Effinergie+ ou BBC Effinergie soit 85 % des logements certifiés.

D'après une étude de l'Ademe[8], l'utilisation de produits biosourcés dans les bétons en France devrait augmenter de 64 % entre 2012 et 2020 et passer ainsi de 140 kt de biomasse employée pour les bétons en 2012 à 230 kt en 2020.

L'utilisation du bois dans la construction se développe. Ainsi, selon une étude d'Alcimed pour le PIPAME[9], les maisons à ossature bois (actuellement plus de 75 % des constructions bois) représenteraient 17 000 à 36 000 unités par an en 2020. L'objectif de 20 % de part de marché des maisons individuelles d'ici 2020 paraît donc atteignable contre environ 12 % actuellement.

Les défis technologiques à relever

Les défis technologiques à résoudre pour les systèmes constructifs à haute qualité environnementale concernent principalement la production des matériaux de construction en eux-mêmes ou le développement de nouveaux matériaux. L'enjeu principal est la réduction de l'impact environnemental lié à leur production, leur transport et leur mise en œuvre. Les défis technologiques concernent principalement les matériaux biosourcés.

Les matériaux de construction biosourcés tels que les bétons végétaux (dans lesquels des fibres de bois, chanvre et lin principalement sont utilisées comme granulat) ont fait l'objet de recherches approfondies ces dernières années mais deux défis principaux subsistent. Tout d'abord, la compréhension du phénomène de prise du béton au sens chimique est à affiner et modéliser afin de pouvoir garantir un comportement optimal du matériau. En effet, cette phase est ajustée de manière empirique aujourd'hui ce qui engendre parfois des bétons avec une faible résistance mécanique[10], limitant son utilisation à celle d'un matériau de remplissage, par exemple dans une ossature bois. Certains acteurs de la filière espèrent, avec des formulations spécifiques, obtenir à l'avenir un béton de chanvre porteur[11].

Par ailleurs, le fonctionnement de l'isolation thermique d'un béton végétal n'est pas identique à celui d'un béton classique car le béton végétal est poreux. Or ces phénomènes dynamiques (échanges d'eau, d'air, de chaleur avec l'extérieur) rendent la modélisation complexe. A contrario, les calculateurs actuels d'efficacité énergétique ne prennent en compte que la résistance thermique du mur, qui est relativement faible pour un béton végétal et qui ne reflète pas son efficacité d'isolation thermique. Ainsi il convient de continuer à progresser sur la modélisation des phénomènes dynamiques afin de pouvoir les prendre en compte dans le calcul de l'efficacité énergétique (des travaux sont déjà en cours pour prendre en compte le comportement hygrothermique des matériaux biosourcés dans le calcul de la performance thermique).

De plus, les matériaux de construction biosourcés sont aujourd'hui peu compétitifs au niveau du coût. L'étude réalisée pour le compte du MEDDE en 2012 relevait les écarts suivants[12] :

- Sur l'isolation par l'intérieur, le coût de la laine de roche va de 7 à 10 € TTC /m², celui de la laine de verre

7 – D'après les données statistiques du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/logement-construction/r/construction-logements.html?tx_ttnews %5Btt_news %5D=20087&cHash=fcd2dab2d9320fa914ffb1b4626794e1

8 – Ademe, 2015 : *Marchés actuels des produits biosourcés et évolutions à horizon 2020 et 2030*

9 – Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques, 2012 : *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020*

10 – Avec une masse volumique comprise entre 250 et 950 kg/m³, les bétons de chanvre sont beaucoup plus légers que le traditionnel béton de ciment C25/30 qui atteint les 2200 kg/m³. Ses performances mécaniques s'en ressentent. Source : Batirama.com

11 – Source : Batirama.com

12 – Étude réalisée par Nomadéis pour le compte du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de
l'Énergie, DGALN / PUCA, *Étude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits bio-sourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois)*, août 2012.

de 7 à 16 € TTC /m² quand celui de la ouate de cellulose va de 7 à 20 € TTC / m² et celui des panneaux de laine végétale de 20 à 40 € TTC /m².

■ Sur l'isolation par l'extérieur, les panneaux de polystyrène expansé coûtent de 14 à 29 € TTC /m², ceux de polystyrène extrudé de 25 à 35 € TTC /m² quand les panneaux rigides bois coûtent de 50 à 90 € TTC /m².

■ Pour les sols et soubassements, il est estimé que les bétons de chanvre ont un coût 10 à 15 % plus élevé que celui des matériaux conventionnels concurrents.

Notons toutefois qu'il existe déjà des cas de bâtiments utilisant fortement ce type de matériaux et avec un coût total du bâti équivalent à ce qu'il aurait été dans le cas d'utilisation de matériaux conventionnels grâce à des démarches d'ingénierie et d'optimisation performantes.

Parmi les matériaux traditionnels à faible impact environnemental, les travaux portent principalement sur le béton bas carbone. Il s'agit, lors de la production du ciment, de remplacer partiellement le clinker (dont la production est fortement consommatrice d'énergie) par des matériaux moins consommateurs d'énergie comme le laitier de haut fourneau, sous-produit de l'industrie métallurgique ou les cendres volantes issues de centrales thermiques. Pour le déploiement de ce type de produits, les enjeux se situent davantage au niveau de la structuration de la filière qu'au niveau technologique.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le déploiement commercial des systèmes constructifs à haute qualité environnementale représente le plus grand enjeu de développement de ces systèmes. Trois axes d'amélioration majeurs émergent aujourd'hui : la structuration et l'industrialisation des nouvelles filières, la réduction des coûts de production et la communication autour de ces systèmes et de leurs avantages à toute la chaîne de valeur.

Pour le développement des matériaux de construction biosourcés, la structuration des filières est clé. Aujourd'hui cette structuration est en cours. Plus que la garantie de volumes disponibles tout au long de l'année (qui est maintenant assurée pour le bois, les fibres de lin et de chanvre par exemple), l'objectif est désormais de fournir une qualité constante au cours du temps et sur tout le territoire. En effet, les productions agricoles sont sujettes à des variations d'une région et d'une année à l'autre. Or pour une utilisation industrielle, la variabilité des produits doit être réduite. Pour le bois, cela nécessite aussi une concertation sur les essences demandées à long terme sur le marché. Ainsi, les filières poursuivent leur structuration dans ce sens et mettent notamment à contribution les semenciers, les producteurs et les négociants pour développer des variétés plus fiables, uniformiser les pratiques de culture et organiser un stockage pluriannuel.

La réduction des coûts de revient des matériaux de construction biosourcés est un enjeu bien connu dont la réalisation passera aussi par la structuration de la filière et son industrialisation.

Pour les matériaux traditionnels à faible impact environnemental, la structuration de la filière (qualité, logistique et réduction des coûts d'approvisionnement) est là aussi la principale problématique qui en permettra la diffusion commerciale. Dans le cas du béton bas carbone, il s'agit même d'une problématique bien supérieure aux freins technologiques.

Enfin, la problématique de diffusion des nouveaux produits dans le secteur du bâtiment est clé. En effet, le secteur étant très atomisé (93 % des entreprises ont moins de 10 salariés[13]), cela demande du temps et de la formation pour mobiliser tous les acteurs du secteur sur l'ensemble de la chaîne de valeur : production des matériaux et des sous-systèmes constituant le bâtiment, conception du bâtiment, exploitation/utilisation et fin de vie. Acquérir des références est également nécessaire, afin de convaincre la maîtrise d'ouvrage de la crédibilité de ces matériaux et des entreprises qui les portent (ce sont souvent des TPE ou petites PME).

Les enjeux réglementaires, sanitaires et environnementaux

L'application de la réglementation thermique 2012 (RT2012) constitue une avancée inégalée en Europe dans la maîtrise des consommations énergétiques des bâtiments neufs. La RT2012 a en effet conduit à diviser par 2 à 3 les consommations d'énergie réglementées grâce à la généralisation des bâtiments neufs basse consommation depuis le 1er janvier 2013.

13 – COSEI, 2011 : *Soutenir la compétitivité de la filière française du bâtiment à faible impact environnemental*

Cette réglementation s'inscrit dans la directive de performance énergétique et notamment à son article 9 qui impose que les États membres généralisent à horizon 2020, dans la construction neuve, les bâtiments à énergie quasi-nulle et ayant recours de manière significative aux énergies renouvelables.

Le contexte législatif national actuel introduit quant à lui l'objectif de généraliser les bâtiments à énergie positive dans la construction neuve pour 2020. En outre, la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte a modifié l'article L.111-9 du code de la construction et de l'habitation afin d'avancer à 2018 la définition d'une méthode de calcul des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie d'une construction neuve. Ainsi, les notions de bâtiment à énergie positive et de haute performance environnementale devront être définies en cohérence avec le contexte européen et national.

À ce titre, les travaux de préparation de la future réglementation énergétique et environnementale se consacrent à l'élaboration collaborative, avec les professionnels, d'un référentiel volontaire pour l'affichage des performances du bâtiment à énergie positive et à haute performance environnementale pour la fin d'année 2015. Aussi, des groupes de travail ont-ils débuté au mois d'avril 2015.

La France a mis en œuvre une réglementation (Décret n° 2013-1264 du 23 décembre 2013 relatif à la déclaration environnementale de certains produits de construction destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment) relative à la déclaration environnementale des produits de construction. Cette réglementation prévoit que, dès lors qu'un fabricant souhaite communiquer sur un aspect environnemental de son produit, il doit renseigner et communiquer aux autorités publiques la déclaration environnementale de ce produit. Cette déclaration environnementale est réalisée conformément à la norme NF EN 15804 et son complément national. Le dépôt des déclarations se fait sur une base de données réglementaire mise à disposition par les autorités publiques. L'objectif est de disposer de données robustes, cohérentes entre elles et fiabilisées avec une vérification par une tierce partie indépendante dès juillet 2017 pour les produits et équipements de construction.

Plusieurs labels ou certifications en lien avec les performances environnementales du bâtiment existent ou sont en cours d'élaboration. La certification NF HQE (Haute Qualité Environnementale) reprend les différentes dimensions de la démarche HQE. La certification NF HPE (Haute Performance Énergétique) reprend les critères de la certification HQE en lien avec l'efficacité énergétique.

Le label Bâtiment biosourcé vise à mettre en avant les bâtiments qui intègrent une part importante de matériaux biosourcés. Actuellement, l'Association bâtiment bas carbone (BBCA) travaille également à élaborer une méthodologie de labellisation des bâtiments utilisant des matériaux de construction bas carbone.

De manière générale, tout label ne peut être délivré que si le bâtiment a déjà fait l'objet d'une certification.

Pour l'export, des dénominations similaires à la HQE existent en Europe et aux États-Unis : BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) au Royaume-Uni, DGNB (German Green Building Council) en Allemagne, LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) aux États-Unis et PdC (Perfil de Calidad) en Espagne.

Analyse AFOM

ATOUTS

Approches collectives de la performance environnementale portée par l'association HQE

Certifications environnementales qui poussent le marché

Offre industrielle variée et répartie sur le territoire ce qui est une force en matière d'environnement

FAIBLESSES

Certifications environnementales françaises pas assez déployées à l'international

L'industrialisation peine à se réaliser en étant seulement portée par des entreprises de petite taille

OPPORTUNITÉS

Mise en place d'une étiquette de performance environnementale probable par les pouvoirs publics

MENACES

Mise en place de nouveaux systèmes constructifs à haute qualité environnementale perçue comme complexe par certains acteurs

Facteurs clés de succès et recommandations

Au vu des différentes initiatives qui se développent sur la haute qualité environnementale, le principal facteur clé de succès est la convergence vers un nombre restreint de normes et labels basés sur des critères de performances pertinents et fiables. La DHUP a lancé une telle démarche avec les professionnels pour la mise en place d'un référentiel d'évaluation de la performance environnementale du bâtiment neuf. Celui-ci permettra une dynamique plus forte sur des sujets bien ciblés et une meilleure lisibilité de la Haute Qualité Environnementale par tous les acteurs de la chaîne de valeur, des producteurs de matières premières aux utilisateurs finaux.

La poursuite de la structuration des nouvelles filières des matériaux de construction ainsi que l'industrialisation est également clé pour le déploiement de ces matériaux à grande échelle. L'intervention de groupes industriels déjà établis sur d'autres matériaux pourrait accélérer cette démarche.

Enfin, la promotion de la Haute Qualité Environnementale, sous forme de formation, de campagnes de sensibilisation et d'incitations fiscales permettra d'accélérer le déploiement de ce type de bâtiments et leur appropriation par les différents acteurs de la chaîne de valeur. L'exemplarité du public en favorisant l'utilisation de ces matériaux dans le bâti public permettrait d'accélérer l'industrialisation et la crédibilité de ces filières.

Acteurs clés

Fabricants de matériaux de construction et de matières premières : Saint-Gobain (placoplatre, verre), Lafarge (béton), Vicat (béton), Imerys (terre cuite), Bouyer Leroux (terre cuite), Chanvribloc (chanvre), Terre de Lin (lin), Les Chanvrières de l'Aube (chanvre), BCB Tradical (chaux), Chaux & Enduits de St Astier (chaux), Alkern (bloc béton)

Industriels des systèmes constructifs : Cobs (bois), Novhisol (système constructif à ossature en béton armé et béton de fibres végétales), Cuiller Frères

Maître d'œuvre : Bouygues Construction, Vinci, Eiffage, SPIE

Centres de recherche et centres techniques : CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), Labex MMCD (Modélisation et expérimentation multi-échelle des matériaux pour la construction Durable), IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), CTMNC (Centre technique des matériaux naturels de construction), Polytech Clermont Ferrand, Laboratoire de génie civil et génie mécanique (Université de Rennes 1/ INSA Rennes), FRD CODEM le Matlab

Associations : association HQE, AIMCC (Association des industriels des produits de construction), pôle éco-conception, Qualibat, Construire en chanvre

Organismes certificateurs : Cequami, Certivéa, Cerqual

Pôle de compétitivité : Fibres Energievie, Xylofutur, IAR, Matikem, pôle Innovations Constructives, Advancity

Autres structures de soutien : Ademe, Prebat

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

40 Systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, **HABITAT**, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Énergie, solaire thermique, photovoltaïque, éolien, géothermie, bois énergie, énergie hybride, distribution, stockage, chauffage, ventilation

© SAFTAIR Ventilation

Définition et périmètre

Les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment regroupent les technologies permettant l'intégration des systèmes de production, de distribution, de gestion et de stockage de l'énergie dans un même bâtiment. Ils comprennent l'intégration des technologies hybrides qui est l'intégration des énergies renouvelables aux énergies conventionnelles (fioul, électricité, gaz). Les sources d'énergies utilisées dans le bâtiment sont des énergies non renouvelables (gaz, fioul, électricité non renouvelable) et des énergies renouvelables (solaire thermique, photovoltaïque, géothermie, aérothermie, réseau de chaleur et bois énergie). On notera que l'éolien intégré au bâtiment est très peu diffusé en France et dans le monde.

Ils peuvent également concerner la distribution de chaleur via le vecteur air, les systèmes associant plusieurs fonctions (chauffage, ventilation, production d'eau chaude) et la récupération de la chaleur fatale sur l'air extrait, les eaux grises. La gestion de ces systèmes passe par l'utilisation de capteurs intelligents liés au domaine de la domotique.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La transition énergétique pousse au développement et à la diffusion des systèmes énergétiques innovants notamment en matière de production de chaleur et de froid via des sources hybrides associant les énergies renouvelables, le gaz et l'électricité, de production d'électricité intégrée au bâtiment (photovoltaïque, cogénération) et de stockage d'énergie dans la structure du bâtiment, dans l'eau chaude et la gestion intelligente de ce stockage. L'intégration de l'ensemble de ces éléments et leur pilotage intelligent selon différents critères (coût, énergie, CO_2) en fonction des besoins du bâtiment et de ses occupants et en interaction avec les réseaux constitue un enjeu majeur. Cette technologie est stratégique et devrait être à maturité dans 3 ans. De plus, l'intégration des énergies nouvelles en complément des énergies conventionnelles reste une technologie à maîtriser et à développer. L'intégration de ces énergies permettra de relever des enjeux réglementaires tels que le nZEb (nearly zero emission building) et le BEPOS (bâtiment à énergie positive) (voir ci-dessous).

Cette technologie est donc stratégique pour les acteurs du logement, et le développement des technologies concernées est attendu pour 2020, en concordance avec le calendrier réglementaire.

Les entreprises françaises restent pour l'instant dans la moyenne sur ces technologies. Les acteurs académiques sont par contre dans le peloton de tête au niveau mondial, sans pour autant en garder le leadership.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs

Les technologies influencées par les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment sont :	
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
6	Infrastructures de 5ème génération
38	Systèmes de rénovation du bâti existant
39	Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf

Les technologies clés qui influencent les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment sont :	
14	Technologies immersives
38	Systèmes de rénovation du bâti existant
39	Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf

Les technologies influencées par les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment sont :

Cette technologie est fortement liée à la modélisation, simulation et ingénierie numérique (4). La conception avancée permettra de mieux disposer les éléments afin d'optimiser la gestion, distribution de l'énergie. Elle est également liée aux capteurs (2) qui permettent de mieux gérer les consommations d'énergies dans le bâtiment. Elle concerne aussi les systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf (39).

Les marchés

Le marché des énergies renouvelables est réparti entre les marchés des énergies solaire, éolienne, géothermique, hydroélectrique et le bois énergie. Les énergies renouvelables concernent aussi bien les bâtiments tertiaires que résidentiels. La directive européenne 2009/28/CE fixe pour la France un objectif de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie pour 2020. En 2012, la France atteignait 13,7 %.

En 2013, le marché mondial cumulé des parcs solaires photovoltaïques est estimé à près de 140 GW, porté en grande partie par la Chine qui atteignait à elle seule 13 GW. Selon le Commissariat général au développement durable (CGDD), le parc solaire photovoltaïque en France atteignait une puissance installée de 5631 MW fin 2014. Cette puissance représente une croissance de 20 % par rapport à 2013. Les projets photovoltaïques en cours fin 2014 ayant une convention de raccordement signée représentent 850 MWc[1], soit 4,7 MWc cumulé en France. L'habitat représente une petite partie du raccordement photovoltaïque : les projets pour le résidentiel (< 9 kW) représentent au total 897 MW, 20 % de la puissance raccordée cumulée jusqu'en fin 2014[2]. Ce sont surtout les projets supérieurs à 1 MW qui boostent la production d'énergie photovoltaïque en France depuis 2012. Au contraire, le marché du photovoltaïque résidentiel est stable, avec environ 120 MWc par an.

La production de la filière solaire thermique s'élève à 133 ktep en France en 2012. Jusqu'à 2009, la production a fortement progressé puis la progression a ralenti après 2010. L'objectif fixé pour 2020 vise 927 ktep de consommation d'énergie solaire thermique[3].

L'intégration des énergies renouvelables concerne aussi bien les bâtiments neufs que les bâtiments en rénovation. En 2012, on comptait 33,4 millions de logements dont 27,8 millions de résidences principales[4]. Près de 30 millions de m² de logements et 27 millions de m² de bâtiments tertiaires ont été construits en 2013[5]. Le bâtiment représente 40 % de l'énergie totale consommée en Europe. En équipant 30 % du parc immobilier de panneaux photovoltaïques en France, le potentiel de production serait estimé à 45 TWh, ce qui correspond à 10 % de la consommation électrique française[6]. Ces opportunités concernent aussi bien les constructions neuves que les rénovations.

En 2013, 501 réseaux de chaleur étaient implantés dans 350 villes en France[7]. Ils permettent un accès plus facile à des énergies renouvelables comme la biomasse (bois-énergie) et la géothermie aux bâtiments publics et privés. Les énergies renouvelables et de récupération représentaient 40 % du mix énergétique des réseaux de chaleur en France la même année, chiffre qui a augmenté de plus de 50 % en neuf ans.

1 – Commissariat Général du développement durable

2 – Observatoire Énergie Solaire Photovoltaïque

3 – Commissariat Général au développement durable

4 – Ademe

5 – Fédération Française du Bâtiment (FFB)

6 – Les États Généraux du Solaire Photovoltaïque, « Solaire Photovoltaïque : quelles réalités pour 2020 ? », Oct 2011

7 – Fédération des services énergie environnement (FEDENE) : www.fedene.fr

Les défis technologiques à relever

La progression de l'intégration des technologies hybrides peut être ralentie par des freins technologiques.

La filière biomasse, quant à elle, présente des incertitudes quant à son développement. La mobilisation reste insuffisante, due en partie à la fiscalité forestière qui incite peu à l'exploitation et la replantation. Dans certaines régions, l'offre est insuffisante à cause de la sous-exploitation de la forêt. La disponibilité de cette ressource constitue également un frein. La pluviométrie exceptionnelle depuis l'hiver 2012-2013 est très défavorable à la mobilisation des bois rendant l'exploitation des parcelles difficiles[8]. La difficulté à anticiper les projets est également un frein au développement de la biomasse. De nouveaux projets de grande ampleur pourraient facilement rendre le nombre d'équipement insuffisant dans les régions. En parallèle, l'anticipation d'une demande qui tarde à arriver dans les régions a conduit à l'acquisition de certains équipements (broyeurs) qui se retrouvent finalement en sous-utilisation[9]. Cette surcapacité, co-financée par les régions et les entreprises, est à l'origine de coûts de transformation plus élevés ce qui rend l'amortissement difficile pour les entreprises.

Dans la filière photovoltaïque, les problèmes de sécurité et d'étanchéité ne sont pas encore résolus. Par exemple, le marché du BIPV (Building Integrated Photovoltaic), des panneaux photovoltaïques intégrés aux bâtiments en tant que matériaux de construction, est encore peu connu.

Sur les technologies d'intégration en elles-mêmes, les principales difficultés sont liées à l'installation et la maintenance des installations : la part de plus en plus forte de l'électronique nécessite de former spécifiquement les opérateurs.

Le stockage d'énergie électrique est aussi un des enjeux dans le cadre d'autoconsommation. Les technologies de type batterie, volant à inertie ou encore thermochimique existent déjà mais ne sont pas totalement satisfaisantes en termes de rendement et de rapport coût/durée de vie. Les technologies issues de la mobilité (batteries lithium) sont des relais possibles, avec toutefois des critères différents par exemple autour de la compacité ou de la fiabilité des technologies.

En lien avec les technologies clés de « modélisation, simulation et ingénierie numérique », les défis sont liés aussi à une évolution des pratiques de conception, basées sur une prise en compte de l'ensemble du bâtiment mais aussi de son intégration dans son environnement afin de gérer les intermittences possibles d'énergie tout en conservant la frugalité énergétique du bâtiment. Enfin, le raccord à l'échelle de l'îlot, notamment en vue du développement des smart grids, représente lui aussi un défi sur la conception du bâtiment, et la surveillance des sources d'énergie et la communication entre elles.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'accessibilité et la rentabilité des systèmes hybrides sont des défis commerciaux. Les coûts d'investissement pour les énergies éolienne et photovoltaïque sont les plus importants même s'ils sont en baisse. Les panneaux photovoltaïques sont majoritairement importés, en particulier de Chine. Pour les acteurs français, le défi reste donc dans la proposition de solutions clés en main et non sur les panneaux photovoltaïques en eux-mêmes. Cependant, la diminution du prix des modules photovoltaïques a provoqué une baisse importante des coûts d'investissement et d'exploitation depuis 2010[10]. En effet, le prix des modules représente près de la moitié des coûts d'investissements.

De manière générale, les fortes fluctuations des cours des hydrocarbures, une baisse de longue durée du secteur de la construction en France[11] et un coût encore élevé des équipements ENR nuit à leur diffusion (le marché des chaudières à condensation utilisant des hydrocarbures étant lui en croissance sur cette même période)[12] :

- Chaudières bois : 14 500 unités vendues en 2014 (-37 % par rapport à 2013), le marché est en

8 – Fédération des services énergie environnement (FEDENE), « Biomasse enjeux et chiffres clés », Avril 2014

9 – Comité Interprofessionnel du Bois Énergie (CIBE)

10 – Rapport CRE (Commission de Régulation de l'Energie) « Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine », Avril 2014

11 – Depuis 2008, le secteur de la construction a connu un recul de 20,4 % de son activité (-1,6 % en 2015). Les professionnels du secteur s'attendent néanmoins à un redémarrage en 2016 avec une croissance de +0,7 %. Source : Euler Hermes.

12 – Source des données mentionnées ci-dessous : UNICLIMA ; *Bilan 2014 et perspectives 2015 du génie climatique* ; dossier de presse présenté le 10 février 2015.

dents de scie depuis 2005 où il avait atteint son maximum (2014 représente environ la moitié des unités vendues en 2005).

■ Le marché du solaire thermique continue en 2014 la baisse engagée depuis 2008 avec une nouvelle chute de 21 % des surfaces installées :

— Baisse de 9 % du marché des chauffe-eau solaires individuels (CESI) qui s'établit à 18600 unités en 2014. Grâce à une optimisation technico-économique des produits, le segment des CESI baisse moins que les autres. On pourra notamment citer le segment des colonnes solaires (ou chaudières compactes associées avec un CESI) qui représente plus de 25 % du marché des CESI et ne baisse que de 7 %.

— Les systèmes solaires combinés (SSC) qui alimentent la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage sont toujours conçus en complémentarité avec une chaudière classique. Ce marché poursuit sa baisse (-36 % par rapport à 2013) et avec 700 unités vendues en 2014 il peut aujourd'hui être considéré comme une niche en France, aussi bien sur le neuf que sur la rénovation. A contrario, les SSC sont une technologie de référence sur le marché allemand.

— Les livraisons de capteurs destinés aux immeubles collectifs sont, pour la deuxième année consécutive, en baisse (-22 %) avec une surface installée de 75 500 m².

■ Le marché des pompes à chaleur sur vecteur eau continue à baisser (-19 %) en 2014 et s'établit à 3 249 unités. À noter qu'en Allemagne, ce marché a également baissé de 13,4 % en 2014. Si Uniclima ne donne pas de statistiques sur le marché des pompes à chaleur géothermique, l'AFPAC[13] estime que la baisse en 2015 par rapport à 2014 est de 15 % (-10 % sur les systèmes eau glycolée/eau et eau/eau).

L'incitation des pays pour encourager la production d'énergie par les particuliers et professionnels se traduit par une réduction des impôts et des subventions aux équipements, le but étant de réduire les émissions en CO_2. En France, en 2015 :

■ Taux de 30 % par dépense engagée à l'exclusion de la main d'œuvre sans condition de ressources ni obligation de réalisation d'un bouquet de travaux

■ Calcul sur le montant TTC des dépenses, déduction faite des autres aides

■ Plafond des dépenses éligibles fixé à 8 000€ par personne et 16 000€ pour un couple

Les variations des taux de ce type de crédit d'impôt ont un fort impact sur la compétitivité de l'offre et sur la rentabilité des modifications énergétiques d'un bâtiment. Par ailleurs, le manque de visibilité sur les tarifs de rachat de l'électricité ou du biogaz (qui concerne toutefois plus le tertiaire ou les installations agricoles que l'habitat) peuvent freiner les investissements potentiels dans les technologies de production.

L'utilisation des énergies renouvelables dépend aussi des ressources naturelles disponibles dans chaque pays, voire région. Les pays qui disposent d'un fort ensoleillement toute l'année seront plus à même de bénéficier de l'énergie solaire.

Les enjeux réglementaires

Les objectifs de la transition énergétique prévoient une division par 4 de la consommation énergétique de l'ensemble du parc de bâtiments en 2050 par rapport à 2010 ainsi que 500 000 logements rénovés par an à partir de 2017.

La RT 2012 en application depuis le 1er janvier 2013 pour tous les bâtiments neufs a pour objectif le niveau « bâtiment basse consommation » c'est-à-dire 50 kWhEP/m²/an.

Par ailleurs, le développement du BEPOS (bâtiment à énergie positive) a été mis au cœur de la loi sur la transition énergétique, en particulier pour la construction

13 – Source : AFPAC ; *lettre d'information n°23* ; juin 2015.

des futurs bâtiments publics. La prochaine réglementation environnementale et énergétique de 2020 visera encore davantage le développement des énergies renouvelables en accord avec la directive européenne EPBD 2010/31/EU rendant obligatoire le niveau de performance Nearly Zero Energy Building (nZEb) pour toutes les constructions neuves.

Le nZEB est un bâtiment à faible consommation énergétique, comme l'illustre le schéma ci-dessous, dont les équipements seront très performants et qui devrait avoir un recours significatif aux énergies renouvelables. Le BEPOS quant à lui pourra, en plus du nZEB, viser autant que possible une production d'énergie renouvelable supérieure à sa consommation d'énergie primaire.

La réponse technique pour l'atteinte du nZEB et du BEPOS pourra se faire par :

- une conception bioclimatique renforcée, profitant au maximum des atouts du climat local,
- des matériaux d'enveloppe à haute performance énergétique et environnementale,
- des systèmes énergétiques de chauffage, d'eau chaude et d'éclairage à haute efficacité,
- un recours limité aux énergies non renouvelables ou une part significative de recours aux énergies renouvelables.

Figure 1 : Schéma représentant une maison passive
(source : Sénova)

Le stockage d'énergie électrique est aussi un enjeu pour la filière qui est fortement lié à l'aspect réglementaire. En France, il est plus rentable de revendre l'électricité, tandis qu'en Allemagne l'autoconsommation est plus avantageuse fiscalement. Les conceptions de système de stockage électrique sont donc très dépendantes des réglementations locales.

Analyse AFOM

ATOUTS

Tissu industriel dense avec de nombreuses entreprises de taille intermédiaire (ETI).

Mise en place des certifications soutenue par les pouvoirs publics, avec une visibilité croissante.

FAIBLESSES

Faible coût de l'électricité en France et systèmes très réglementés.

OPPORTUNITÉS

Evolutions réglementaires notamment vers les BEPOS et les règlements européens. Notion d'éco-conception.

MENACES

Acteurs internationaux puissants à la fois sur les équipements et sur leur pilotage : acteurs traditionnels (ex : Siemens) ou nouveaux (ex : Google avec Nest).

Pérennité des aides assurant la rentabilité des investissements.

Facteurs clés de succès et recommandations

De forts investissements sont nécessaires pour lever les verrous technologiques et commerciaux. Il faudra adapter les dispositifs de soutien à l'innovation par le biais notamment d'appels à projets spécifiques.

La mise en place de méthodes de calculs, de labels et de standards tels l'étiquette environnementale des bâtiments neufs et le référentiel BEPOS pourra favoriser les réponses aux enjeux évoqués et garantir la performance.

L'intégration des technologies hybrides sera facilitée par d'autres technologies clés telles que les capteurs et la conception avancée (modélisation, simulation et ingénierie numérique).

Encourager la recherche par le biais d'appels à projets spécifiques et de démonstrateurs dédiés, équipés de capteurs, permettait de répondre à l'utilisation simultanée de plusieurs sources d'énergies renouvelables. Un soutien de la demande par des acteurs politiques, notamment grâce aux crédits d'impôt et subventions favoriserait l'intégration des énergies renouvelables aux énergies conventionnelles.

Acteurs clés :

Fabricants d'équipement de chauffage, climatisation, ventilation : CIAT, Aldes, CHAPPEE, Finimetal, Saftair Ventilation, Unelvent

Spécialistes du contrôle commande : Schneider Electric, Delta Dore, Legrand, CITEL, Somfy

Fournisseurs de capteurs intelligents : Factory Systèmes, SICK

Industriels de systèmes photovoltaïques : Tenesol, Fonroche Energie, Sunpartner, Solabios, Exosun

Fabricants de systèmes solaires thermiques : Clipsol (groupe Engie), Giordano Industries

Fabricants de pompes à chaleur : Aldes, Atlantic, CIAT, Sanden, Sofath

Fabricants de chaudières bois : Ecometis, Euroclima, Novotek Industry, Perge

Réseaux de chaleurs : Barriquand Technologies, Inpal Industries

Bureaux d'études certifiés dans le domaine de la thermique : Bastide Bondoux, Benefficience (groupe Elithis), ABM Énergie Conseil, Prelem

Centres techniques et instituts : CETIAT, CSTB, INES

Fournisseurs d'énergie : EDF, GDF, GRDF

Distributeurs d'électricité : ERDF, RTE

Pôles de compétitivité : TENERRDIS, S2E2, DERBI, Capenergies, Fibres Energivie, Advancity

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

41 Technologies de récupération de chaleur à basse température

Loisirs & culture
ÉNERGIE, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Pompe à chaleur ; chaleur fatale ; valorisation de la chaleur.

© AQYLON

Définition et périmètre

La chaleur dite « à basse température » désigne les sources d'énergie thermique dont la température est insuffisante pour qu'elle puisse être directement valorisée pour un usage industriel interne, ou convertie en électricité par les moyens conventionnels. Il s'agit, par exemple, de la chaleur issue d'un procédé de production dont ce n'est pas le premier objet et qui n'est pas réemployable (chaleur fatale) : fumées de fours, eaux de refroidissement, etc. En plus de ces sources principalement industrielles, d'autres sont associées aux énergies renouvelables : énergie solaire, valorisation énergétique de la biomasse (combustion et gazéification) et géothermie basse énergie. Le premier enjeu est de capter et éventuellement de transporter cette chaleur, puis, dans un second temps, de la transformer en une forme d'énergie plus facilement valorisable : chaleur à plus haute température, froid ou électricité.

Les gisements de chaleurs résiduelles (ou chaleurs fatales), issues par exemple des procédés industriels, sont souvent perdus car non directement utilisables.

Il s'agit par exemple de sources de chaleur à des températures inférieures à 130°C provenant des purges de chaudières, des condensats de vapeur, des vapeurs de procédé, etc. Dans le cas du solaire thermique et de la géothermie, il s'agit principalement de chaleur à des températures inférieures à 200°C.

Bilan thermique d'un four industriel *(source : ADEME)*

La chaleur peut être disponible dans un fluide sous forme liquide ou, le plus souvent, gazeuse (gaz chauds). Différents principes physiques peuvent être mis en œuvre en fonction des caractéristiques de la source disponible et de la forme d'énergie que l'on souhaite produire (chaleur, froid, électricité).

Cycle Rankine Les cycles Rankine à fluide organique (ORC : Organic Rankine Cycles) utilisent un fluide organique comme fluide de travail, principalement des fluides également utilisés comme réfrigérants : CFC, HFC, isopentane, propane, ammoniac, etc. Ces cycles peuvent fonctionner à 70-80°C mais aussi à 400°C. Ils sont bien adaptés à la production d'électricité (via une turbine) à partir d'une source de chaleur à basse température autour de 150-200°C. Leur rendement est de l'ordre de 10 à 20 %.

Cycle Kalina Ce cycle utilise un mélange non azéotrope de fluides fournissant du travail dans une turbine. Le mélange est souvent de type eau/ammoniac mais il existe des variantes utilisant des composés organiques. Dans un évaporateur, la source de chaleur chauffe le mélange eau/ammoniac initial qui se vaporise partiellement et produit une vapeur à forte concentration en ammoniac et un liquide pauvre en ammoniac. Le flux gazeux entraîne une turbine de détente avant d'être remélangé avec le liquide puis refroidi jusqu'à condensation totale. Le mélange est ensuite pompé pour un nouveau cycle. Une des principales spécificités de ce cycle est l'évolution de la composition du fluide de travail en fonction de la température ce qui permet de mieux valoriser les sources à température variable. Théoriquement plus efficace que le cycle ORC, il est néanmoins plus complexe et plus coûteux en investissement.

Dans le cas des cycles pour la production d'électricité, il est possible d'ajouter une valorisation supplémentaire en récupérant de la chaleur au niveau des condenseurs (plus froide que celle entrée dans le cycle) pour alimenter par exemple un réseau de chaleur.

Thermoélectricité (effet Seebeck) La technologie thermoélectrique consiste à directement convertir la chaleur en électricité dans une cellule de matériaux semi-conducteurs en utilisant une source chaude et une source froide. Le système est composé de deux

éléments semi-conducteurs de type p et de type n. Sous l'effet du différentiel de température, une force électromotrice thermique est générée, d'où un flux de courant entre les éléments semi-conducteurs. Le poids, la taille des systèmes thermoélectriques et l'absence de pièces mécaniques en mouvement sont leurs principaux atouts. Cette technologie, adaptée aux faibles puissances, est dans l'état actuel extrêmement coûteuse ; de plus, elle impose l'utilisation de métaux rares.

Cycles à absorption Ces cycles sont utilisés dans des équipements de type pompe à chaleur. Le rehaussement de température est compris entre 20 et 50°C pour une limite de la température maximale de la chaleur récupérée à 150°C en raison des phénomènes de corrosion induits par les fluides employés (LiBr/eau ou eau/ammoniac). Les cycles utilisés peuvent être simples ou double effet. Les machines à absorption sont également fréquemment utilisées pour produire du froid à partir d'une source de chaleur.

Cycles hybrides La terminologie « hybride » fait référence à l'association entre un cycle à absorption et un autre cycle. Les deux cas de figure envisageables sont l'absorption et la thermocompression, et l'absorption et la compression mécanique. Le second cas de figure est destiné à valoriser une chaleur résiduelle à 50 °C. Il s'agit d'un cycle associant absorption et compression, avec un fluide eau/ammoniac ; il peut produire de l'eau chaude à 95°C, ainsi que de l'eau glacée à 5°C.

Machines thermoacoustiques Les pompes à chaleur thermoacoustiques utilisent la propriété des ondes sonores de pouvoir créer une différence de température, et vice-versa. Le système est composé d'un régénérateur placé à une de ses extrémités dont le rôle est de prélever la chaleur au niveau de la source chaude pour la convertir en énergie acoustique. A l'autre extrémité, le phénomène inverse est utilisé pour convertir l'onde acoustique en chaleur. Le transfert de l'onde est assuré par un résonateur reliant les deux extrémités. Ce système utilise un gaz comme fluide de travail et permet de valoriser de la chaleur comprise entre 50 et 100°C.

Les **moteurs à combustion externe** (de type Stirling ou Ericsson) permettent de produire de l'énergie mécanique à partir de deux sources de température (une chaude et une froide) grâce à un fluide caloporteur. La combustion n'ayant pas lieu à l'intérieur du moteur, diverses sources peuvent être utilisées ; par exemple, coupler une chaudière à un moteur Stirling utilisant les gaz de combustion permet de la transformer en « chaudière électrogène ». Des appareils domestiques reposant sur ce principe sont d'ores et déjà sur le marché.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les sources de chaleur basse température représentent plus de la moitié des sources de chaleur disponibles mais leur potentiel est encore sous exploité car les technologies actuelles sont trop chères, insuffisamment performantes ou adaptées aux multiples formes sous lesquelles ces sources sont disponibles. L'amélioration des technologies existantes et le développement de nouvelles technologies de valorisation sont des enjeux majeurs pour ce marché.

Ces technologies contribuent directement à l'amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques, quel que soit le secteur concerné – même si elles sont mieux adaptées aux gisements de chaleur localisés et constants (par exemple, dans l'industrie). Ce potentiel a clairement été identifié en Europe et en Amérique du Nord.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les technologies de récupération de chaleur à basse température sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique

Il n'y a pas de technologies influencées par les technologies de récupération de chaleur à basse température.

Les marchés

© Enertime

Les équipements de valorisation de chaleur basse température représentent à l'heure actuelle des niches de marché relativement hétérogènes de part les conditions économiques défavorables, principalement les coûts d'investissement.

Les systèmes ORC ont été commercialisés à partir des années 1980. La puissance totale installée dans le monde atteignait 600 MW au début des années 2000 ; le marché s'est ensuite développé, au rythme d'environ 100 à 200 MW supplémentaires chaque année. La valorisation de chaleurs fatales concerne environ 20 % des installations actuelles, les autres étant associées aux énergies renouvelables (principalement géothermie et biomasse). On peut noter au passage que dans le secteur de la géothermie, les ORC sont largement plus utilisés que les cycles Kalina (6 MW recensés en 2014).

Le marché actuel des machines à absorption est principalement constitué d'équipements dédiés à la climatisation. Il s'agit plus spécifiquement d'équipements alimentés au gaz, adaptés à des zones géographiques dans lesquelles les pics de consommation d'électricité en été peuvent rendre ce mode de climatisation plus intéressant. De ce fait, le marché est principalement localisé en Asie. L'utilisation de machines à absorption pour valoriser de la chaleur fatale ne fait pour l'instant l'objet que d'opérations ponctuelles. Là encore, la recherche de fluides de travail mieux adaptés, d'équipements moins chers est fondamentale.

Étant donné leur coût encore trop élevé, les générateurs thermoélectriques restent principalement réservés à des usages dans le spatial ou le militaire ; le marché total était évalué à 45 M$ en 2012.

Les défis technologiques à relever

Captation De nombreuses sources ne sont habituellement pas adaptées à la récupération de chaleur par les techniques conventionnelles. Un exemple est celui des pertes de chaleur sur des parois latérales, comme dans le cas des fours verriers ou des creusets, ou bien des produits et sous-produits de la vapeur. Des technologies de captation pour amener ces sources non conventionnelles jusqu'à un échangeur thermique sont à considérer.

Corrosion La corrosion induite par les fluides diminue l'efficacité et la durée de vie des échangeurs. Plusieurs approches peuvent être envisagées : matériaux intrinsèquement résistants à la corrosion ; substitution par des fluides moins corrosifs. Par ailleurs, en plus de la corrosion, des substances peuvent venir se déposer sur la surface des échangeurs, ce qui entraîne des pertes de rendement. Ces phénomènes peuvent être limités par une conception adaptée des surfaces d'échangeur et des systèmes de nettoyage des installations.

Transfert thermique La récupération de la chaleur de fluide à basse température nécessite une surface spécifique pour optimiser le transfert thermique. Ce problème est particulièrement présent lorsque le fluide est un gaz. Le développement de matériaux avec des coefficients de transfert thermique élevés tel que des céramiques est une voie possible. L'augmentation de la surface spécifique d'échange du matériau en le structurant à une petite échelle contribue également à améliorer le transfert.

Cycle Rankine Les performances du cycle Rankine, en termes de tolérance aux fluctuations de température et d'efficacité, dépendent fortement du fluide utilisé. Le développement de nouveaux fluides avec des coefficients de transfert thermique accrus et pouvant être utilisés à basse température est un des principaux enjeux pour cette technologie.

Générateurs thermoélectriques La diminution du coût et l'amélioration des performances des générateurs thermoélectriques concernent principalement celles des matériaux semi-conducteurs les constituant.

Un des principaux défis technologiques est de minimiser la conductivité thermique sans diminuer celle des électrons. La structuration des matériaux à une échelle micro- voire nanométrique ou la réalisation par chimie du solide de structurations complexes, sont des approches prometteuses pour l'amélioration générale des performances. Le matériau de base utilisé doit provenir d'une source abondante, telle que des silices et des oxydes métalliques, afin de limiter les coûts.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le premier défi concerne la différence de localisation entre le gisement de chaleur à valoriser et le point d'utilisation, lorsque la valorisation est faite sous forme de chaleur ou de froid (alimentation de bâtiments ou de réseaux urbains, par exemple). La distance entre les zones industrielles où la chaleur est récupérée et les zones urbaines consommatrices est un obstacle à la diffusion de ces technologies. Il est également nécessaire que la disponibilité de la chaleur soit en adéquation avec les besoins des réseaux utilisateurs.

La valorisation sous forme d'électricité n'est pas confrontée à ce type de difficulté et, en pratique, peut être en concurrence directe avec la voie thermique. Le coût du kWh ainsi produit est un enjeu-clé.

De façon générale, quel que soit le système considéré, les dépenses en investissement initiales sont largement supérieures à celles associées aux équipements de production d'énergie conventionnels (turbines, chaudières, pompes à chaleur électriques, etc.). L'intérêt économique de ces technologies est qu'elles permettent de valoriser une énergie qui serait autrement perdue. Il reste néanmoins nécessaire de développer des technologies à plus bas coût et multi-applications afin de permettre leur plus large diffusion. Par ailleurs, les opérations de maintenance peuvent être importantes dans le cas de sources de chaleur polluées. Elles entraînent un coût supplémentaire qui peut mettre en péril la viabilité économique de la solution.

Les enjeux réglementaires

La loi sur la transition énergétique pour la croissance verte intègre la valorisation des énergies fatales pour lutter contre le gaspillage énergétique.

Depuis le 1er janvier 2015, la transposition de la directive européenne 2012/27/UE sur l'efficacité énergétique impose la réalisation d'une étude coûts-avantages en cas de rénovation substantielle ou d'installation nouvelle pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) d'une puissance thermique totale supérieure à 20 MW. Cette étude inclut l'évaluation de l'intérêt de valoriser la chaleur fatale par un raccordement à un réseau de chaleur ou de froid. Le dispositif ne s'applique pas à la valorisation de la chaleur fatale sur site ou à la valorisation entre deux sites industriels voisins.

Analyse AFOM

ATOUTS

Gisement de chaleur basse température présent sur le territoire français

Compétences académiques en thermodynamique et en matériaux

FAIBLESSES

Déficit de mécanismes incitatifs pour la valorisation sous forme d'électricité

Faiblesse du secteur des équipements industriels en général

OPPORTUNITÉS

Fonds chaleur de l'ADEME

Projets en matière d'écologie industrielle

MENACES

Fermeture de sites industriels

Avance technologique de la concurrence à l'international

Facteurs clés de succès et recommandations

Un mécanisme incitatif pour soutenir les investissements initiaux est nécessaire pour améliorer l'intérêt technico-économique de ce type d'équipements. L'élargissement du mécanisme des études coûts-avantages utilisé dans le cadre des ICPE, à l'ensemble des structures faciliterait la diffusion de l'emploi de ces technologies sur le territoire.

Acteurs clés :

Entreprises	AirLiquide, Alstom Hydro Power, Aqylon, Arkema, Bertin Technologies, CNIM, Enertime, Engie – Cylergie, EReiE, Hevatech, Total…
IRT, ITE, IHU	IDEEL, PS2E…
Centres techniques	CSTB (également Institut Carnot)…
Instituts Carnot	IRSTEA, Energies du Futur, M.I.N.E.S. …
Autres centres de recherches	CEA LITEN, CETHIL, CRIGEN, GRETh, PROMES…
Pôles de compétitivité	Axelera, Fibre Energivie, Tenerrdis…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

42 Solaire photovoltaïque

Loisirs & culture
ÉNERGIE, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Photovoltaïque ; solaire ; couches minces ; énergie renouvelable.

© HELIATEK

Définition et périmètre

La technologie solaire photovoltaïque (PV) permet la conversion de l'énergie solaire en courant électrique. Les cellules photovoltaïques, des dispositifs semi-conducteurs, sont associées en modules d'une capacité de plusieurs centaines de Watt (W). Un système complet consiste en deux éléments de base : le module, qui contient les cellules, et le « balance-of-system » (BoS), qui contient les composants autres que les cellules. Le BoS comprend les composants électroniques (convertisseur courant continu-courant alternatif ou courant continu-courant continu, un régulateur), le câblage, les structures du support, et pour certains systèmes un stockage d'énergie, un système optique et un système de suivi du soleil. Les systèmes photovoltaïques sont hautement modulaires, de quelques W à plusieurs MW, et peuvent être connectés au réseau électrique.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Dans le cadre de sa politique de transition énergétique, la France prévoit de porter la part des énergies renouvelables à hauteur de 23 % de sa consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de la consommation finale brute d'énergie en 2030. Le solaire photovoltaïque doit contribuer à l'atteinte de ces objectifs, notamment grâce au développement de centrales capables de produire des quantités conséquentes d'énergie.

Le secteur du bâtiment est demandeur en technologies lui permettant d'atteindre un objectif de zéro-émission de gaz à effet de serre (GES). De par sa nature délocalisée, la technologie photovoltaïque a le potentiel pour participer à cet effort et ainsi s'intégrer durablement dans le bâti.

Au niveau international, de nombreux pays développent ou envisagent l'adoption du solaire photovoltaïque comme moyen de production d'électricité afin d'augmenter la part d'énergie renouvelable dans leur mix énergétique. Dans son scénario 2DS, visant à limiter le réchauffement climatique mondial en dessous de 2°C à horizon 2050, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) fait jouer un rôle croissant au solaire photovoltaïque. Les marchés à l'export existent et sont en croissance, mais sont actuellement captés en grande partie par la production chinoise.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent le solaire photovoltaïque sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération

Les technologies influencées par le solaire photovoltaïque sont :	
22	Réseaux électriques intelligents

Les marchés

Le marché mondial du photovoltaïque (incluant modules, composants des systèmes et installations) a très fortement augmenté ces dernières années et représentait un chiffre d'affaires de 91 ,6 milliards d'euros en 2011. Il est attendu qu'il atteigne 130,5 milliards d'euros en 2021[1]. En 2013, 55 % des nouvelles installations étaient localisées en Asie, principalement en Chine et au Japon. Ce dernier, suite à l'accident de Fukushima Daiichi, a consenti des efforts importants envers le secteur des énergies renouvelables, notamment à travers l'augmentation significative en deux ans de sa capacité de production en électricité photovoltaïque. Des installations solaires commencent à être économiquement compétitives, comme celle installée au Chili par EDF ENR Chile et le japonais Marubeni, qui vend directement l'énergie produite sur le marché. Au Texas (États-Unis d'Amérique), une installation est devenue pour la première fois partiellement opérationnelle sans subvention de sa production d'énergie.

1 – Source : EurObserv'ER.

La production mondiale de modules photovoltaïques est dominée par la Chine, qui représentait 6 constructeurs parmi les 7 premiers fabricants en 2014 (1er Trina Solar, 2e Yingli Green Energy, 3e Canadian Solar [sino-canadien]).

En France, le chiffre d'affaires de la filière est en baisse depuis 2010, année où il avait atteint 6,4 milliards d'euros, contre 4 milliards d'euros en 2013, soit une baisse de 40 %[2]. Le nombre d'emplois liés à la fabrication des composants, aux études et à l'installation des systèmes a diminué sur la période 2012-2013, à respectivement 16 800 et 10 130 équivalents temps plein (ETP)[3]. L'augmentation des volumes de 2014 n'a pas encore permis de relancer la filière. Du fait de l'intensité de la crise que ce secteur a dû affronter pendant 3 ans, de nombreux acteurs du secteur ont disparu, alors que d'autres ont pu renforcer leur position. Ainsi, dans le secteur des modules, l'usine de Toulouse bénéficie de son intégration à l'Américain Sunpower (filiale de Total, chiffre d'affaires en progression annuelle de 20 %) ; Sillia Énergie a racheté l'usine française de Bosch Solar et est ainsi devenu le premier industriel français indépendant ; et Fonroche, grâce aux exportations, a maintenu sa capacité de production.

Parc photovoltaïque raccordé aux réseaux par région au 31 décembre 2014 *(source RTE/ERDF/ADEeF/SER)*

La puissance installée sur le territoire français (France métropolitaine) s'élève à 5,3 GW en décembre 2014, soit une croissance de 21 % par rapport à la même période l'année précédente. Elle est à 80 % localisée dans le Sud : les régions Aquitaine, PACA, Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon comptent pour 50 % du parc. Les installations se répartissent de manière homogène entre 25 % de toitures résidentielles à 4 kW en moyenne, 30 % d'installations de type bâtiment, parking et serres à 116 kW et 45 % de centrales à 2,4 MW. La croissance actuelle est tirée par ce dernier segment. La France a lancé un appel d'offres photovoltaïque fin mars 2015 de 120 MWc pour des installations de moyenne puissance comprise entre 100 à 250 kWc et destinées aux toitures de taille moyenne des bâtiments industriels, tertiaires et agricoles, ainsi que les ombrières de parkings.

En termes de puissance installée par type d'utilisateurs, au 31 mars 2015, les installations photovoltaïques en France comportaient 17 % de résidentiel, 35 % de commercial, 48 % de centrales au sol. Selon les segments d'application, les coûts de production varient presque du simple au triple, comme illustré dans le graphique ci-après. A ces coûts s'ajoutent ceux relatifs à l'accroissement de l'intermittence, qui se traduisent par la nécessité de disposer d'infrastructures de transports plus importantes ou d'outils de flexibilité (effacements, stockage, etc.) pour y répondre.

2 – Source : EurObserv'ER.

3 – Source : ADEME.

Comparaison des coûts de production en France selon trois applications : résidentiel, grande toiture et centrale au sol *(Source : ADEME sur la base du Rapport PVPS AIE, 2014)*

Les défis technologiques à relever

Cellules solaires à hétérojonctions L'utilisation d'hétérojonctions permet l'obtention de rendements plus élevés que les solutions classiques. C'est une technologie particulièrement adaptée aux applications pour lesquelles le rapport puissance / surface disponible doit être optimisé.

Amélioration des technologies couches minces La technologie des couches minces consiste à déposer sur un support de verre, de métal ou de plastique une faible quantité de matériaux semi-conducteurs. Les matériaux utilisés au stade industriel sont le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H, technique de dépôt assisté par plasma, PECVD), les composés CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium/soufre, technique d'électrodéposition) et les composés CdTe (tellurure de cadmium).

Photovoltaïque Organique (OPV) Les cellules solaires OPV utilisent des matériaux organiques pour convertir l'énergie solaire en électricité. De par leur nature, elles peuvent être imprimées sur de multiples substrats, posséder des propriétés de flexibilité et avoir un coût moindre que les technologies existantes. L'OPV devrait permettre l'éclosion de nouvelles applications et pourraient être plus facilement intégrée dans des produits grand public. Les développements doivent concerner le rendement de conversion énergétique et leur durabilité, et les procédés de dépôt doivent être améliorés.

Pérovskites hybrides Les pérovskites pour le photovoltaïque sont des matériaux hybrides organiques-inorganiques, tel que l'halogénure de plomb méthylammonium. Les cellules solaires basées sur ce type de matériau ont déjà atteint un rendement de 20 % en laboratoire. Ne nécessitant aucun équipement sous vide, de température élevée ou d'une salle blanche, leur simplicité de fabrication et de mise en œuvre en font une technologie prometteuse aux nombreuses possibilités d'intégration. Toutefois, des défis technologiques restent à résoudre : le remplacement du plomb par un élément non toxique ; l'augmentation de la stabilité à l'humidité ainsi qu'à la lumière. Enfin leur courte durée de vie (moins de 10 ans actuellement) est un frein à leur adoption.

Gestion de l'intermittence de la production La compensation des fluctuations de l'énergie produite est un enjeu majeur pour le développement du pho-

tovoltaïque. Afin de faciliter l'intégration de l'énergie solaire dans les réseaux électriques, il importe de lisser le courant en provenance des panneaux photovoltaïques. Le développement de technologies de stockage adaptées aux conditions spécifiques de la production de ce type d'énergie est indispensable pour le développement de la filière.

Modélisation des conditions atmosphériques Le profil de la production d'électricité photovoltaïque au cours de la journée est caractérisé par une forme de « cloche ». Le niveau de production est dépendant de l'intensité du rayonnement solaire ainsi que de la nébulosité. Le développement d'outils pour la surveillance et la prévision de ces facteurs est stratégique pour l'intégration et la prédiction de la production d'énergie au réseau électrique.

Capteurs Le développement de capteurs mesurant en temps réel les courants électriques au niveau des différents éléments des installations doit permettre la réduction des coûts de maintenance et d'exploitation. Ils apportent également des informations au réseau électrique sur le niveau de production énergétique des installations, ce qui permet une meilleure gestion de l'intermittence.

Intégration aux bâtiments Des systèmes photovoltaïques doivent être développés en adéquation avec les besoins spécifiques du bâtiment, à des fins d'autoconsommation ou dans le cadre du concept « BEPOS » (bâtiment à énergie positive). La facilité d'installation et les qualités esthétiques des modules et systèmes sont des critères importants, particulièrement s'ils sont destinés à être utilisés dans l'environnement bâti.

D'un point de vue général, la standardisation et l'harmonisation des caractéristiques physiques, mécaniques et électriques des modules pourront contribuer à réduire le coût des installations.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le marché mondial du photovoltaïque est amené à augmenter et à prendre une place de plus en plus importante dans la production d'électricité. L'exportation est primordiale pour la filière française, le marché intérieur étant insuffisant pour assurer son développement : des entreprises comme Fonroche et ECM Technologies ont su exporter avec succès. Néanmoins, en ce qui concerne la fabrication de cellules, les acteurs français, et européens plus généralement, ne pourront devenir compétitifs au niveau international qu'en produisant des volumes conséquents, permettant une réduction des coûts, à la manière de la stratégie adoptée par les États-Unis et la Chine.

Le bâtiment à zéro-émission représente une opportunité pour le photovoltaïque. Cette problématique, présente plus particulièrement en Europe et en Amérique du Nord, n'est pour le moment qu'un marché de niche. Il est néanmoins indispensable que les acteurs français soient prêts à accompagner la croissance de ce marché.

Les défis industriels et économiques à relever[4]

En 2014, comme les années précédentes, la majorité du marché mondial des modules était détenue par des fabricants basés en Asie[5]. Cinq d'entre eux ont fabriqué plus de 2 GW en 2013, dont trois ont dépassé les 3 GW fabriqués. En comparaison, les fabricants français présentent des capacités de production de l'ordre de 800 MW annuels.

En 2015, ne demeurent que trois producteurs de modules en silicium cristallin verticalement intégrés (du lingot au module) en Europe : Photowatt (France), Solarworld (Allemagne) et Solland Solar (Pays-Bas). Néanmoins les acteurs européens restent présents sur toute la chaîne de valeur du PV : des matériaux jusqu'aux systèmes en passant par les équipements de fabrication.

Une des principales forces des acteurs européens se situe sur les équipements de production de composants de modules (fours, ligne de fabrications, équipements de dépôts de couches minces sous vide, etc.) avec des acteurs majeurs principalement situés en Allemagne. Ce marché reste toutefois très dépendant de l'évolution des capacités de production. Par ailleurs l'automatisation des procédés de fabrication est un des leviers pour accroître la compétitivité des producteurs de modules européens.

Cependant, une montée en puissance des acteurs asiatiques sur fabrication des wafers, cellules, modules et composant BOS (« balance of system ») notamment, combinée à un marché européen en décroissance,

4 – Sources ADEME & MinEIE

5 – Les 10 principaux fabricants détiennent ainsi près de 60 % du marché en 2014.

risque de faire disparaître l'amont de la filière (équipement et matériaux) qui reste encore un point fort en Europe. On constate notamment des rachats opérés par les sociétés chinoises du secteur et des faillites successives des entreprises européennes. A contrario, apparaissent des réactions de quelques opérateurs énergéticiens de grande taille.

D'autre part, le développement de l'amont de la filière n'est que difficilement dissociable de son aval : installateurs (des sociétés de BTP et/ou de services), producteurs et gestionnaires de batteries, dispositifs de smart grids, réseaux. Par ailleurs, une offre de stockage utile pour le solaire pourrait voir le jour, bénéficiant des initiatives sur le stockage stationnaire et le développement du véhicule électrique.

La croissance de la capacité photovoltaïque mondiale installée, qui s'effectuera au sein des deux types de marchés actuels cités ci-dessus, est principalement influencée par les trois facteurs suivants :

- l'évolution du prix de marché de l'électricité (prix de gros et de détail selon l'application) comparée au coût du photovoltaïque, pour les zones où le photovoltaïque peut trouver une rentabilité économique sans soutien ;
- le maintien ou non des dispositifs de soutien, lequel dépend des évolutions comparées des coûts du photovoltaïque avec les prix de marché de l'électricité mais aussi des volontés politiques des États, pour les zones présentant actuellement des politiques de soutien ;
- Les innovations dans des secteurs soit connexes (batteries et autres dispositifs de stockage, smart grids, réseaux de transports de l'électricité) soit concurrents (autres énergies renouvelables) de nature à faire évoluer les coûts relatifs, et par là même, les parts de marché accessibles.

Par ailleurs, l'évolution du prix du CO_2 et des matières premières énergétiques, en particulier ceux du gaz et du charbon, qui ont une influence sur les prix de gros de l'électricité, ainsi que la volonté des États d'acquérir davantage d'indépendance énergétique, peuvent avoir un impact sur les scénarios de pénétration du solaire dans le mix énergétique mondial.

De même, les problématiques d'intégration au réseau peuvent contraindre la croissance du marché, limitant la pénétration du solaire dans le mix énergétique local à un niveau défini en complémentarité avec d'autres sources de production.

Enfin, l'évolution de la consommation énergétique et le renforcement des politiques de lutte contre le changement climatique sont autant de paramètres à prendre en compte pour pouvoir modéliser les perspectives de croissance de ce marché.

À titre d'exemple, une étude récente du cabinet Bloomberg New Energy Finance estime ce marché à 200 GW/an en 2040 (pour 50 GW/an en 2015), majoritairement développé en Asie-Pacifique, avec 40 % de nouvelles capacités dédiées aux usages résidentiels, et une part du solaire dans le mix européen estimée à un tiers. Les estimations de coûts complets de l'électricité (LCOE) à 2040 pour les centrales au sol atteignent 50 $/MWh en Chine, 60 $/MWh aux États-Unis et 80 €/MWh en Europe. Cette étude fait cependant l'objet de controverses d'experts, estimant que le prix européen pourrait être plus faible, en particulier si des stratégies de couplage avec des développements automobiles (comparable à celle menée par Elon Musk aux États Unis, et conduisant à des économies d'échelle sur les composants) était menée à l'échelle européenne.

Les enjeux réglementaires

Le secteur du photovoltaïque est fortement sensible aux changements du cadre tarifaire. Le moratoire instauré en mars 2011 avait mis un arrêt à une période d'emballement débutée en 2008. Deux dispositifs de régulation ont été mis en place : en-dessous de 100 kW, le développement est libre et la rémunération du kW est fixée par l'État ; au-dessus de 100 kW, le développement est ouvert à la compétition mais limité par les appels d'offres où le prix du kW est subventionné. L'adoption de la loi sur la transition énergétique et des objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie qui en découleront va offrir une meilleure visibilité aux projets menés sur le territoire national.

Analyse AFOM

ATOUTS

Bonne position dans l'amont photovoltaïque (équipements pour la fabrication de cellules)

Dynamique d'exportation

Compétences de recherche de haut niveau

FAIBLESSES

Industrie française encore insuffisamment compétitive sur un marché mondial ultra concurrentiel

Difficulté à faire émerger des « champions nationaux » ou européens

OPPORTUNITÉS

Bâtiment à zéro-émission : photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV)

Programmes d'investissements internationaux

Complémentarités avec le développement du stockage d'énergie (batteries pour véhicules électriques)

MENACES

Intensité capitalistique croissante

Risques de rupture d'approvisionnement pour certains éléments critiques

Facteurs clés de succès et recommandations

Dans ses recommandations relatives aux énergies renouvelables, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) encourage à aller vers plus de stabilité législative sur le long terme afin de favoriser les investissements conséquents de ce secteur intensif en capital. Le soutien des pouvoirs publics doit se faire de manière à favoriser une rémunération rentable tout en évitant les incitations économiques trop élevées.

Les appels d'offres de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) sur des projets de centrales photovoltaïques en France ont aidé la filière à se structurer et à gagner en compétitivité. Ce type de mécanisme, qui a permis d'augmenter la capacité des entreprises française à s'exporter, peut indirectement contribuer au développement à l'international.

Enfin, seul un investissement conséquent permettant d'obtenir des économies d'échelle grâce à un volume de production de modules suffisant permettra à la filière de gagner en compétitivité. Ce type d'investissement, de l'ordre de 2 milliards pour une usine de 1 GW de production annuelle, pourrait être réalisé dans le cadre d'un consortium européen afin de pouvoir en mutualiser les coûts.

Acteurs clés :

Entreprises	AirLiquide, Akuo Energy, Aloe Energy, Apex Energies, Arkema, Clipsol, CNR, DualSun, ECM Technologies, EDF, EDF ENR PWT, Eiffage-Clemessy, Electropôle - Schneider Electric, EliFrance, Emasolar, Emix, Exosun, Fonroche Energie, FranceWatts, Horiba Jobin Yvon, Krinner, Mersen, Neonen, Optimum Tracker, Saint Gobain – Cree, Saint Gobain Glass – Crdc, SCNAsolar, SEMCO Engineering, Silia VL, Soloréa, S'Tile, Sunpartner, Sun'R, Systovi, Total – Sunpower, Voltec Solar…
IRT, ITE, IHU	Supergrid…
Instituts Carnot	Energies du Futur…
Autres centres de recherches	Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux, Institut national de l'énergie solaire, Génie Electrique et Electronique de Paris, Institut de Physique et de Chimie de Strasbourg, Institut Photovoltaïque d'Île-de-France, Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque, Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Minces…
Pôles de compétitivité	Capenergies, Derbi, Fibre Energivie, Tenerrdis…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Eco-habitat, Sysolia…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

43 Énergies éoliennes

Loisirs & culture
ÉNERGIE, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Énergie renouvelable ; éolien onshore ; éolien offshore posé ; éolien offshore flottant ; turbine

Définition et périmètre

Les éoliennes concernent tous les systèmes utilisant la force motrice du vent en la collectant à travers des pales pour être convertie en électricité. On distingue trois systèmes principalement :

- Les éoliennes terrestres (onshore) qui sont installées sur terre ;
- Les éoliennes offshore posées sur le fond marin, qui reposent sur un amarrage gravitaire, une pile simple, double, par structure entretoisée (« jacket ») ou encore sur un tripode, jusqu'à 40 m de profondeur ;
- Les éoliennes offshore flottantes, qui s'ancrent au fond marin au moyen de plusieurs systèmes : flotteur colonne à grand tirant d'eau (« spar »), flotteur semi-submergé et support à lignes tendues pour des installations loin des côtes à des profondeurs plus élevées (30 à au moins 300 m).

Les éoliennes délivrant moins de 100 kW, appelé petites éoliennes, ne sont pas traitées dans cette fiche.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Dans le cadre de sa politique de transition énergétique à horizon 2020 et 2030, la France doit développer les énergies renouvelables. L'éolien apparaît comme indispensable pour remplir ses objectifs. Grâce à son littoral, elle possède un potentiel important pour le développement de l'éolien offshore (sous réserve des coûts d'exploitation). Son marché national reste moins développé que celui de certains autres pays européens ayant des caractéristiques différentes de leur mix énergétique. Le développement de technologies, notamment pour l'éolien flottant, (intéressant pour les littoraux plus profonds qu'au Nord de l'UE, notamment en Méditerranée) devrait lui permettre de renforcer son positionnement, avec un fort potentiel à l'export.

Puissance installée en éoliennes, en 2013 et en MW, en France ainsi que les futurs parcs éoliens marins
(source : Thewinpower / infographie Le Monde, 2014)

Au niveau international, de nombreux pays dans le monde développent ou envisagent l'adoption des éoliennes comme moyen de production énergétique afin d'augmenter la part d'énergies renouvelables dans leur mix énergétique. Dans son scénario 2DS, visant à limiter le réchauffement climatique mondial en dessous de 2°C à horizon 2050, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) fait jouer un rôle croissant à l'énergie éolienne. Au niveau européen, le graphique ci-dessous montre la part relative de l'éolien (bleu clair). Le programme H2020 énergie consacre des moyens significatifs à l'amélioration de ces techniques.

Énergies produites en Europe par les pays de l'Union européenne en 2012

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les énergies éoliennes sont :	
1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération

Les technologies influencées par les énergies éoliennes sont :	
22	Réseaux électriques intelligents

Les marchés

Les investissements globaux du secteur de l'éolien dans le monde en 2013 se sont élevés à 59,2 milliards d'euros. La capacité mondiale installée et reliée à un réseau, au cours de cette même année, a été de 35 289 MW dont 16 088 MW pour la Chine (45,6 %), 12 031 MW pour l'Europe (34,1 %), et 1 084 MW pour les États-Unis (3,1 %). Depuis 2009, le plus grand marché pour l'éolien est la Chine[1]. Le GWEC s'attend à ce que le marché global de l'éolien dans le monde ait un taux de croissance annuel entre 6 % et 10 % sur la période 2015-2018. En 2013, la France a installé pour 631 MW de capacité d'éolien ; les principaux fournisseurs d'équipements de son marché, classés par puissance installée, ont été Vestas (39 %), Repower (21 %), Enercon (19 %), Gamesa (9 %), Nordex (9 %) et Siemens (3 %)[2]. Le gouvernement français avait fixé un objectif de 25 GW installé d'énergie éolienne, dont 6 GW d'éolien offshore et 19 GW pour l'éolien terrestre en vue de remplir son objectif de 23 % de production d'énergie à partir de sources renouvelables en

1 – Source : Global Wind Energy Council (GWEC).

2 – Source : France Énergie Eolienne.

2020. La contribution directe du secteur éolien (terrestre et en mer confondus) au PIB de l'Union Européenne était de 17,6 milliards d'euros en 2010 pour 154 150 emplois.

Principaux fournisseurs d'équipements du marché français en 2013, classés par puissance installée

L'éolien terrestre Le parc français a représenté 3,7 % de la consommation d'électricité produite en France en 2014. Le nombre d'éoliennes raccordées au réseau a augmenté pour la première fois en quatre ans. La puissance installée en France métropolitaine a été de 963 MW selon le Syndicat des Energies Renouvelables (SER), soit 12 % de plus qu'en 2013. L'objectif pour 2020 sera révisé dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie – PPE, en fonction des évolutions majeures intervenues dans les prix de l'énergie en 2014 et 2015).

L'éolien offshore posé 90 % des installations se situent dans les eaux européennes, dont 80 % pour seulement 3 pays : Danemark, Pays-Bas, et Grande-Bretagne. Jusqu'en 2010 et l'installation d'une ferme en Chine, le marché était à 100 % européen. Au niveau mondial en 2013 pour l'éolien offshore, les fournisseurs leaders sur chaque marché du secteur de l'éolien étaient : Siemens pour les turbines (69 %), DONG Energy pour le développement (48 %) et Bladt pour les sous-structures (37 %)[3]. L'investissement global en Europe pour l'éolien offshore a fortement augmenté en 10 ans. De 0,25 milliard, il est passé de 4,6 à 6,4 milliard d'euros en 2013[4]. La France, afin de remplir son objectif (en cours de révision dans le cadre de la PPE) d'installer 6 GW d'éolien offshore, avait lancé un 1er appel à projet (clôturé en avril 2012) pour la construction de fermes dans la Manche. La part de l'investissement de l'État français porte sur 7 milliards d'euros et il en est attendu de créer 10 000 emplois d'ici à 2018. Il a été remporté par le consortium EDF Energies Nouvelles/Dong Energy Power/Alstom pour trois des cinq zones. Une 4e zone a été attribuée au consortium Iberdrola/EoleRes/Areva tandis que la 5e zone n'a pas été attribuée. En janvier 2013, un second appel à projets a été remporté par Engie, pour deux sites. La capacité totale ainsi attribuée par ces appels d'offre est de 2,9 GW. Le montant total de ces deux appels devrait s'élever à environ 30 Md € et devrait permettre la création d'environ 10 000 emplois directs (l'impact indirect via les coûts de l'énergie n'est pas chiffré). Les régions littorales sont en train d'identifier les zones qui seront soumises à la compétition pour le troisième appel d'offres éolien offshore[5].

L'éolien offshore flottant La France ambitionne de faire partie des leaders de ce secteur émergent. Plusieurs groupes sont impliqués, comme DCNS et EDF, ainsi que des start-ups innovantes comme Ideol et Nénuphar. Dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir (PIA), l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME) a lancé en 2013 un Appel à Manifestations d'Intérêt (AMI) « Énergies marines renouvelables : briques et démonstrateurs », ouvert jusqu'au 2 octobre 2015 : les projets sélectionnés permettront de tester la fiabilité et les performances de trois technologies innovantes, dont l'éolien flottant. Dans ce domaine, un appel à projets « Fermes pilotes », doté de 150 M€, devrait être lancé par l'ADEME.

Entre la fabrication et l'installation des équipements puis la vente de l'énergie, l'éolien a concerné en France 3 730 emplois directs en 2014 selon l'ADEME[6]. Si la fabrication et l'installation avaient connu une baisse du nombre d'emplois générés jusqu'à l'année 2013, la vente d'énergie éolienne connait une croissance ininterrompue. Selon l'édition 2014 du baromètre d'EurObserv'ER, 20 000 emplois en France ont été concernés en 2013 directement ou indirectement par le secteur de l'éolien. Ce chiffre est constant depuis 3 ans.

3 – Source : GWEC.

4 – Source : European Wind Energy Association (EWEA).

5 – Source : Greenunivers – Rapport CleanTech, 2015.

6 – Source : ADEME – Stratégie & études – n°43, 2015.

Les défis technologiques à relever

Gestion de l'intermittence La compensation des fluctuations d'énergie produites par les éoliennes est un enjeu majeur pour leur développement futur. Afin de faciliter l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques, il importe de lisser le courant en provenance des éoliennes. Le développement de technologies de stockage adaptées aux conditions spécifiques de la production de ce type d'énergie est indispensable pour le développement de la filière.

Indépendance vis-à-vis de métaux critiques. Les aimants permanents permettent de limiter le surpoids de la génératrice et d'obtenir les meilleurs rendements de conversion de l'énergie mécanique en électricité. Néanmoins, la quantité de néodyme (Nd), élément de la famille des terres rares, nécessaire par MW installé est comprise entre 400 kg[7] et 700 kg[8]. Les exploitations de terres rares se situent très majoritairement en Chine et leur prix a connu une très forte augmentation en 2011 lorsque la Chine a instauré des quotas sur leurs exportations, puis, a décru alors que des pressions internationales se sont fait jour pour influer sur cette stratégie, et que d'autres sources étaient simultanément développées hors de Chine. Technologiquement, des solutions existent ou sont en développement pour diminuer voire arrêter l'utilisation d'aimants permanents. Le mode d'entraînement du rotor en est un paramètre déterminant. En effet un entraînement direct nécessite un générateur plus gros et c'est pour limiter sa taille que des aimants permanents sont utilisés. Une alternative est le système hybride qui utilise un seul palier de multiplication. Cette technologie, alliant aimants bobinés et aimants permanents permet un rendement similaire à celui rencontré avec un générateur à aimants 100 % permanents. La plupart des constructeurs d'éoliennes terrestres, ainsi que certains fabricants offshore comme Vestas utilisent une boîte de vitesse classique pour éviter le recours aux aimants permanents.

Furtivité On parle ici de furtivité électromagnétique et aérodynamique. On estime de 3 000 à 4 000 MW le nombre de sites français propices à une installation d'éoliennes qui seraient actuellement difficilement exploitables du fait des perturbations générées sur les radars par le mouvement des pales. En effet, les surfaces équivalentes radars (SER) présentées par les aérogénérateurs sont importantes et variables dans le temps. Ajoutés aux mouvements de leurs pales, ces paramètres sont pénalisants pour le traitement des données radars. L'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) recommande des zones de coordination comprises entre 5 et 30 km suivant les cas *(Circulaire du 3 mars 2008 sur les perturbations par les aérogénérateurs du fonctionnement des radars fixes)*. Les radars concernés peuvent être ceux de l'Aviation civile, de la Défense nationale, de Météo-France et des ports et navigation maritime et fluviale (PNM). Le développement de technologies permettant de réfléchir au minimum les ondes électromagnétiques des radars permettrait d'accéder à de nombreux gisements. Une solution consiste à recouvrir les pales par des matériaux absorbant les ondes électromagnétiques. Un problème est de contenir le surpoids induit qui est de 2 à 3 %.

L'amélioration de leur furtivité aérodynamique permettrait de diminuer leur impact sonore tout en augmentant les performances de l'éolienne. En effet, le bruit généré par les installations fait partie des motifs d'opposition locale aux éoliennes les plus fréquents.

Construction d'équipements plus grands Des constructions plus grandes permettent d'augmenter la production d'électricité mais aussi d'investir des zones où les vents sont trop faibles pour les petites installations. En effet, les zones les plus venteuses ont été investies en premier. Pour augmenter la capacité de production, il est nécessaire d'investir les zones initialement délaissées (par exemple, celles avec des vents de classe 3, soit 7,5 mètres par seconde sur l'année) car jugées non rentables. Des éoliennes ayant des diamètres de 150 m sont actuellement développées pour aller dans ce sens.

Matériaux composites Les éoliennes ont besoin de pales légères, résistantes ainsi que flexibles. La légèreté leur permet de démarrer plus rapidement et de fonctionner même par vent faible. Un des enjeux est de ne pas alourdir l'ensemble afin de ne pas créer un surcoût à la construction. Un allègement de quelques pourcents sur les pales a des répercussions positives sur toute la structure : moins d'efforts sur les parties fixes, structures porteuses plus faiblement dimensionnées, etc. Néanmoins, cette réduction de poids ne peut se faire au détriment de la résistance mécanique

7 – Source : Report from the Rare Earths conference Beijing, Jack Lifton, 2010.

8 – Source : Report for Department for Transport and Department for Business, Hüdai Kara, 2010.

et ce quelles que soient les conditions. En effet, les matériaux doivent pouvoir supporter de basses températures et la formation de givre (problème récurrent pour certains pays de l'Europe du Nord mais aussi pour certaines régions françaises). Enfin, les matériaux doivent avoir une durée de vie en adéquation avec celle des turbines qui sont conçues pour fonctionner durant 25 ans (20 ans auparavant).

Capteurs Le développement de capteurs pour la surveillance à distance des installations doit permettre la réduction des coûts de maintenance et d'exploitation des éoliennes.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Contrairement aux acteurs allemands ou danois, les acteurs français ne sont pas leaders sur leur marché national. Toutefois, ils ont beaucoup bénéficié des appels à projets, en offshore par exemple.

Le développement de la filière passera par l'exportation. Par exemple, le principal marché d'Alstom est au Brésil, avec 3 GW installés ou en cours de construction fin 2014. Dernièrement il a signé son premier contrat auprès de Deepwater Wind pour fournir cinq turbines. Areva a gagné l'appel d'offre pour le parc allemand de Wikinger.

La stratégie d'alliance a permis au secteur français de se développer : ainsi Areva s'est allié à l'espagnol Gamesa pour viser 20 % du marché européen.

L'éolien flottant doit encore convaincre qu'il peut être une solution d'avenir. Alstom et DCNS se sont alliés pour développer et commercialiser un système semi-submersible de 6 MW. La start-up Nénuphar développe son concept d'éolienne à axe vertical et participe à plusieurs projets européens impliquant EDF EN et Areva. L'entreprise EOLFI développe également des solutions.

Enfin la question de l'acceptabilité des éoliennes du point de vue esthétique est un frein à leur diffusion. À l'instar de ce qui s'est produit avec l'éolien terrestre, les projets d'éoliennes en mer peuvent rencontrer de fortes oppositions locales (marins pêcheurs, riverains, professionnels du tourisme, etc.), se traduisant parfois par des recours en justice.

Les enjeux réglementaires

Le secteur de l'éolien est fortement sensible au changement de réglementation tarifaire et d'implantation. Par le passé, les changements réglementaires ont fortement affecté le développement de la filière, freinant les investissements. A l'heure actuelle, celle-ci reste dans l'attente des objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie qui découleront de la loi de transition énergétique pour la croissance verte.

La réglementation concernant les zones de coordination pour les radars est un enjeu important pour l'installation de nouveaux sites.

La loi Brottes, adoptée en avril 2013, supprime les zones de développement éolien (ZDE). Auparavant, seules les éoliennes installées dans ces zones pouvaient bénéficier de l'obligation d'achat de leur production d'électricité. Ce sont maintenant les schémas régionaux éoliens qui orientent les implantations éoliennes en tenant compte des zones du territoire favorables au développement de l'énergie éolienne. Les installations de moins de cinq mâts peuvent à présent bénéficier du tarif d'achat.

Un nouvel arrêt tarifaire a été publié au journal officiel le 1er juillet 2014 permettant de sécuriser le tarif d'achat.

Analyse AFOM

ATOUTS

Gisement éolien offshore significatif.

En pointe sur le développement de l'éolien offshore flottant.

Présence de grands groupes dans les activités prépondérantes de la filière : construction des fondations, raccordements au réseau électrique, installation, exploitation et maintenance.

FAIBLESSES

Filière qui s'est structurée plus tardivement que dans d'autres pays européens.

Complexité administrative des projets développés sur le territoire national.

OPPORTUNITÉS

Appels d'offres nationaux et internationaux, motivés par les engagements en matière de production d'électricité d'origine renouvelable.

Gains de compétitivité du kWh électrique d'origine éolienne.

MENACES

Intensité concurrentielle forte, en particulier au niveau européen, mais également chinois.

Conflits d'usage sur les zones d'implantation.

Facteurs clés de succès et recommandations

Le publication d'appels d'offres par l'État pour de nouvelles capacités de production d'énergie renouvelable, dont l'éolien offshore, a permis de développer et structurer la filière.

Il apparaît tout d'abord essentiel de renforcer l'offre française sur l'ensemble de la chaîne de valeur, notamment sur les composants. Les principaux besoins de développements technologiques concernent l'éolien offshore flottant, lequel ne peut bénéficier que de transferts très limités de technologies issues de la filière de l'éolien terrestre. En revanche, l'expérience acquise dans le cadre du développement de cette dernière a montré la nécessité d'outils de concertation avec les parties prenantes de chaque projet afin de prendre en compte les différents aspects relatifs aux dimensions sociales.

Acteurs clés :

Entreprises	Akuo Energy, Alstom Hydro Power, Areva, BeAM, Boralex, DCNS, EDF, Eole-RES, Eolfi, Fouré Lagadec, FrancEole, Ideol, Leroy Somer, Nass & Wind, Nenuphar Wind, Neonen, Nexans, Plastinov, Quadran, Rollix, Saipem, STX, Vergnet, Vinci Energies, Voltalia…
IRT, ITE, IHU	IRT Jules Verne, FEM, Supergrid …
Instituts Carnot	ESP…
Autres centres de recherches	IFPEN, IFREMER…
Pôles de compétitivité	Capenergies, Pôle Mer Bretagne Atlantique, Pôle Mer Méditerranée…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

44 Technologies pour l'énergie nucléaire

Loisirs & culture
ÉNERGIE, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Nucléaire ; exploitation et maintenance ; démantèlement.

Définition et périmètre

Les technologies pour l'énergie nucléaire concernent l'ensemble des outils destinés à la conception, la construction et la mise en service, la maintenance, l'assainissement, le démantèlement et le réaménagement des installations (centrales nucléaires, réacteurs de recherche, usine de retraitement et d'enrichissement, etc.). Elles relèvent de domaines variés : simulation numérique, robotique, instrumentation, techniques de décontamination, etc.

On peut citer les grandes familles suivantes :

Modélisation & simulation numérique Elle consiste en la représentation virtuelle des systèmes nucléaires (réacteur et cycle) afin de fournir un outil aux industriels et à la recherche pour explorer des domaines difficilement accessibles, comme le comportement des installations nucléaires en situation accidentelle, comprendre des phénomènes physiques et confronter ces modèles avec l'expérience, et optimiser les coûts et les durées de conception. Elle utilise des logiciels où sont retranscrits des modèles théoriques ou phénoménologiques sur le comportement des éléments du système. En raison du caractère multi-physique du comportement des réacteurs, ces logiciels peuvent être couplés afin de couvrir différents aspects : conception, exploitation et études de sûreté.

Ce n'est pas une des grandes familles technologiques du nucléaire, et les technologies correspondantes ne s'appliquent qu'au démantèlement.

Il s'agit d'un enjeu de 2ème ordre.

Conditionnement des déchets et stockage : Le conditionnement des déchets dépend des étapes de segmentation et de décontamination. Les déchets nucléaires sont conditionnés dans une matrice possédant plusieurs barrières ayant pour objet de les isoler et ainsi que de bloquer la migration des radionucléides dans l'environnement. Ces matrices, principalement en verre et ciment, sont spécifiques pour le nucléaire car leur durée de vie doit être au minimum de l'ordre du millénaire. Pour les déchets de haute activité issus du traitement des combustibles usés, les matrices vitreuses sont utilisées.

Instrumentation et composants : L'instrumentation pour le nucléaire regroupe des applications et des technologies multiples permettant d'obtenir des informations de natures variées (imagerie, composition de la matière, etc.) : capteurs de neutrons, fibres optiques durcies, contrôle non destructif (CND), capteurs à ultrasons, etc. Parmi les technologies CND, on peut citer la Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), une technique d'analyse purement optique permettant des mesures multi-élémentaires simultanées, à distance, et sur tous types de matériaux (solides, liquides, gazeux, etc.). Elle est adaptée à l'analyse en conditions extrêmes, par exemple à distance de matériaux portés à très haute température, ou encore de certains matériaux radioactifs.

Les technologies de réacteur dites de 4e génération, (réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium -filière de référence- et réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz -option à plus long terme- dans les deux types considérés par la France sur les 6 types internationaux retenus par le forum génération IV) étant donné leur horizon temporel éloigné, n'entrent pas dans le périmètre des Technologies-Clés 2020.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La mise en œuvre des EPR, l'entretien des installations nucléaires de base (INB), combiné à la fin de vie de certaines d'entre elles, requièrent la maitrise de nombreuses technologies. Les nécessités de l'environnement nucléaire impliquent des compétences et un niveau de maîtrise spécifiques.

Les travaux qui seront lancés à l'occasion du Grand Carénage et les opérations de démantèlement et de réaménagement des sites nucléaires (centrales, réacteurs de recherche, installations du cycle du combustible) et sont autant d'opportunités pour la filière nucléaire française, qui a constitué un savoir-faire spécifique grâce aux premiers chantiers engagés sur le territoire national.

Au-delà des enjeux en termes d'activité et d'emplois pour la filière, (en cours de réorganisation en 2015) les opérations de rénovation et de modification sur le parc de centrales en exploitation permettront de rapprocher aussi raisonnablement que possible le niveau de sûreté des réacteurs existants de celui des réacteurs de génération 3 (EPR).

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies générales clés qui influencent les technologies pour l'énergie nucléaire sont :

- les capteurs,
- la modélisation, simulation et ingénierie numérique,
- les technologies d'information et de communication.

Les marchés et l'emploi

La filière industrielle nucléaire, qui rassemble 2 500 entreprises employant près de 220 000 salariés (emplois directs et indirects) particulièrement qualifiés, génère en France un chiffre d'affaires de 46 Md€ dont 14 Md€ de valeur ajoutée. La filière consacre 1,8 Md€ à des activités de R&D, ce qui la place en 4e position des industries les plus innovantes[1].

Le démantèlement des réacteurs Magnox n'est pas spécialement avancé. Par ailleurs, les chiffres avancés recouvrent l'intégralité du budget de la NDA, ne concernent pas uniquement le démantèlement des installations et surtout ne représentent un volume de chiffre d'affaires accessible pour des entreprises françaises.

À l'international, l'impact de l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi (Japon) a eu deux effets sur le secteur nucléaire. Le premier, systémique, fut le renforcement des normes de sûreté sur les centrales dans de nombreux pays, dont la France. Le second, plus localisé, est apparu en Allemagne, qui a décidé au lendemain de cette catastrophe d'anticiper la mise à l'arrêt de son parc de réacteurs. On peut également citer la Suisse ou la Belgique, qui prévoient une sortie du nucléaire à l'occasion de la fin de vie des réacteurs existants.

En France, la perspective de prolongement de l'exploitation de tout ou partie du parc existant génère un marché estimé à plusieurs dizaines de milliards d'euros d'ici à 2025 pour la seule partie allouée au « grand carénage » des centrales. Ce programme consiste en la rénovation, le remplacement de matériels, l'intégration des mesures post-Fukushima et l'amélioration du niveau de sûreté des centrales. Cela implique le remplacement de certains équipements de grande taille : générateurs de vapeur, turbines, transformateurs, échangeurs, etc. Les petits équipements sont également concernés, tels que des capteurs qui devront être remplacés. Le total des dépenses d'EDF dans la maintenance et l'optimisation du parc nucléaire a atteint 3 milliards d'euros en 2014.

Dans le cadre des travaux de maintenance et de rénovation du parc actuel (« Grand carénage »), ce niveau d'investissement est appelé à connaître une pente ascendante dans les prochaines années, pour atteindre un plateau à 5 Mds d'euros par an et revenir ensuite à un niveau de 3 milliards par an à partir de 2025.

S'agissant du démantèlement des installations nucléaire, c'est à ce jour dans le monde un total de 100 mines, 110 réacteurs civils commerciaux, 46 réacteurs prototypes ou expérimentaux, 250 réacteurs de recherche qui ont été arrêtés. Concernant ces derniers, seulement 50 ont été démantelés. Le coût pour le démantèlement peut être très différent d'une installation à une autre.

En France, sur les 43 installations que le CEA exploite, 22 sont aujourd'hui en cours de démantèlement[2]. Le CEA consacrera dans les années à venir environ 700 millions d'euros par an pour ses programmes d'assainissement/démantèlement, d'exploitation et de gestion des déchets ; 80 à 90 % de ces budgets bénéficieront à l'industrie française.

Les défis technologiques à relever

Modélisation & simulation numérique pour le nucléaire : Elle permet de valider un scénario, que ce soit au niveau de la conception d'un nouveau réacteur, de son contrôle/commande, ou bien de la préparation des opérations d'assainissement et de démantèlement. Par exemple, son utilisation pour entraîner ou former les opérateurs sur une intervention sera particulièrement adaptée pour les futurs chantiers.

Instrumentation :

- La caractérisation isotopique de la matière avec des capteurs intelligents et distribués (Spectrométries gamma et alpha) est nécessaire pour : (1) réaliser un

1 – Source : comité stratégique de la filière nucléaire, 2014 http://www.entreprises.gouv.fr/conseil-national-industrie/la-filiere-nucleaire

2 – Source : CEA, juin 2014.

© OREKA Solutions

concept évolué ALARA du démantèlement (cartographie en temps réel et identifications des points chaud), (2) caractériser les différents colis de stockages pendant leur réalisation et mouvements (activité spécifique et totale pour établir la catégorie spécifique des déchets), (3) assurer la qualité des procédés des usines de fabrication du combustible, (4) le retraitement du combustible nucléaire (U-Pu % dans différents phases) et (5) pour la caractérisation et optimisation de l'exploitation sans avoir besoin de mesure reporté en laboratoire. Le même concept est applicable aux réacteurs nucléaires pour la mesure du « burn-up » et les chaînes des mesures radiologiques ; à la caractérisation du combustible usé ; à l'exploration minière pour l'identification de l'uranium dans des gisements à faible teneur.

■ **Caméras spécifiques** La quantification et la visualisation des points chauds émettant des rayons gammas dans des zones inaccessibles est un élément important pour planifier des opérations de démantèlement. La conception de caméras sensibles à ce type de rayonnement est nécessaire.

■ **Contrôle non destructif et à distance** L'analyse élémentaire des matériaux et à distance permet de connaître directement sur le site leur nature et d'opérer en conséquence. Le LIBS est, par exemple, une technique de choix pour cette opération. Son coût doit être réduit (en particulier pour le capteur) de manière à pouvoir généraliser son utilisation.

■ **Capteurs à ultrasons** Les capteurs à ultrasons permettent de sonder le comportement de la matière dans des zones des installations non accessibles au contrôle visuel ou plus généralement par des technologies reposant sur l'électromagnétisme. Ces capteurs peuvent être ainsi directement installés dans des conditions de haute température. Ils peuvent fonctionner en mode actif (par écho) ou passif.

■ **Fibres optiques renforcées pour l'imagerie** Les fibres optiques renforcées permettent une visualisation de zones où la radioactivité est trop élevée pour les appareils électroniques.

Matériaux et leur mise en forme : Les nouveaux matériaux doivent démontrer leur apport performance/coût et leur tenue à long terme dans des milieux extrêmes (acidité, température, rayonnement). Également, l'intégration de nouvelles méthodes de fabrication et de traitement de surfaces aux chaînes industrielles existantes restent à développer.

Technologies de l'environnement : Les composés chimiques et biologiques pour la décontamination ont pour rôle de capturer les radioéléments afin de pouvoir les traiter comme des effluents. Le développement de nouvelles technologies permettant le traitement de zones difficiles d'accès à bas coût est un enjeu majeur. Des composés chimiques et biologiques plus performants doivent être développés afin d'extraire des effluents la matière contaminée (faible et moyenne activité) qui sera ensuite enrobée dans un matériau qui garantit le stockage pour le temps déterminé.

Robotique pour le démantèlement : Afin d'intervenir sur des lieux contaminés sans exposer l'intervenant ou bien pour faciliter des tâches complexes tout en le protégeant, le développement d'équipements robotisés est nécessaire. Il peut s'agir de robots pour la reconnaissance équipés d'instrumentation pour la mesure (cameras, spectromètres, etc.) ou de bras robotisés pour la télé-opération équipés de moyens de segmentation (laser immergé ou à l'air par exemple).

À l'exception de la simulation numérique pour le nucléaire, les technologies doivent pouvoir évoluer dans un environnement radioactif ; le blindage des composants (électroniques en particulier) doit être développé en fonction du niveau d'exposition à la radioactivité.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

La maintenance et le démantèlement des installations nucléaires sont souvent réalisés par des acteurs implantés localement. S'agissant du démantèlement, c'est un marché à faible valeur ajoutée, où la pression concurrentielle est forte avec un primat donné à la maîtrise des coûts.

Il existe par ailleurs de fortes disparités selon les sites et les opérations : à l'exception des installations industrielles telles que les réacteurs d'EDF (homogènes dans leur conception), la présence de matière radioactive est localisée de manière différente suivant les installations et non pas suivant leur type. Il est par conséquence impossible de proposer des solutions complètement génériques, sur étagère, pour les moyens de démantèlement et de bénéficier ainsi d'économies d'échelle. Dans le détail, dans un réacteur nucléaire, la radioactivité est majoritairement contenue dans les structures proches du cœur soumises à l'activation neutronique ; dans une usine de retraitement de combustible nucléaire ou dans une station de traitement des effluents et des déchets, elle est située dans une multitude de zones telles que les tuyauteries, les cuves, etc. ; dans un laboratoire de recherche, elle est confinée dans des structures étanches (« cellules blindées » ou « boîtes à gants ») qu'il est nécessaire de désassembler puis d'assainir.

Les différences de conception sont également présentes d'un pays à l'autre et exigent un effort d'ingénierie spécifique pour l'exportation d'éléments tels que générateurs de vapeur, pompes primaires et composants des circuits, tant dans la partie nucléaire que dans la partie classique énergie.

Les enjeux réglementaires

Les réglementations sur la gestion du nucléaire ainsi que les autorisations pour opérer sont spécifiques à chaque pays et dépendent d'une ou plusieurs organisations de contrôle. Des qualifications délivrées par les gestionnaires des sites nucléaires sont nécessaires. Par exemple, la Commission d'Acceptation des Entreprises d'Assainissement Radioactif (CAEAR) du CEA est compétente pour les chantiers des sites du CEA et d'AREVA.

Chaque pays a mis en place une organisation qui lui est propre. Ainsi, au Royaume-Uni, pour le démantèlement, la NDA (National Decommissioning Agency) est propriétaire des sites à démanteler. Elle sous-traite ces activités à des entreprises d'exploitation des sites nucléaires, les « Site Licence Companies », qui ont notamment en charge le démantèlement..

Analyse AFOM

ATOUTS

Maître technologique de la filière française

Capacité de R&D

Outil industriel renouvelé

Retour d'expérience du démantèlement en cours de 21 INB civiles

FAIBLESSES

Financements export peu compétitifs

Difficultés d'un petit nombre de projets de nouvelles constructions

Absence de marché domestique de construction de nouveaux réacteurs

Faible maturité industrielle du secteur du démantèlement (absence de standardisation des procédés, complexité réglementaire)

Dépendance encore forte des sous-traitants vis-à-vis des grands donneurs d'ordre français

OPPORTUNITÉS

Poursuite de programmes en croissance (Chine…) où la France est partie prenante

Augmentation de la durée d'exploitation des réacteurs en service

Amélioration de la sûreté du parc actuel

Optimisation de l'EPR

Chantiers de démantèlement programmés dans le monde, dans la limite des marchés accessibles

MENACES

Difficultés à exporter « en l'état » les technologies d'un pays à l'autre du fait notamment des contraintes réglementaires conditionnant l'accès aux marchés nationaux et/ou les coûts.

Difficultés à réaliser des économies d'échelle pour la nouvelle génération de réacteurs (standardisation).

Niveau de subventionnement d'énergies concurrentes.

S'agissant du démantèlement, concurrence d'acteurs implantés localement

Facteurs clés de succès et recommandations

S'agissant de la composante technologique des facteurs clés de succès, les nombreuses exigences liées aux réglementations et à la sûreté auxquelles sont soumis les acteurs de la filière, alliées à la complexité technologique intrinsèque à chaque installation, obligent les acteurs du nucléaire à maintenir une activité de recherche et développement (R&D) ciblée pour optimiser les outils et les procédés. La R&D est ainsi un enjeu majeur pour la filière et doit par conséquence pouvoir bénéficier d'un soutien pérenne.

La standardisation au niveau européen mais également au niveau international pourrait permettre de faciliter l'exportation du savoir-faire français, en particulier celui développé par les PME et ETI en sous-traitance. Plus généralement, l'accès aux marchés internationaux doit être facilité et soutenu par les pouvoirs publics.

Acteurs clés :

Entreprises	ADF, Alstom Hydro Power, Areva, Assystem, Asteralis, CMR Group – France, Derichebourg, EDF, IVEA - Solution, NUVIA Process, Oreka Solutions, Séché Energie, SPIE…
Centres techniques	CETIM (également Institut Carnot)…
Instituts Carnot	M.I.N.E.S., CEA LIST…
Autres centres de recherches	CEA Cadarache, CEA Fontenay-aux-roses, CEA Marcoule, Institut de Chimie Séparative de Marcoule, Institut de Physique Nucléaire…
Pôles de compétitivité	Pôle Nucléaire de Bourgogne…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

45 Technologies pour la propulsion

Loisirs & culture
Énergie, **MOBILITÉ**, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Moteurs thermiques, mécatronique, systèmes de conversion, électronique de puissance, véhicule électrique, turboréacteurs, GaN

Définition et périmètre

Cette fiche concerne les technologies qui servent l'ensemble des systèmes et composants participant à la propulsion des moyens de transport. Elles reposent sur des principes de conversion d'énergie (chimique, thermique, électrique vers mécanique, et inversement).

Dans le secteur automobile : les principales perspectives à horizon 2020 sont le développement de véhicules 2 litres aux 100 km et l'électrification des véhicules, pour répondre aux enjeux de réduction de consommation et d'émission de polluants et de gaz à effet de serre via :

- L'hybridation des véhicules : électrification ou intégration de systèmes électromécaniques ou oléopneumatiques (Bosch). Pour l'hybridation électrique des véhicules, deux niveaux sont à distinguer :
  - Les hybridations douces à base d'alterno-démarreurs (*stop-and-start*, récupération d'énergie, boost) ;
  - Les hybridations complètes offrant une autonomie en mode électrique avec ou sans recharge par le réseau (hybride rechargeable ;
- La récupération et le stockage d'énergie : par exemple, récupération de la chaleur fatale par des générateurs thermoélectriques[1]. Des axes de progrès concernent également les batteries en vue de réduire leurs coûts et augmenter leurs capacités (cf. technologie clé Batteries électrochimiques de nouvelle génération) ;
- L'optimisation d'organes véhicules classiques : les moteurs et échappements thermiques offrent toujours des perspectives d'évolution notables par un *downsizing* des motorisations. Des améliorations seront apportées sur la gestion thermique des moteurs et échappements pour augmenter le rendement moteur et intégrer de nouvelles fonctions ;
- L'amélioration de l'électronique de puissance : la montée en puissance du contrôle électronique (calculateurs haute performance, algorithmes de contrôle intégrant de plus en plus de modèles physiques, capteurs virtuels, etc.) améliorera les performances des groupes motopropulseurs ;
- L'optimisation continue des coûts : l'ensemble de ces améliorations doit se faire dans une logique de maîtrise des coûts. L'utilisation de matériaux alternatifs constitue un sujet clé pour l'industrie automobile : la question de l'approvisionnement en matériaux (terres rares, cuivre, aluminium…) est un enjeu stratégique pour la filière, du point de vue du coût et de la sécurité d'approvisionnement. Le nitrure de gallium, pour des électroniques de puissance très performantes, constitue une réponse à cette problématique.

Dans le secteur aéronautique, les perspectives concernent la réduction de consommation et du bruit généré par les aéronefs via :

- L'optimisation de l'intégration entre le système propulsif et le système avion pour réduire la traînée, la masse et le bruit. À la base du bruit émis par l'ensemble propulsif se trouvent plusieurs sources de bruits liées aux composants du moteur (soufflante, turbines, chambre de combustion) ainsi qu'au bruit de jet (résultant du mélange des gaz chaud éjectés à haute vitesse avec l'atmosphère) ;
- La réalisation de travaux sur de nouveaux concepts de nacelles destinées à être plus courtes et plus minces et à permettre une laminarité naturelle de l'écoulement ;
- La proposition de systèmes propulsifs innovants : le développement des prochaines générations de moteurs reposent sur l'optimisation des technologies actuelles (turboréacteurs à fort taux de dilution)[2] telles que le Leap-X de CFM International (Snecma-General Electric). Le changement d'architecture avec le moteur à hélices contrarotatives non carénées « Open Rotor» fait également l'objet de recherches.

Dans le secteur ferroviaire : la large gamme des véhicules ferroviaires est adaptée à la variété des cas d'usages (tramway, trains régionaux, trains à grande vitesse). Deux modes de traction existent[3] ; seule la traction électrique est réellement développée en France.

La réduction de la masse est un objectif à atteindre sur l'ensemble des véhicules. Cet enjeu touche également la chaîne de propulsion :

- Utilisation de matériaux nouveaux (nouvelles familles d'acier, aluminium, composites...) ;
- Nouveaux modes de mise en forme et d'assemblage ;
- Des équipements de traction innovants ;
- La conception de nouvelles architectures de véhicules.

1 – http://pole-moveo.org/wp-content/uploads/2014/10/Renoter-F.pdf

2 – http://www.pprime.fr/?q=es/node/923

3 – http://allianceenergie.fr/iso_album/fiche_secteur_transport_.pdf

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La famille technologique est clé à plusieurs points de vue :

■ Pour soutenir une mobilité durable et tenir les engagements environnementaux fixés par les États membres (protocole de Kyoto, engagements de la COP21), la réduction de consommation des ressources fossiles est un axe prioritaire de l'Union Européenne. L'optimisation des chaînes des propulsions s'inscrit donc dans cet enjeu ;

■ L'électrification des véhicules crée de nouvelles opportunités mais aussi de nouveaux risques, comme la disponibilité des terres rares qui sont utilisées dans la conception des batteries, des aimants permanents, ou encore dans l'échappement automobile (l'oxyde de cérium, grâce à ses deux états d'oxydation, joue le rôle de régulateur de la teneur en oxygène dans les pots catalytiques). Le recours aux matériaux tels que le nitrure de gallium ou le nitrure de silicium devient donc clé. La famille technologique recouvre donc des enjeux stratégiques forts ;

■ Le succès du « bas coût » et des véhicules des segments A et B (citadines et compactes) en France et en Europe témoigne de la nécessité de maîtriser les coûts dans le secteur compétitif qu'est l'automobile ;

■ Enfin, ces technologies, même si elles sont maîtrisées par les grands donneurs d'ordres, ont un effet d'entraînement sur l'ensemble de la filière des sous-traitants, dont beaucoup de PME. Cet effet d'entraînement de l'innovation des PME sous-traitantes est essentiel pour assurer leur consolidation par une diversification de leurs clients et de leurs marchés.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les technologies pour la propulsion sont :	
2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
9	Fabrication additive
12	Robotique autonome
16	Recyclage des métaux critiques et terres rares
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération
25	Technologies de l'hydrogène

Les technologies influencées par les technologies pour la propulsion sont :	
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération

La modélisation et la simulation, ainsi que les technologies relatives aux matériaux avancés sont utiles pour élaborer les structures les plus adaptées avec de nouveaux matériaux plus résistants, plus légers, autoréparables, renouvelables, etc., pour améliorer les performances des systèmes propulsifs tout au long de leur cycle de vie.

■ Dans l'automobile : remplacement de pièces métalliques par des pièces plastiques ou composites dans les groupes motopropulseurs,

■ Dans le ferroviaire : utilisation de matériaux biosourcés pour substituer les composés d'origine pétrochimique ou organique,

■ Dans l'aéronautique : utilisation de pièces composites à matrice céramique (CMC) pour la fabrication de pièces des ensembles propulsifs des avions (aubes de turbine, arrière-corps, carénage de mat moteur, …).

Globalement, les NTIC et systèmes embarqués joueront un rôle majeur dans l'usage des moyens de transport (maîtrise des consommations, pilotage automa-

tique, véhicule autonome, utilisation optimisée des infrastructures).

Les systèmes de récupération d'énergie au freinage devraient permettre d'améliorer le rendement global du système ferroviaire. Quatre méthodes peuvent y être déployées:

- Systèmes de stockage embarqués à bord des engins de traction (batteries, super-condensateurs, volants d'inertie),
- Utilisation de l'énergie par un train se trouvant à proximité,
- Sous-stations réversibles capables de réinjecter de l'énergie électrique dans le réseau public,
- Systèmes de stockage électrochimiques ou mécaniques stationnaires en bord de voies. Les méthodes de gestion de type réseau électrique intelligent prennent ici toute leur place afin d'optimiser l'efficacité de la récupération et de la réutilisation de l'énergie.

Les marchés

Selon KPMG, 111 millions de véhicules légers devraient être vendus dans le monde en 2020[4], en croissance continue et soutenue (87 millions en 2014). En raison des parcs automobiles arrivant à saturation dans les pays développés, la dynamique des ventes à horizon 2020 devrait rester faible en Europe et aux États-Unis[5] (2 % en moyenne).La croissance mondiale proviendra donc des pays émergents (6 % par an pour le Brésil et 5 % par an pour la Chine) pour atteindre une progression moyenne de 3,5 % par an dans le monde.

Source 1 : KPMG's Global Automotive Executive Survey 2015

L'industrie automobile européenne affichait en 2012 un chiffre d'affaires total de 839 milliards d'euros et employait 12 millions de salariés qualifiés[6].

Selon le GIFAS (Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales), le chiffre d'affaires généré par ce secteur en 2014 était de 51 milliards d'euros pour la France avec une très forte part à l'exportation (33 milliards d'euros). Selon Airbus et Boeing, la flotte mondiale de transport aérien devrait plus que doubler à horizon 20 ans.

Dans le ferroviaire, la France occupe le troisième rang mondial (derrière l'Allemagne et la Chine) sur un marché

4 – http://www.kpmg.com/FR/fr/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/KPMG-Global-Automotive-Executive-Survey-2015.pdf

5 – http://observatoirecetelem.com/wp-content/uploads/2014/09/L-Observatoire-Cetelem-de-L-Automobile-2015.pdf

6 – http://ec.europa.eu/enterprise/magazine/articles/industrial-competitiveness/article_11125_fr.htm

mondial accessible du ferroviaire évalué à 102 milliards d'euros en 2013. Le chiffre d'affaires de l'industrie ferroviaire française s'établissait à 4,13 milliards d'euros dont 36,6 % réalisés à l'export. La France accueille les principaux leaders européens sur son territoire et a étoffé son offre sur une grande partie des segments du marché avec les tramways et métros automatiques. Cette industrie, qui compte 21 000 salariés, est positionnée sur un marché présentant de belles perspectives à long terme (le marché mondial devrait croitre de 2,8 % par an sur les six prochaines années) et sert aussi bien le marché du matériel roulant que de la signalisation.

Ces secteurs se caractérisent par une chaine de valeur très structurée, avec des relations donneurs d'ordres-fournisseurs bien établies. Le jeu d'acteurs sur l'innovation varie selon les entreprises, mais également selon le poids des acteurs. Si les équipementiers de rang 1 ont un réel pouvoir de proposition, les sous-traitants (PME) sont souvent impliqués dans des conditions qui ne facilitent pas leur innovation directe. Il n'en reste pas moins que l'innovation portée par les ensembliers et équipementiers de rang 1 est susceptible de retombées positives sur l'ensemble des filières.

Les défis technologiques à relever

Pour les motorisations électriques avec prolongateur d'autonomie, le développement de moteurs thermiques optimisés (consommation, émissions, masse et coût) et conçus en synergie avec le générateur électrique associé constitue encore aujourd'hui un défi technique, conjointement avec l'optimisation des architectures complètes des véhicules. Parmi les enjeux :

- Réduire les composants dans les systèmes hybrides. Les perspectives à venir visent à mieux intégrer les systèmes hybrides dans la chaîne thermique,
- Alléger des composants : il est généralement admis qu'une baisse de 100 kg sur la masse d'un véhicule entraîne une baisse d'émissions de CO_2 de 5 à 7 g/km (l'objectif d'émission moyenne du parc en 2020 est de 95 g/km contre 135g/km en 2000). L'usage du plastique et des composites dans les groupes motopropulseurs associé à l'optimisation en masse des pièces pour des performances thermomécaniques adaptées est un axe de travail contribuant à l'atteinte de cet objectif.

Le Nitrure de Gallium est un matériau alternatif au silicium sur un certain nombre d'applications telles que transistors, diodes et convertisseurs de puissance. Il est pertinent en électronique de puissance car les composants peuvent travailler à des températures et tensions beaucoup plus hautes, permettant la réduction de l'empilement et des besoins en refroidissement. Il peut ainsi être employé dans le secteur automobile dans les transistors de puissance (représentant le principal poste de dépense dans un convertisseur électronique : onduleur ou chargeur) mais également dans l'aéronautique qui a besoin de convertisseurs de puissance de grande compacité et de faible masse soumis à des cyclés thermiques (faibles/fortes températures[7]). Dans le secteur ferroviaire, il peut aussi être utilisé dans les systèmes employant des composants IGBT (transistor bipolaire à grille isolée).

Une filière française est en cours de création sur ces matériaux autour d'Exagan et du PSPC (Projet Structurant des Pôles de Compétitivité) Megan porté par Minalogic et Mov'eo.

Dans le secteur aéronautique, différents axes de travaux seront travaillés :

- L'architecture des moteurs, allant vers une augmentation du taux de dilution, est un axe de travail impor-

7 – https://hal-univ-tlse3.archives-ouvertes.fr/hal-00341009/document

tant du secteur pour le développement des nouveaux moteurs ;

■ Aubes de turbine : des travaux sont menés pour introduire des matériaux composites à matrice céramique, très résistants aux hautes températures et plus légers que les superalliages actuellement utilisés. L'utilisation de céramiques eutectiques dans les aubes de turbine devrait se généraliser[8], à la place des superalliages qui arrivent à leur limite de fonctionnement (1 050-1 100°C).

■ La réduction du bruit se fera via :

— le développement et la mise en place de méthodologies de conception aéro-acoustique des soufflantes (aubes fixes et mobiles) ;

— L'intégration motrice dans les nacelles et structures. Une telle évolution pose la question du partage de la valeur avec les nacellistes qui capture-raient une part plus grande de la valeur.

Dans le secteur ferroviaire, bien que le rendement des chaînes de traction électrique soit élevé (0,8 à 0,9) des gains peuvent encore être obtenus par :

■ L'amélioration des performances spécifiques des moteurs électriques. Ceci passe par une augmentation du rendement de conversion du moteur permettant de réduire la consommation énergétique, l'encombrement et la masse du moteur,

■ L'utilisation de supercondensateurs pouvant être chargés à chaque station pour le déplacement du matériel roulant,

■ L'électronique de puissance qui gère l'énergie électrique entre la source (caténaire, alimentation par le sol...) et le moteur. L'utilisation de semi-conducteurs à grande bande interdite (carbure de silicium, nitrure de gallium, à plus long terme diamant en couches minces) apportera de réelles améliorations par rapport aux systèmes actuels fonctionnant avec des composants IGBT,

■ Les systèmes de récupération d'énergie au freinage permettant d'améliorer le rendement global du système ferroviaire. L'énergie récupérée doit ensuite pouvoir être réutilisée.

8 – https://www.gifas.asso.fr/fichiersPDFen/NEWS/ENVIRONMENT/2-_Roeduire_la_consommation_de_koerosoene.pdf

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'objectif d'atteindre la consommation de 2 l/100 km pour un véhicule du segment B à un coût abordable pour le consommateur (15 000 € environ pour ce segment)[9] constitue un défi majeur pour les acteurs français en 2020, pour atteindre des émissions de 45gCO_2/km. L'apparition de nouveaux modèles de véhicules (notamment électriques) sera susceptible d'augmenter le nombre de concurrents. En France, le développement de ces technologies créera des opportunités : particulièrement autour des infrastructures de recharge (objectif annoncé pour 2030 de déployer 7 millions de points de charge selon le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie[10]).

L'électrification des véhicules requiert également une diminution du coût des composants. L'internalisation de ces connaissances permet ainsi aux constructeurs de réduire la quantité d'aimants et de diminuer l'utilisation des terres rares par exemple.

Dans le secteur aéronautique, les clients ont des exigences croissantes en termes de performance des aéronefs pour leurs opérations, de robustesse (maintenance notamment), de coût d'utilisation et d'impacts environnementaux. Il est important de garder une longueur d'avance en termes d'innovation et d'offre pour répondre à ces attentes et préserver la compétitivité internationale de l'industrie aéronautique française. La décennie actuelle voit ainsi le renouvellement ou la préparation du renouvellement de produits stratégiques pour chacun des grands acteurs nationaux face à l'émergence mondiale d'acteurs nouveaux, brésiliens, canadiens, russes ou chinois. Pour Airbus, il s'agit notamment de l'évolution de la famille des moyen-courriers A320, qui a constitué le fleuron de l'industrie aéronautique française et européenne des années 1980 à 2010. Mais d'autres appareils emblématiques de l'industrie aéronautique française sont aussi amenés à être renouvelés, comme par exemple les gammes Dauphin et Super Puma. Ces appareils constituent les piliers de l'offre civile d'Airbus Helicopters, leader

9 – http://www.pfa-auto.fr/files/8114/1094/8343/communiqu_de_presse_CNF_du_17-09-14_dfinitif.pdf

10 – http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-renforcement-de-l.html

mondial du marché des hélicoptères, mais arrivent à brève échéance en limite de vie commerciale et de capacités d'évolution, et devront demain répondre à de nouvelles exigences opérationnelles et environnementales.

Les enjeux réglementaires

Tous secteurs confondus, les enjeux réglementaires concernent la sécurité, la sûreté et le respect de l'environnement.

Le secteur de l'aviation civile, au même titre que l'ensemble des modes de transport, doit répondre aux enjeux liés au changement climatique. Le Parlement européen a ainsi décidé d'encadrer les émissions de CO_2 en taxant notamment les aéroports les plus polluants. Les quotas précédemment fixés ne faisant pas l'unanimité auprès des acteurs de la filière ont été revus en 2014. Une nouvelle soumission doit être réalisée par le Parlement en 2016 pour une application potentielle de ces quotas en 2020.

Dans l'automobile, le Parlement européen a voté l'objectif de 95 g de CO_2/km en 2020 (3,7l/100 km) pour la moyenne des niveaux d'émissions de tous les véhicules neufs vendus en 2020 en UE. Par ailleurs la réglementation Euro 6 en cours de mise en œuvre met les exigences d'émissions des diesels sur les polluants réglementés au niveau de l'essence, nécessitant des sauts technologiques. Une autre évolution concerne le changement des cycles de mesures NEDC vers WLTP et RDE (*real drive emission*), qui visent à obtenir des niveaux d'émissions réglementés plus proche des émissions réelles.

L'arrivée des véhicules électriques et hybrides rechargeables requiert de normaliser son écosystème (bornes de recharge et itinérance de recharge). L'adoption d'une directive en 2014 a abouti à l'obligation d'installer des prises de Type 2 au détriment du Type 3 soutenu jusque-là par la France. Ce choix a induit de revoir les déploiements nationaux organisés. L'efficience de la recharge des véhicules électriques et hybrides rechargeables passera aussi par la normalisation pour des données échangées pour assurer l'itinérance de la recharge. La création de la société Gireve est une force dans ce sens pour influencer les standards à venir au niveau de l'Europe.

Analyse AFOM

ATOUTS

Constructeurs et équipementiers automobiles à dimension internationale

Industrie aéronautique française située au premier plan mondial et PME agiles et innovantes sur tout le territoire

Lancement des IRT et ITE dédiés à la recherche technologique sur les technologies de propulsion

Forts liens entre aviation civile et militaire (dualité de la recherche, transfert d'innovations)

Présence sur de nombreux marchés dans le monde de l'industrie ferroviaire française

Qualité de la formation des ingénieurs et techniciens

FAIBLESSES

Taille des équipementiers français dans le secteur ferroviaire

Trop petit nombre d'entreprises de taille intermédiaire (ETI) dans les secteurs aéronautique et ferroviaire

Spécialisation à l'excès de PME / TPE rendant leur diversification difficile et leur santé très dépendante des conjonctures sectorielles

Présence insuffisante des acteurs français automobiles sur les marchés émergents

Absence de coordination de l'industrie ferroviaire dans le passé

OPPORTUNITÉS

Montée en innovation technologique constante dans le secteur aéronautique (développement de l'utilisation des matériaux composites)

Développement du marché automobile en Chine

Croissance du marché aéronautique mondial

Croissance du marché ferroviaire mondial, en particulier dans les pays émergents où l'urbanisation est croissante

MENACES

Approvisionnements terres rares et lithium

Contraction du marché automobile européen (marché socle de l'industrie automobile française)

Diminution conjoncturelle de l'activité ferroviaire en France sur la fin de la décennie

Difficultés à recruter des profils qualifiés (ingénieurs calcul, architecture logiciel aéronautique)

Concurrence montante des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud)

Concurrence des États-Unis dans le secteur aéronautique

Facteurs clés de succès et recommandations

Il apparaît souhaitable d'accroître l'influence de la France dans l'établissement des normes internationales. La présence des industriels à haut niveau dans les instances de normalisation et de lobbying apparaît ainsi comme un élément essentiel pour la compétitivité française dans les transports, quel que soit le mode.

De manière transversale, il apparaît également important sur ces sujets de privilégier des relations équilibrées entre donneurs d'ordre et sous-traitants pour permettre à ceux-ci de conserver leur capacité d'investissement et d'innovation.

L'industrie aéronautique française doit continuer à faire prévaloir les préoccupations de long terme dans ses choix stratégiques (industrie de cycle long). Sa position est liée à la maîtrise des technologies les plus avancées et à l'innovation. Ceci implique de :

- Poursuivre l'effort de recherche à un haut niveau, en le faisant partager au long de la chaîne des sous-traitants et en en réduisant la dispersion entre laboratoires. Le soutien de l'État, tel que pratiqué dans les pays concurrents, est recommandé ;
- Conserver une approche suffisamment innovante dans les différents choix technologiques tout en restant à l'écoute des ruptures potentielles. La bonne identification des enjeux du futur du transport aérien (bruit, énergie fossile, productivité et réduction des coûts d'exploitation pour les compagnies aériennes) permettra de développer des produits y répondant ;
- Conserver l'avance dans la maîtrise de l'approche « système complexe » appliquée à la conception, au développement expérimental, à la fabrication à la maintenance et à tout le cycle de vie de l'aéronef ;
- Maîtriser les processus industriels de fabrication, car la qualité de l'industrie aéronautique française en dépend. Il est important que les industriels constructeurs de premier rang conservent, même dans le cadre d'un fort degré de sous-traitance et de certaines délocalisations dans des pays à bas coûts, la connaissance et la compétence sur l'ensemble des composants critiques mis en œuvre et des processus mobilisés.

Acteurs clés :

Entreprises	Alstom Transport, Bombardier, Dassault Aviation, Faurecia, PSA Peugeot Citroën, Renault Technocentre, Safran, SNCF, Thales Communications & Security, Valéo, …
IRT, ITE, IHU	IRT Jules Verne, IRT M2P, IRT NanoElec, Railenium, IRT Saint-Exupéry, VeDeCoM…
Instituts Carnot	CEA LETI, CEA LIST, ESP, INRIA, IRSTEA, LAAS CNRS, Logiciel et Systèmes Intelligents, M.I.N.E.S., ONERA, TSN…
Autres centres de recherches	Air-ESIEA, ENSTA, IFPEN, INSA, Laboratoire HEUDIASYSC – UTC, Laboratoire ROBERVAL – UTC…
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, Astech, IDforCAR, I-Trans, LUTB, Minalogic, Mov'eo, Pegase, Systematic, Véhicule du futur…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Commission Régionale Des Associations de Chantier, Fédération des Industries des Equipements pour Véhicules, GIFAS - Groupements des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

46 Nanoélectronique

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, **NUMÉRIQUE**
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Loi de Moore, More than Moore, intégration 3D, photonique, Internet des Objets, semi-conducteurs, électronique

Définition et périmètre

La nanoélectronique fait référence à la **miniaturisation (Loi de Moore) à un niveau nanométrique et la diversification (« *More than Moore* ») des composants et des systèmes électroniques.**

Depuis 50 ans, l'industrie électronique a suivi la **Loi de Moore**[1] **selon laquelle le nombre de transistors contenu dans les circuits double tous les 18 mois, à prix constant**. Cette voie, dite *top-down*, a permis de réduire le plus possible les dimensions des composants électroniques, au point d'atteindre un niveau nanométrique. Soumise à la Loi de Moore, l'industrie électronique, utilise majoritairement du silicium et la photolithographie pour graver les transistors.

Des solutions repoussant les limites de la loi de Moore sont néanmoins apparues, contredisant ainsi les prévisions du fondateur d'Intel. Ces technologies de prolongement, qui répondent à une stratégie « ***More Moore*** », ont permis à des sociétés telles que TSMC de proposer la fabrication de circuit de 20nm et à Samsung, de concevoir des composants de 14nm, les plus petits sur le marché à ce jour. Il s'agit de modifications de la structure des transistors :

- La **technologie FD-SOI** (*Fully depleted silicon on insulator*) développée conjointement par Soitec, STMicroelectronics et le CEA LETI permettant d'améliorer les performances du transistor tout en réduisant, voire supprimant, les effets parasites rencontrés avec le silicium. Le développement de cette technologie est au cœur du projet Nano2017 lancé par le gouvernement en 2013 ;
- De la **technologie FinFet**[2] mise au point par Intel et utilisée par Samsung, TSMC et Globalfoundries.

En revanche, les difficultés rencontrées au niveau de la poursuite de l'augmentation de la taille des transistors se posent plutôt au niveau de la technologie de fabrication, et en premier lieu de par la limitation liée à la longueur d'onde de la lumière utilisée en photolithographie. Une nouvelle technologie de gravure est ainsi en cours de développement pour remplacer la photolithographie, ne permettant pas de graver du silicium à une finesse inférieur à 10nm : la **technologie Extreme-UV**[3]**.** Cependant, le passage en extrême UV comme les techniques de multi-paterning sont des technologies extrêmement difficiles à maîtriser et renchérissent le coût de production. Plusieurs acteurs mondiaux de la microélectronique, Samsung, Global Foundries, ont confirmé au cours des derniers mois qu'ils estimaient que le nœud 28nm aurait un coût de production moins élevé que les nœuds suivants (14nm et au-delà), ce qui fait pressentir une durée de vie plus longue pour le 28nm, **donc un ralentissement de la loi de Moore.**

En parallèle de la course à la réduction des dimensions, un nouveau champ d'innovation est apparu dans l'industrie des semi-conducteurs face à l'augmentation croissante des besoins du marché en termes d'application. On l'appelle « ***More than Moore*** ».

On cherche plutôt à intégrer de nouveaux nanocomposants hétérogènes sur une puce pour enrichir les fonctions des circuits, gérer leur complexité croissante et leur permettre de s'adapter à leur environnement : microprocesseurs, micro-capteurs, mémoires statique et dynamique, micro-systèmes électromécaniques (MEMS), interfaces radioélectriques, composants optoélectroniques etc.

Parmi les procédés à l'étude figure l'intégration 3D, c'est-à-dire la conception de puces au sein desquelles les composants sont empilés et non plus seulement mis côte à côte. Cette voie laisse envisager des systèmes complexes plus performants, **moins « encombrants », plus économes en énergie, et surtout moins coûteux une fois les procédés d'industrialisation maîtrisés**.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Caractère stratégique

En raison de l'omniprésence de l'électronique dans tous les secteurs de notre économie, la nanoélectronique est stratégique car **sa maîtrise conditionne le positionnement de la France dans de nombreux**

1 – Loi empirique édictée par Gordon Moore, fondateur d'Intel à partir de l'observation d'une tendance

2 – La technologie FinFET consiste à graver des transistors verticaux sur des marches de silicium de quelques nanomètres de hauteur, en 3D et permettant aux transistors d'occuper une moins grande surface et ainsi, de réduire les courants de fuite

3 – La technologie consiste à frapper une cible d'étain sous vide avec un faisceau laser CO_2 de près de 1MW de puissance. Cette frappe pulvérise la cible et provoque l'émission de rayons X sur cette longueur d'onde. Il s'agit alors de récupérer ces rayons X à travers des miroirs et de les diriger sur la plaquette de silicium

domaines technologiques clés associés : l'Internet des Objets, les réseaux électriques intelligents, le *Cloud Computing*, etc. Cette technologie, qualifiée de *key enabling technology4*, est à la base de la chaîne d'innovation de nombreuses autres technologies telles que l'imagerie médicale, les capteurs ou la robotique.

Son caractère stratégique est aussi et surtout lié à **l'immense potentiel de marché que la nanoélectronique représente de par son important effet de levier sur l'innovation des autres filières** (produits et services de l'information, automobile et transport, santé, etc.). À titre d'exemple, le marché des semiconducteurs est estimé à 300 milliards de d'euros en 2015[5] mais son effet de levier sur les autres marchés est extrêmement conséquent (de l'ordre de six fois sa taille sur le seul marché de l'électronique).

Atouts de la France

La France dispose d'atouts lui permettant de se positionner demain en leader dans les technologies nanoélectroniques :

- **Des centres de R&D de haut niveau** : le site de Crolles (STMicroElectronics), le CEA Leti et l'IRT NanoElec ;
- **Des entreprises de rang mondial investissant dans la recherche en nanoélectronique** : STMicroElectronics fait partie des 10 leaders mondiaux de fabrication de composants électroniques et est au cœur du programme de R&D Nano2017, au côté du CEA Leti. D'autres grands groupes industriels sont impliqués dans la recherche et le développement de la nanoélectronique, à l'instar de Gemalto, *leader* mondial de la sécurité numérique. Alcatel Lucent et Thalès ont également à ce titre créé le **laboratoire III-V Lab**, rejoint par la suite par le CEA Leti ;
- **La France dispose de deux pôles de compétitivité d'envergure mondiale sur la nanoélectronique :**
  - **Minalogic,** qui rassemble 198 entreprises, et 13 centres de recherche et universités. Minatec, situé à Grenoble, est un complexe d'innovation unique en Europe et au meilleur rang mondial en micro et nano technologie ;
  - **SCS (solutions communicantes sécurisées),** regroupe 250 adhérents dont 16 laboratoires. Il couvre l'écosystème PACA de la microélectronique, historiquement situé autour d'Aix-Marseille et de Sophia-Antipolis, dont l'expertise en technologies analogiques sans contact et technologies pour la sécurité et la carte à puce, sont reconnus à l'échelle mondiale.
- **Un soutien des acteurs publics français et européens forts dans ce domaine** : La nanoélectronique figure parmi les priorités de la Commission européenne qui prévoit d'investir jusqu'à 5 milliards d'euros[6]. La France a également introduit cette technologie dans les priorités du plan de la Nouvelle France industrielle[7] et financé à hauteur de 600 millions d'euros, le **programme Nano2017** dont l'objectif est de faire de la France l'un des trois premiers du programme de recherche européen Horizon 2020.[8] Ce plan s'inscrit pleinement dans la perspective de la **stratégie européenne pour la micro-nanoélectronique**, mettant l'accent sur les trois pôles majeurs de Crolles, Dresde et Louvain[9].

Liens avec d'autres technologies clés

La nanoélectronique est liée à **toutes les technologies clés à l'horizon 2020 intégrant des composants électroniques** :

- L'Internet des objets ;
- Capteurs ;
- Réseaux électriques intelligents ;
- Robotique autonome ;
- Supercalculateurs ;
- Intelligence Artificielle ;
- Dispositifs Bio-embarqués ;
- Technologies d'imagerie pour la santé ;
- Systèmes embarqués sécurisés et sûrs ;

4 – Commission Européenne, *High Level Expert Group, on Key Enabling Technologies*, juin 2011

5 – Reuters *: Le marché mondial des semiconducteurs vu à $348 mds-Gartner*, 8 juillet 2015

6 – Commission Européenne, « Stratégie européenne en matière de composants et systèmes micro-nanoélectroniques », Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions, Bruxelles, 23 mai 2013

7 – Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du numérique, *Les 34 plans de la nouvelle France industrielle*, 2013

8 – Direction Générale des Entreprises, « Le programme Nano 2017 »

9 – *Le programme Nano 2017*, site Internet de la Direction Générale des entreprises

- Infrastructures de 5ème génération ;
- Solaire Photovoltaïque ;
- Authentification forte.

Le développement de la nanoélectronique n'influencera pas seulement ces technologies mais un ensemble beaucoup plus vaste, dans de très nombreux domaines.

Les marchés

La nanoélectronique constitue un **marché majeur et très attractif qui concerne tous les secteurs de l'économie.** En effet, omniprésents dans notre quotidien, les composants microélectroniques régissent nos ordinateurs, permettent les services sans contact, déterminent la qualité des télévisions, etc. Le développement de la nanoélectronique porte donc en elle une révolution dans de très nombreux domaines d'applications de la santé, à l'énergie, l'environnement à la sécurité.

Le document MASRI10, publié par la *Joint Undertaking* ECSEL en 2014, propose des données de marché par domaine d'applications pour éclairer les enjeux financiers de la nanoélectronique :

Marchés (non-exhaustif)	Chiffre d'affaires global
Automobile et transport	
Automotive semiconductors (2015)	**28,7 Mds $US**
Communication et usages numériques	
Communications chips (2015F)	**133,9 Mds $US**
Computer chips (2015F)	**117,5 Mds $US**
Optical components (2015F)	**7,3 Mds $US**
Siicon photonics (2015F)	**2 Mds $US**
Set-Top Box (2013)	**22,2 Mds $US**
Transceiver (2015F)	**12,1 Mds $US**
Power amplifier (2015F)	**8,8 Mds $US**
Efficacité énergétique	
Power semiconductors (2015F)	**15,6 Mds $US**
Santé et vieillissement	
Medical imaging equipment (2015F)	**28,3 Mds $US**
Equipement, matériel et production	
Semiconductor equipment (2012)	**39 Mds $US**
F : « Forecast », données prévisionnelles	

Source : ECSEL, MASRIA, 2014

La demande soutenue de semi-conducteurs pour les smartphones et pour l'automobile sera portée par l'explosion de l'Internet des Objets (IoT), qui offre des perspectives de croissance optimistes pour les acteurs du marché à horizon 2020 et au-delà. Selon la société d'études Gartner, le marché des semi-conducteurs pour l'IoT représentera près de **45 milliards de dollars en 2020**, contre seulement 10 milliards en 2014. Le marché de l'IoT représentera lui, environ 1700 milliards d'euros en 20211.

L'Europe et la France ont cependant **encore du retard à rattraper** sur le marché de la production de composants électroniques, largement dominé par les 3 géants américains et asiatiques Intel, TSMC et Samsung. STMicroelectronics, Infineon et NXP, représentent des acteurs européens importants mais détiennent des parts de marché bien inférieures à leur concurrent : 2 % pour STMicroElectronics contre 10 % pour Samsung et 15 % pour Intel (Gartner, 2015). En revanche, la production européenne de composants est très bien positionnée sur les composants pour les marchés industriels : automobile, médical, aéronautique… Cette spécificité peut lui permettre d'améliorer sa position dans les années à venir, car ces marchés connaissent une plus forte croissance que les marchés télécom plus matures.

Les investissements dans des projets de recherche - au niveau européen, avec le programme Horizon 2020, et en France avec le projet Nano2017 financé dans le cadre du programme d'investissements d'avenir -

10 – ECSEL Joint Undertaking, MultiAnnual Strategic Research and Innovation Agenda, 2014

11 – Données IDC, 2015

montrent **les ambitions fortes de l'Europe et de la France de devenir leader mondial en production de composants nanoélectroniques**.

Les défis technologiques à relever

Les défis liés à la Loi de Moore

La miniaturisation des composants au-delà de 10nm pose des défis technologiques importants : comment graver sur des surfaces nanométriques des composants en limitant au maximum les courants de fuite et à des coûts toujours plus faibles?

La recherche en nanoélectronique s'oriente vers différentes alternatives à la loi de Moore, alternatives « *Beyond CMOS* » qui visent à explorer d'autres possibilités d'exploitation de matériaux autres que le CMOS[12]:

- **La spintronique**, utilisant le spin des électrons pour le stockage d'information (MRAM) ou bien dans la radiofréquence (oscillateurs Ghz) ;
- **La photonique**, utilisant la lumière (photon) pour coder l'information pour des hautes fréquences ;
- **L'auto-assemblage de la matière (*voie bottom-up*)** : au lieu de construire un circuit et d'y graver des nano-composants, la voie *bottom-up* cherche à assembler des molécules entre elles pour former des nano-composants. Cette alternative reste pour l'instant dans une démarche très exploratoire ;
- **Le transistor à un électron :** les applications potentielles sont des électromètres miniatures (détection ultra-sensible de la charge), des mémoires, des circuits logiques, etc. Le transistor à électrons est surtout efficace à basse température (blocage de Coulomb) mais des systèmes de ce type peuvent être appliqués à la radio fréquence ;
- **L'effet tunnel résonnant :** mis en pratique au sein de diodes ou de transistors. Ce sont des dispositifs permettant de réaliser des oscillateurs, des circuits logiques, des mémoires ;
- **L'électronique moléculaire** visant à la réalisation de dispositifs électroniques (comme un processeur par exemple) constitués soit d'une seule molécule regroupant l'ensemble des fonctions requises avec une approche intégrée, soit de composants moléculaires élémentaires (une ou quelques molécules) connectés entre eux par des électrodes dans une approche dite hybride ;
- **L'utilisation du graphène, un nouveau matériau qui remplacerait le silicium.** Ce matériau pourrait révolutionner l'électronique car les électrons se déplacent sur le graphène à une vitesse 150 supérieur que sur du silicium. Par ailleurs, un transistor de graphène s'échauffe peu. Cette alternative, qui ne fonctionne qu'à basse température, reste pour l'instant dans une démarche très exploratoire.

Ces différentes options sont encore à des stades amonts, et ont toutes comme objectif de lever les défis liés à la puissance et la vitesse de calcul des processeurs.

L'intégration de technologies hétérogènes (More than Moore)

Depuis 50 ans, l'industrie du semi-conducteur suit la loi de Moore. Aujourd'hui, l'enjeu est de diversifier le contenu des puces en intégrant différents composants hétérogènes. Le nouveau pan de la recherche en nanoélectronique se trouve donc confronté à un défi de taille : comment intégrer de façon optimale des composants de nature hétérogène (analogique et numérique), tels que des MEMS, capteurs et actuateurs, etc. ? L'intégration de composants de nature hétérogène à une échelle nanométrique pose également la question de la consommation d'énergie. L'un des principaux défis en nanoélectronique est en effet de consommer peu d'énergie (donc de limiter au maximum les courants de fuite). Cette problématique est cruciale pour le développement de l'ensemble des technologies de la nanoélectronique.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Parvenir à proposer des puces électroniques (avec des nano-composants) à bas coût est un défi de taille. La production de nano-composants nécessite en effet

12 – CEA, *Le Nanomonde*, 2008

d'utiliser des équipements et infrastructures dont le coût est significatif. L'investissement dans de telles infrastructures est très élevé, et par conséquent, écarte de fait les acteurs n'ayant pas les capacités de production et les parts de marché suffisantes. À titre d'exemple, Samsung, devrait investir 14,7 milliards de dollars en 2015 dans les semi-conducteur[13]. De tels investissements sont possibles pour Samsung car il se positionne en numéro deux mondial sur le marché des semi-conducteurs. Le positionnement de la France en leadership sur ce marché doit donc passer par des **stratégies d'alliance entre les acteurs français de l'industrie des semi-conducteurs (producteurs et bénéficiaires)**, notamment au niveau européen et international pour partager les coûts d'investissements des futures usines de production de composants. L'absence d'une telle stratégie ou d'aide publique forte dans le secteur ferait courir le risque à STMicroElectronics, de devenir « *fabless* [14] c'est-à-dire de ne plus être capable de produire des composants.

Les enjeux réglementaires

Le développement de la nanoélectronique n'est **pas soumis à des contraintes règlementaires majeures** à l'heure actuelle.

La nanoélectronique se distingue en effet des nanotechnologies et nanomatériaux qui fabriquent des composants chimiques pour lesquels les potentiels risques sanitaires et environnementaux font l'objet de débats et réflexions réglementaires spécifiques. À l'échelle européenne, c'est le règlement Reach, relatif à l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques, qui encadre ainsi le développement des nanomatériaux et nanotechnologies.

Le semi-conducteur n'utilisant pas de nano-objets libres dans ces procédés de fabrication il n'est pas impacté par le règlement Reach. En revanche, un certain nombre de substances visées par la réglementation Reach et exploitées par l'industrie du semi-conducteur font régulièrement l'objet de volonté de restriction voire d'interdiction, que ce soit dans les substrats (Arsenic de Gallium notamment) ou les solvants utilisés dans les processus de fabrication (notamment les substances fluorées).

13 – « Samsung, toujours champion des investissements dans les semi-conducteurs », Usine-Digitale.fr, 23/04/2015

14 – « STMicro, fabless dans cinq ans ? » L'usineDigitale.fr, 07/03/2013

Analyse AFOM

ATOUTS

Deux pôles de compétitivité mondiaux : Minalogic, SCS

Un écosystème d'innovation de haut niveau : CEA LETI, IRT NanoElec, Minatec, Alcatel Thales III-V Lab, CNRS et INRIA

Un soutien politique fort en faveur du développement de la nanoélectronique à travers les plans « Nano2017 » et de la Nouvelle France Industrielle

Présence d'un fabricant de semi-conducteurs de rang mondial : ST MicroElectronics, inventeur d'une technologie More Moore, le FD-SOI

Présence d'un fabricant de substrats de rang mondial : SOITEC, inventeur du SOI

Un écosystème sur le sans contact et la sécurité reconnu mondialement

FAIBLESSES

Faible capacité d'investissements des industriels (ST MicroElectronics) comparé aux acteurs américains et asiatiques

Nombre d'acteurs français peu élevé

OPPORTUNITÉS

Un marché mondial estimé à 326 milliards d'euros en 2016 pour les semi-conducteurs

Des débouchés très importants à venir dans l'Internet des objets dont le marché est estimé à 1700 milliards d'euros en 2020

MENACES

Domination des acteurs américains et asiatiques

Risque pour STMicroElectronics de devenir *« fabless »* en l'absence de forts investissements dans de nouvelles infrastructures

Facteurs clés de succès et recommandations

L'écosystème Grenoblois (site de Crolles, Minalogic, Kalray, ST Microelectronics, IRT NanoElec, CEA, etc.) fait aujourd'hui de la France un leader mondial en recherche sur la nanoélectronique. Néanmoins, sur le plan industriel, la faible capacité d'investissement de ses entreprises (notamment ST) positionne la France en retard par rapport à ses concurrents américains et asiatiques (Taïwan, Chine, Corée, Japon). Le rôle de plus en plus déterminant joué par la nanoélectronique dans l'innovation de nombreuses branches industrielles, et le potentiel de marché immense que cette technologie représente lui donne un caractère fortement stratégique pour la France.

Pour acquérir une position de leadership mondial au niveau industriel et maintenir son leadership dans la recherche, il est donc essentiel de :

- Continuer à promouvoir les interactions et les partenariats entre les acteurs publics et privés de recherche afin de favoriser un transfert rapide des technologies. La coopération entre STMicroelectronics et le CEA LETI sur les technologies de production en FD-SOI (*fully depleted silicon on insulator*) a démontré la force du modèle français qui dispose aujourd'hui de compétences uniques au monde ;
- Augmenter de façon considérable les capacités d'investissements des acteurs du secteur afin de construire des usines de pointe à travers :
  - La mise en place d'alliances stratégiques entre grands industriels fabricants et industriels intégrateurs de semi-conducteurs. La création d'un consortium d'acteurs réunissant investisseurs/intégrateurs et fabricants pourrait être une solution pour financer les usines du futur ;
  - Un soutien public à l'investissement, comme ce fut le cas pour Nano2017. L'aide de l'État doit néanmoins rester un apport à la marge car elle ne constitue pas une solution de long terme pour garantir la pérennité de l'industrie française de nanoélectronique.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

Parmi les principaux acteurs français de la recherche, on compte notamment : IRT NanoElec, INRIA, CEA Leti, Alcatel Thales III-V Lab, CNRS (LAAS, NEEL, IEMN, LPN, IMS, UMP), Minatec, Institut d'Electronique fondamentale de l'Université Paris Sud, ENS Cachan, Université Joseph Fourier, INP de Grenoble, ESIEE.

Grands groupes

Les principaux groupes français dans le champ de la nanoélectronique sont : STMicroelectronics, Thalès, Alcatel Lucent, Gemalto.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

SOITEC, ALTIS, Trixell.

Start-up et PME

La France possède un écosystème de start-up et de PME dans le domaine de la nanoélectronique qui couvre l'ensemble de la chaîne de valeur : Riber, Semco Engeeniring, IBS, Magillem Design Services, Docea Power, Tronics Microsystems, Kalray, MicrooLed, Tiempo, Isorg, Primo 1D, Exagan, Vesta System, etc.

Organismes de soutien et d'interface

Ces entreprises sont soutenues et accompagnées par des structures de l'écosystème de l'innovation : Minalogic, SCS, S2E2, IRT Nanoelec, CAPTRONIC, C'Nano Paca (centre de compétences en nanosciences et nanotechnologies), Fondation Nanosciences (réseau thématique de recherche avancée).

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Acteurs clés :

Entreprises	Alcatel Thalès III-V Lab, Alcatel-Lucent, Alstom Hydro Power, Bouygues Construction, EDF, Electropôle - Schneider Electric, Enerbee, Exagan, Gemalto, Genel, Isorg, Kalray, MicrooLed, Mirsense, Primo 1D, PV Alliance, Radiall, Soitec, STMicroelectronics, Thales Research and Technology, Tiempo, Trixell, Tronics Microsystems, Vesta System …
IRT, ITE, IHU	IRT NanoElec…
Instituts Carnot	CEA LETI, INRIA, LAAS CNRS …
Autres centres de recherches	ENS Cachan - Département électronique électrotechnique automatique (EEA), Institut d'Electronique fondamentale de l'Université Paris Sud, IEMN Lille, Grenoble INP, LPN, MINATEC, NEEL Université Joseph Fourier - Master EEATS…
Pôles de compétitivité	Minalogic…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	C'Nano PACA, Fondation Nanosciences, Optic Rhône Alpes…

47 Technologies de conception de contenus et d'expériences

LOISIRS & CULTURE
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

➤ Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Génération procédurale ; Interfaces utilisateurs ; Motion Capture ; Moteur de rendu en temps réel; Modélisation ; Performance Capture ; Prévisualisation ; Scanner 3D ; User experience.

© Inria Photo Kaksonen

Définition et périmètre

La production de contenus concerne à la fois l'audiovisuel (cinéma, télévision, radio, web), les multimédias (jeux vidéo, web) et l'édition textuelle et numérique. Les technologies de conception de contenus et d'expériences intègrent l'ensemble des technologies de conception des industries créatives et culturelles (ICC). Cela concerne donc la production d'image et de son, les interfaces utilisateurs. Ces technologies sont également mises à profit dans d'autres secteurs tels que l'architecture ou la conception industrielle qui ne seront pas abordés ici. Plusieurs technologies ont été identifiées comme clés parmi ces technologies de production de contenu **:**

■ **La captation de mouvement (Motion Capture) qui** consiste à enregistrer les positions et rotations d'objets ou de membres d'êtres vivants, pour en contrôler une contrepartie virtuelle sur ordinateur. Cette technique utilise un capteur relié à une application serveur qui extrait, traite et stocke les données brutes matérielles pour les traiter (filtrage, calculs géométriques et d'interpolation). Ces données peuvent être transmises en temps réel à un logiciel de visualisation, le plus répandue étant MOTIONBUILDER. La captation de mouvement peut être réalisée avec des marqueurs : exosquelette dans le cas des capteurs mécaniques, marqueurs passifs réfléchissants associés à des caméras infrarouges ou cellules photosensibles associées à des micro-LED pour la capture optique et bobines électriques pour la capture magnétique. Les technologies de capture de mouvements s'orientent progressivement vers des solutions sans marqueurs qui permettront de capturer le mouvement sans aucun marqueur ni préparation comme la technologie Kinect. Ces solutions permettent une baisse du coût de production et une plus grande souplesse au niveau de l'utilisation.

■ **La performance capture** est une évolution de la capture de mouvement qui permet une reconstitution plus réaliste des mouvements comme les expressions faciales ou les mouvements des mains.

■ **Le scanner tridimensionnel** est un appareil capable de collecter des données sur la forme et l'apparence (couleur, texture, ..) des objets et de construire à partir de ces données des images de synthèse en trois dimensions. Le marché des scanners 3D est dominé par les scanners à laser en raison de leur efficacité et de leur meilleure portabilité mais les segments des scanners optiques et à lumière structurée devraient progresser rapidement.

■ **Les moteurs de rendu et le recours au ray-tracing associé au calcul par GPU.** Dans chaque jeu vidéo, il y a un moteur qui effectue les calculs nécessaires au bon déroulement du jeu grâce à de multiples composants logiciels. Le moteur de jeu intègre plusieurs fonctionnalités : le moteur de rendu est responsable de l'affichage des graphismes et doit apporter une texture et du réalisme à travers la simulation de lumière ou de fluides, le moteur physique détecte et gère les collisions et les propriétés physiques des objets, le moteur audio prend en charge le son... Les moteurs de jeu deviennent des environnements de développement complets spécialisés dans la création de mondes interactifs en 3D. Les deux moteurs les plus utilisés sont Unity Pro (UNITY TECHNOLOGIES) et Unreal (EPIC GAMES)[1]. Les moteurs de rendu 3D utilisent deux techniques pour créer des images 3D : la rastérisation et le lancer de rayon (ray tracing). Le ray tracing est une technique de calcul d'optique par ordinateur, consistant à simuler le parcours inverse de la lumière. En vision naturelle, les rayons sont émis depuis une source lumineuse, réfléchis par les objets et une partie de ces rayons arrive sur l'œil. Le ray tracing reconstitue le parcours du rayon de l'œil (caméra) à la source lumineuse afin de ne prendre en compte que les rayons vus par l'œil, ce qui rend les temps de calcul acceptables. Le ray tracing permet d'obtenir des images très réalistes mais le temps de rendu énorme a longtemps limité son utilisation au rendu différé. L'augmentation de la puissance des ordinateurs permet d'envisager d'adapter le ray tracing aux contraintes du rendu temps réel. Le calcul par GPU consiste à utiliser le processeur graphique (GPU) en parallèle du CPU (processeur central) pour accélérer les portions de code les plus lourdes en ressources de calcul. La puissance de traitement parallèle des GPU NVIDIA permet d'accélérer la vitesse de rendu des logiciels et notamment les procédures de calcul de ray tracing[2].

---

1 – USINE DIGITALE : « CES 2014 : Unreal, Unity, Valve : trois moteurs de jeux vidéo, trois business models » <http://www.usine-digitale.fr/editorial/unreal-unity-valve-trois-moteurs-de-jeux-video-trois-business-models.N317270 >

2 – NVIDIA : «Ray-tracing par GPU». < **http://www.nvidia.fr/object/gpu-ray-tracing-fr.html** >

■ **Les technologies de rendu en temps réel et la prévisualisation**. La technologie de rendu en temps réel *(real-time rendering)* permet de créer et visualiser des décors virtuels en direct. Les studios se tournent de plus en plus vers des solutions basées sur les moteurs de jeux vidéo comme cryEngine ou Unreal Engine. La prévisualisation est un outil d'assistance à la mise en scène, elle permet au réalisateur de visionner en direct les scènes en assemblant les décors virtuels et les acteurs tournés sur fond vert, sans attendre l'étape de post-production. A l'étape de post production, des logiciels de prévisualisation comme Solid Track permettent de fusionner très rapidement les images filmées et les images de synthèse. Les outils de prévisualisation à l'instar de ceux développés par les studios américains Third Floor et Halon, font appel à l'animation 3D, la performance capture ou encore à l'outil Simulcalm combinés à des logiciels 3D ou à des moteurs de rendu temps réel.

■ **La génération procédurale de contenus** permet de créer des scènes naturelles avec un haut niveau de détails. Le développeur crée un algorithme qui définit les principes de génération des textures, des environnements, du placement des objets et même des niveaux de jeux. L'ordinateur génère alors une infinité d'éléments correspondant à ces normes prédéfinies. La génération procédurale optimise le travail des artistes et permet aussi de mieux gérer les problématiques de stockage.

■ La production de contenus fait également appel à une multitude de **logiciels de modélisation et simulation** perpétuellement en évolution. Les PME françaises sont très actives sur le sujet. 4D VIEW SOLUTIONS, positionnée sur la production de contenu 3D, commercialise un système de modélisation 3D de scènes réelles dynamiques. Il s'agit d'un système calculant une représentation 3D d'une scène filmée par plusieurs caméras synchronisées. GOLAEM a développé un outil d'intelligence artificielle « Golaem Crowd» qui permet de peupler les scènes avec des personnages numériques et de modéliser les mouvements de foules complexes et MOTIONTREE développe des outils de production de contenus interactifs.

Les expériences utilisateurs. Souvent confrontée aux problématiques liées à l'ergonomie, l'expérience utilisateur se voit de plus en plus enrichie grâce aux interfaces immersives et interactives. En particulier l'interface contextuelle, qui anticipe les besoins de l'utilisateur en fonction de ses habitudes et du contexte analysé par les différents capteurs du téléphone, est un axe de développement fort. AVIATE, la start-up rachetée par YAHOO[3] propose un écran d'accueil contextuel avec des groupes d'applications susceptibles d'être utilisées en fonction de l'heure, du lieu, de l'agenda, du mouvement du mobile, etc. Un glissement de l'écran vers le bas permet d'afficher des éléments en lien comme les critiques du restaurant où vous êtes ou les horaires des bus qui passent à proximité. Cette tendance est également visible chez GOOGLE avec GOOGLE NOW, chez FACEBOOK avec HOME et chez MICROSOFT. Les interfaces utilisateurs utilisent également les technologies de réalité augmentée notamment sur les sites d'e-commerce pour essayer l'article avant l'achat à l'instar de MODE-IN-MOTION, une PME qui propose d'essayer virtuellement une montre aussi simplement qu'en boutique[4]. L'interface utilisateur n'est qu'une composante de l'expérience utilisateur qui prend en compte l'ensemble du ressenti de l'utilisateur au cours de son utilisation d'un produit.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

■ Une dimension sociétale forte

Indépendamment des technologies présentées dans ce document et de leur apport au niveau de la narration et de l'expérience utilisateur, il est ici important de préciser l'importance sociétale de ces technologies. En premier lieu, la France est un des pays leaders de ce secteur en termes économiques et d'influence : créativité, nouvelles formes de narration, expériences utilisateurs apportées par les entreprises françaises sont très souvent mises en avant. Ingénieurs, développeurs et créatifs français font référence au niveau mondial et contribuent aussi à donner une autre dimension aux contenus développés par eux. Ils donnent du sens à la narration, placent le spectateur au cœur de l'action et contribuent à des contenus de grande qualité.

---

3 – USINE DIGITALE : « CES 2014 : Yahoo! s'offre Aviate et son interface mobile contextuelle ». < http://www.usine-digitale.fr/article/ces-2014-yahoo-s-offre-aviate-et-son-interface-mobile-contextuelle.N230618 >

4 – USINE DIGITALE : « CES 2014 : Le site Mode-In-Motion permet d'essayer des montres en 3D ». < http://www.usine-digitale.fr/article/le-site-mode-in-motion-permet-d-essayer-des-montres-en-3d.N315962 >

■ **Des technologies de conception renouvelées par l'explosion du Big Data, du calcul intensif et de l'intelligence artificielle**

© Fotolia

L'explosion des données massives couplée au calcul haute performance avec l'utilisation de calculateurs puissants rend possible le développement spectaculaire des performances des applications logicielles. L'application de ces solutions au secteur Loisirs et culture permet une meilleure analyse des données disponibles pour renouveler l'expérience utilisateur. Le développement de l'IA et du Big Data devrait également encourager le développement de la génération procédurale de contenu à l'instar de VWorldTerrain©, une technologie procédurale de rendu de terrain 3D temps-réel, combinée à des données satellite massives, capable de recréer des paysages réalistes avec une grande précision topographique, une végétation adéquate, une météo dynamique et une gestion du temps. Du point de vue joueur, la génération procédurale favorise la rejouabilité quasi-infinie en proposant des parties différentes et contribue à renouveler l'expérience utilisateur. Lors du développement, la génération procédurale permet de réduire les coûts de main d'œuvre et de diminuer les besoins en bande passante et en stockage. Michael Cook a ainsi mis au point Angelina, une intelligence artificielle, capable de créer des jeux, une fois que les règles ont été générées, choisissant le thème, les couleurs, les musiques et en produisant les objets.

■ **Le cinéma, l'audiovisuel et les jeux vidéo, des secteurs générateurs de revenus qui nécessitent d'intégrer les dernières technologies pour renouveler l'expérience utilisateur**

Dans le secteur des loisirs et culture, le cinéma et les jeux vidéo sont les premiers à se positionner sur les nouvelles technologies de conception pour faire évoluer l'expérience de l'utilisateur. Selon l'étude du cabinet BIPE, les secteurs du cinéma, de l'audiovisuel, des jeux vidéo et de la vidéo représentent une part du PIB français comparable à celui de la construction automobile et supérieure à celui de l'industrie pharmaceutique avec une valeur ajoutée directe de 8,5 Md € en 2012. Au-delà même des chiffres, l'efficacité de ces secteurs se mesure à la visibilité et à la démocratisation croissante de la culture française en France et dans le monde.

■ **Une « French touch » reconnue à l'international**

La filière est organisée autour de nombreuses PME qui représentent, pour une grande partie d'entre elles, la valeur ajoutée de la création de contenus française. La fameuse « French Touch » existe toujours et les acteurs locaux ont souvent une vision plus novatrice que leurs concurrents américains ou asiatiques. En dépit de la complexité de conception des moteurs interactifs qui conduit la plupart des développeurs à acheter des solutions clé en main, les acteurs français continuent à développer leur propre technologie en interne. La France est le premier pays européen représenté au CES 2015 à Las Vegas et le 5e au monde après la Chine, les USA, Taiwan et la Corée avec 120 start-ups. Sur le marché de l'animation 3D, une myriade de start-ups françaises se distingue grâce à des briques technologiques qui améliorent la production d'images : modélisation des foules, intégration d'avatars virtuels directement sur un plateau de tournage, doublures numériques afin de faciliter le travail des studios d'animation… Performer, le logiciel de la start-up DYNAMIXYZ facilite l'animation du visage d'avatars virtuels à partir d'expressions filmées sur un modèle réel et transposées à l'avatar grâce à un modèle statistique. SOLIDANIM est le spécialiste de la motion capture, à l'origine de l'outil SolidTrack qui se présente comme un système de tracking de caméra avec aperçu temps réel d'effets visuels. Le secteur français est particulièrement dynamique comme en témoigne le nombre d'entreprises créées : MERCENARIES ENGINEERING, à l'origine d'un nouveau moteur de rendu 3D, solution professionnelle de rendu, de lookdev et d'illumination qui combine flexibilité et réalisme, EISKO (anciennement l'AGENCE DE DOUBLURES NUMERIQUES) qui garantit le réalisme d'une doublure numé-

rique dans un film ou un jeu-vidéo. Même si le marché est dominé par AUTODESK, les acteurs français (studios de production d'animation et de jeu vidéo notamment) se sont ménagés une place de choix en développant leurs propres briques technologiques pour optimiser les logiciels du poids lourd du secteur. Ces technologies soutiennent le développement et renforcent la compétitivité des entreprises françaises en permettant d'améliorer la qualité des produits et de diminuer leur coût de production. Si la créativité et l'innovation des acteurs français sont reconnues internationalement, leurs développements techniques répondent autant à des besoins technologiques pointus et spécifiques qu'à une logique économique lié à la croissance forte des coûts de production ainsi qu'une perte de compétitivité face à la concurrence fiscale de pays étrangers comme le Canada, la Belgique, L'Irlande ou bien encore les pays du sud-est asiatique…

■ Les technologies de rendu en temps réel au cœur de l'image 3D

Preuve de l'intérêt de cette technologie pour l'audiovisuel, le congrès du CILECT (Centre International de Liaison des Écoles de Cinéma et de Télévision) en octobre 2014 était axé sur la thématique de la « prévisualisation». La prévisualisation est un outil de communication interne à l'équipe qui permet d'agir en direct sur les éléments d'une scène et qui réduit considérablement les coûts de production par rapport aux méthodes traditionnelles de tracking et de compositing. Des entreprises françaises commercialisent déjà des solutions de prévisualisation à l'instar de Studio20 qui propose l'outil Previzion, développé par Lightcraft Technologie. Previzion[5] permet d'afficher la scène sur fond vert et le décor 3D avec un precompositing en temps réel, puis les scènes sont enregistrées et intégrées dans le processus de post-production classique. Le secteur français s'implique fortement dans cette technologie comme en témoigne Previz[6], projet collaboratif labellisé par trois pôles (Cap Digital, Imaginove, Images et Réseaux) et soutenu financièrement dans le cadre du programme du Fonds Unifié Interministériel (FUI). Le consortium qui rassemble plusieurs industriels (Technicolor, Ubisoft, SolidAnim, Loumasystems, Polymorph) et des laboratoires (Insa Rennes, CNRS-LIRIS, Gipsa-lab et l'ENS Louis Lumière) a pour objectif la réalisation d'une plate-forme innovante de prévisualisation en temps réel pour la production de contenus à effets spéciaux (VFX). Le rendu 3D et temps réel a donc une importance croissante dans les industries de l'image.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les Technologies de conception de contenus et d'expériences sont :	
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale

Les technologies influencées par les Technologies de conception de contenus et d'expériences sont :	
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
10	Cobotique et humain augmenté
12	Robotique autonome
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale

Les technologies de conception de contenu et d'expérience s'appuient sur des technologies immersives comme le son 3D ou les interfaces haptiques et sur l'intelligence artificielle comme la modélisation comportementale avec la création d'avatars virtuels intelligents. Ces technologies sont traitées dans les fiches correspondantes «Technologies immersives » et «Intelligence artificielle ».

Les marchés

L'essor de ces technologies s'inscrit sur plusieurs marchés du secteur Loisirs et culture:

- Le tourisme avec la génération d'expérience, l'e-tourisme, la traduction automatique, l'amélioration de l'accessibilité au musée ;
- Les industries créatives et culturelles (cinéma, audiovisuel, jeu vidéo) ;
- La formation professionnelle avec le serious game (apprentissage, formation, simulation…)
- La communication (institutionnelle et publicité) et l'évènementiel.

Ces technologies sont beaucoup utilisées par les industries du divertissement comme le cinéma, le jeu vidéo, la documentation d'objets culturels mais se démocratisent dans d'autres secteurs que celui des loisirs. À titre d'exemple, les scanners 3D sont de plus en plus populaires en architecture avec l'apparition de scanners portables qui permettent de préserver et d'archiver de nombreuses pièces de musée et de les mettre en scène dans des musées virtuels. Les scanners 3D servent également à la conception industrielle, au rétro-engineering, à la conception de prothèses, pour le contrôle qualité,… La « machine vision », technologie qui utilise la capture d'image et l'analyse pour automatiser des tâches d'inspection visuelle, est une tendance forte qui devrait être largement utilisé dans les programmes de recherche dans les industries. Des solutions de capture de mouvement initialement utilisées pour l'industrie de l'image trouvent des applications sur d'autres marchés (biologie, santé, sécurité, habitat …), hors du périmètre « Loisir et culture ».

Le marché mondial de l'imagerie 3D (modélisation 3D, scan 3D et technologies de rendu 3D) devrait croître de 3,01 milliards de dollars en 2013 à 9,82 Md $ en 2018 avec une part de marché importante pour les technologies de rendu 3D[7]. Le marché mondial du scan 3D est estimé à 2,06 Md $ en 2013 et devrait approcher les 4,08 Md $ en 2018[8]. Le marché du scan 3D est par ailleurs tiré par la demande croissante des industries des médias et du divertissement, cette technologie offrant des résultats rapides, efficaces et précis. La croissance des contenus 3D associée aux développements technologiques a conduit au lancement rapide de produits avec des images de haute qualité. La conversion facilitée des nuages de points en données de conception assistée par ordinateur, les prix de plus en plus bas et l'efficacité croissante des logiciels utilisés ont accéléré l'adoption de la numérisation 3D.

Les défis technologiques à relever

Avec la concentration de toutes les applications sur les *smartphones* des « digital natives », les interfaces doivent s'adapter au phénomène de convergence digitale[9] et proposer des versions iOS et Android à l'instar de Coyote[10]. Usagers, producteurs, diffuseurs, développeurs, industriels, sont aujourd'hui à l'étape cruciale de la convergence numérique, née de l'interopérabilité et de l'interconnexion des technologies et des supports, qui pose la problématique de l'adaptation des formats. Il est indispensable aujourd'hui d'être multiplateformes, multi format afin de répondre aux nouveaux usages : le contenu doit être lisible et disponible à tout moment, quel que soit le device utilisé. Les usages et les modes de création de contenus s'en trouvent profondément modifiés. Jusqu'alors, l'usager juxtaposait ses pratiques car la distinction entre médias était bien marquée quant à la nature des contenus. Dans un univers technologique interconnecté, le consommateur passe d'un média à l'autre de manière transparente pour y trouver le même type de biens et de services informationnels

5 – STUDIO20 : « Concept ». < http://studio20.pro/workflow/ >

6 – Technicolor R&D France : « Previz ». < http://previz.eu/ >

7 – MARKETSANDMARKETS. « 3D Imaging Market [3D Modeling; 3D Scanning; 3D rendering; Layout and Animation; Image Reconstruction] : Global Advancements, Market Forecasts and Analysis (2013 - 2018) ». <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-imaging-market-998.html>

8 – MARKETSANDMARKETS : « 3D Scanning Market ». <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/3d-scanning.asp>

9 – JENKINS H., 2006 : *Convergence Culture, where old and new media collide*, New York, New York University Press, 368p.

10 – USINE DIGITALE. « Le casse-tête du design de l'interface du Coyote S, l'avertisseur avec caméra embarquée ». <http://www.usine-digitale.fr/article/le-casse-tete-du-design-de-l-interface-du-coyote-s-l-avertisseur-avec-camera-embarquee.N295002>

désormais libérés des contraintes liées au support technique (mobile, tablette, etc.). La convergence technologique va donc peu à peu conduire à la convergence culturelle entre anciens et nouveaux médias.

■ L'implémentation des nouvelles technologies comme le PBR pour des moteurs de jeu toujours plus performants

Les moteurs de jeux sont en constante évolution et doivent s'adapter à l'évolution des jeux vidéo en prenant en charge les jeux de réalité virtuelle conçus pour l'Oculus rift et en intégrant la possibilité de gérer du code entre plusieurs utilisateurs et appareils (sur un mode collaboratif) comme la dernière version d'Unity Pro. Ainsi le PBR (Physically Based rendering) existe depuis près de dix ans mais a été assez peu utilisé. Il s'agit d'un standard d'équations qui reproduisent plus fidèlement la lumière dans les jeux vidéo, en prenant en compte l'environnement qui entoure les objets. Avec ce nouvel outil sur lequel reposent tous les graphismes d'un moteur 3D, les reflets sur les matières sont donc beaucoup plus naturels. Avec la recherche de l'hyperréalisme cette technologie devrait connaître des développements importants dans les années à venir.

■ Gérer l'intégration de la génération procédurale dans la conception des jeux vidéo

La génération procédurale expose le jeu au risque de présenter des bugs ou des niveaux de jeux incohérents malgré l'utilisation d'algorithmes de tests pour vérifier la faisabilité des niveaux. À l'heure actuelle, les ordinateurs ne sont pas capables de prendre en charge un monde de jeu vidéo infini ce qui implique de choisir de façon pertinente certaines parties du jeu uniquement qui feront appel à de la génération procédurale.

■ Améliorer la précision de la capture 3D

La capture 3D est confrontée à des problématiques de taux d'erreur et de degré de précision qui nécessitent un affinage et un recadrage des images via des logiciels adaptés. Ces problématiques de précision sont en partie imputables à la stabilité des drones qui devra être renforcée pour augmenter les performances du scan 3D notamment.

■ Les défis des technologies de rendu temps réel

Selon un talk de Johan Andersson à l'occasion du Siggraph 2012, les défis pour les technologies de rendu temps réel pour les dix ans à venir concernent l'amélioration des images pour parvenir à une qualité cinématographique, la gestion de la lumière, la programmabilité des pipelines graphiques des GPU, la réduction des coûts de production et la mise à l'échelle 3D des objets (détail, résolution et puissance). L'amélioration des images passe par des progrès au niveau des GPU sur l'anticrénelage, le flou cinétique et le flou d'arrière-plan, le rendu de la transparence. Des progrès restent à faire pour la représentation de matériaux mous et des liquides. En ce qui concerne la lumière, les axes de perfectionnement concernent le rendu des ombres, des reflets et l'illumination dynamique globale. L'intégration croissante du PBR (Physically Based Rendering) dans les moteurs de jeux contribue à reproduire plus fidèlement la lumière dans les jeux vidéo, en prenant compte l'environnement qui entoure les objets. La diminution des coûts de production implique de réduire le temps passé sur la conception du contenu des jeux vidéo en utilisant notamment la génération procédurale pour la texture, la géométrie…

■ Les mécanismes cognitifs

L'ensemble des « outils » qui permettent de développer la connaissance (attention, conscience, mémoire, émotion, actions,…) fait l'objet de recherches importantes notamment au sein du laboratoire EMC à Lyon. À l'avenir, il devrait s'agir d'intégrer en plus du design fonctionnel et des images de plus en plus réalistes, le design émotionnel qui sert à transmettre de l'humanité, de la proximité, de l'empathie dans les interfaces. Si la mise en œuvre et les applications marché ne sont pas encore opérationnelles, gageons que leur intégration, notamment dans le traitement de l'information, aura des effets importants sur les expériences utilisateurs des prochaines années.

■ La gestion de la volumétrie des données

La croissance exponentielle des données liée aux technologies de conception de contenu (rendu temps réel, données 3D, modélisation et simulation, capture 3D…) implique un véritable changement d'échelle dans les volumes de données et la complexité des calculs. Il est donc nécessaire de repenser la façon de capturer, stocker et récupérer les données pour qu'elles servent à créer plus de valeur. Que ce soit pour des plateformes de jeu de plus en plus complexes ou bien la qualité croissante des images calculées dans le cinéma d'animation (données 3D, texture, lumière…), la gestion et la manipulation des données produites sont fondamentales pour les prochaines générations de productions. Travailler de manière connectée à plusieurs personnes en même temps depuis plusieurs sites ou bien réutiliser les

données pour différentes productions sont des atouts majeurs de productivité et de souplesse permettant une allocation dynamique des taches de production.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

■ Une intégration des technologies qui doit convaincre les consommateurs via l'expérience utilisateur

Un des défis commerciaux, notamment pour les éditeurs, devrait consister à traduire l'apport des nouvelles technologies (UHD, 3D,…) en valeur ajoutée perceptible par le consommateur lors de l'expérience utilisateur. Ceci est d'autant plus vrai pour des technologies exigeantes, employées dans des jeux à gros budget, qui doivent trouver un marché suffisant pour amortir les frais de conception.

■ Développer des outils technologiques pour l'international

La tendance actuelle est à l'utilisation de briques logicielles commerciales, ce qui a pour effet de faire émerger quelques outils dominants. Les entreprises françaises doivent se saisir de cette opportunité pour valoriser commercialement leurs technologies internes, souvent performantes, créer des effets de volume et rivaliser avec les plus gros acteurs du marché de la technologie des contenus. Les projets HD3D et PlayAll, même s'ils n'ont pas abouti à des solutions commerciales doivent servir d'exemples pour tenter de créer des outils collaboratifs de production de contenu de haut niveau, correspondant aux standards français de la création. Si les créateurs français font l'objet de propositions étrangères intéressantes, les ingénieurs français sont aussi très reconnus à l'étranger. De ce fait, les outils technologiques « made in France » pourraient connaître un succès à l' international. Ces opportunités d'ouverture de marché doivent être prises en compte par les acteurs français.

■ Intégration de la génération procédurale dans la conception des jeux vidéo : conservation de l'expérience utilisateur et acceptation par le consommateur

Le défi de la génération procédurale pour le développeur consiste à générer un monde intéressant et varié, en évitant d'être trop répétitif. L'approche procédurale implique de repenser la durée de vie du jeu qui dépend davantage de la propension du joueur à se lasser que de l'imagination du développeur. Par ailleurs, les studios de production de jeux doivent s'approprier cette technique de génération procédurale et l'exploiter aux bons moments à l'intérieur du jeu pour conserver l'expérience utilisateur. Une fois cet équilibre trouvé, le défi commercial devrait résider dans l'acceptation par le consommateur de mondes qui n'ont pas été désignés à la main, susceptibles d'avoir moins de cohérence.

Les enjeux réglementaires

■ Réglementation fiscale

Si nos éditeurs, distributeurs et producteurs nationaux s'accommodent mal de l'arrivée sur le marché d'acteurs globaux dont les sièges sont implantés à l'étranger et qui parviennent ainsi à se soustraire aux règles françaises, notamment fiscales, c'est aussi le cas de nos industries techniques. Ainsi le Canada a mis en place un crédit d'impôt dédié aux effets spéciaux particulièrement efficace qui vient concurrencer fortement nos meilleurs spécialistes. Par ailleurs, une étude du CNC de 2014 qui portait sur les dispositifs fiscaux d'aide au cinéma et à l'audiovisuel dans sept pays montrait que « *Comparé aux sept dispositifs étudiés, [le français] est le moins attractif sur des critères purement financiers [...] et le plus contraignant* ».

Le temps de la réglementation est beaucoup plus lent que celui de l'innovation numérique, qui n'a jamais été aussi rapide et touche largement le secteur culturel, ce qui rend l'exercice réglementaire tel que nous le connaissons de plus en plus complexe et incertain.

■ Droits d'auteurs et droit à l'image

Avec le développement des technologies de type Scan 3D et de prises de vues *via* drones, il est important là aussi de respecter les droits des auteurs, qu'ils soient architectes ou créatifs au moment de réutiliser leurs œuvres à d'autres fins que l'objet initial.

Analyse AFOM

ATOUTS

Image de marque de la France,

Le poids du cinéma français en production et au box-office (1er européen).

La place des acteurs du jeu vidéo, souvent à la pointe en matière de technologies et de contenus.

3ème producteur mondial d'animation, derrière les États-Unis et le Japon et plus de 40 % du marché de l'animation en Europe.

Formation d'excellence reconnue (Écoles, Universités)

Des laboratoires performants

Plusieurs leaders

FAIBLESSES

Manque de transferts de technologies depuis les laboratoires

Des projets s'inscrivant dans le temps long

Un secteur cyclique

Des entreprises technologiques qui n'ont pas toujours atteint la taille critique face à des acteurs de poids (Adobe, 3DSMax, Disney, etc.)

OPPORTUNITÉS

La culture européenne : les Anglo-Saxons ne savent pas l'appréhender. Cette forte coloration culturelle peut également être une faiblesse pour adresser de nouveaux marchés.

Des technologies diffusables (génération procédurale, modélisation, simulation, expérience utilisateur…) vers d'autres secteurs (santé, habitat, sécurité, environnement, urbanisme…).

MENACES

Un marché européen fragmenté : ce qui représente un verrou pour les autres mais également pour la France

Les acteurs français doivent suivre l'exemple des entreprises étrangères et s'intéresser aux marchés américain et chinois, plus friands de ces technologies, pour des raisons culturelles et financières.

Fort risque de délocalisation : dumping fiscal et production à bas coût dans les pays émergents

Facteurs clés de succès et recommandations

■ Aides publiques et standards ouverts

Pour aider au développement d'outils technologiques de haut niveau et en faciliter l'accès au plus grand nombre, il pourrait être utile de conditionner certaines aides publiques à l'utilisation de standards ouverts et donc accessibles aux autres acteurs. Au travers d'une telle mesure, il s'agit aussi de promouvoir l'interopérabilité des technologies, des terminaux, des fichiers et des droits numériques.

■ Favoriser le rapprochement d'acteurs développant des outils quasiment identiques

En complément de la recommandation ci-dessus, il semble nécessaire de favoriser le rapprochement

d'acteurs, afin d'obtenir une taille critique en phase avec le marché mondial. On met alors en commun des outils, des compétences et des clients au service d'une force de frappe permettant à terme de concurrencer les acteurs mondiaux qui monopolisent ce marché.

■ Développer la visibilité des acteurs à l'international

Les entreprises françaises présentes sur le secteur des outils de création de contenu sont souvent de petites sociétés qui doivent pouvoir avoir accès rapidement à un marché mondial. Renforcer la visibilité de ces acteurs comme par exemple le stand « France Numérique » au Siggraph initiée tous les ans par les 3 pôles de compétitivité Cap Digital, Imaginove et Images & Réseaux, permettra de nouer des partenariats, conquérir de nouveaux marchés et générer rapidement du chiffre d'affaires. Si la taille n'est pas toujours un atout, la visibilité internationale est primordiale (salons, festivals) pour exister sur ce marché mondial.

■ Conserver l'avance technologique et s'ouvrir à d'autres marchés

Les start-ups françaises doivent conserver leur avance technologique car si « les grands studios sont toujours prêts à tester des outils et à les acheter s'ils sont meilleurs que la concurrence », les fournisseurs sont immédiatement remplacés s'ils perdent leur longueur d'avance » selon Renaud Séguier, co-fondateurs de Dynamixyz. Les jeunes start-up peuvent s'ouvrir à d'autres marchés par le biais des projets collaboratifs, encouragés par les pôles de compétitivité, afin d'externaliser l'effort de recherche.

En parallèle, il faut élargir la définition de l'innovation au-delà de la seule R&D technologique : usage, design, modèles économiques, accessibilité... L'innovation se développant par définition dans un contexte d'incertitude, les projets culturels innovants doivent être éclairés par les travaux en cours dans l'univers de la recherche, sur les aspects technologiques mais également sociologiques et comportementaux (économie de la contribution, analyse comportementale, etc.). Il faut promouvoir une « innovation par la cible », prenant d'avantage en compte les besoins de l'usager.

■ Encourager la standardisation

À l'exception des organismes de recherche (Cf. par exemple le fort engagement de l'INRIA au W3C), les acteurs français des industries culturelles et créatives sont en général peu investis dans les instances de normalisation issues du monde de l'internet et du web. Si la mobilisation des éditeurs et diffuseurs TV dans le consortium HbbTV a été un signe positif (prise de conscience de la nécessité de s'unir pour promouvoir sa vision, les éléments fondamentaux de sa création de valeur), ce mouvement touche peu d'autres sphères des luttes d'influences mondiales entre acteurs de l'internet. Ces actions devront être amplifiées.

Par ailleurs, le domaine de la production de contenus suit en général des règles propres à chaque maison/studio de production, aux habitudes de travail des réalisateurs et des sous-traitants auxquels il fait appel. Des standards ou des méthodes reconnues devraient trouver leur place au service du coût des productions.

■ Encourager l'utilisation de ces technologies sur le marché européen

■ Adapter le système fiscal pour éviter la délocalisation de la production

Un des enjeux majeur de compétitivité dans ce secteur consistera à éviter la délocalisation de la production audiovisuelle et cinématographique française vers la Belgique, le Luxembourg, le Canada… en raison notamment des avantages fiscaux et sociaux et de l'internalisation des fonctions de post-production par les agences. Les coûts de production de jeux vidéo sont de plus en plus élevés en raison du recours à des technologies de pointe et constituent une forte barrière à l'entrée. L'édition rencontre les mêmes problématiques de coûts pour la production de livre numérique.

Acteurs clés :

Entreprises	3DEXPERIENCE Platform - Dassault système, 4D View Solutions, Allegorithmic, Dassault Systemes, Dynamixyz, Eisko, Golaem, ISKN, MacGuff, Mercenaries Engineering, MIKROS Images, Motiontree, Novamotion, Quantic Dream, SolidAnim, Technicolor, Ubisoft, Voxygen…
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX…
Instituts Carnot	CEA LIST, INRIA, LAAS CNRS…
Autres centres de recherches	Ecole des Gobelins, ENJMIN, Stratecollege…
Pôles de compétitivité	CapDigital, Images et Réseaux, Imaginove, Systematic…
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	CITIA, Magelis, PARIS ACM SIGGRAPH, Pictanovo, Primi…

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

ANNUAIRE

ALSACE

Fibre Energivie
Pôle de compétitivité
03 29 29 61 89
contact@polefibres.fr
http://www.pole.energivie.eu/fr/formulaire/contact
6 Rue Oberlin, 67000 Strasbourg
Technologies clés : 38, 39, 40, 41, 42

Véhicule du futur
Pôle de compétitivité
03 89 32 76 44
Maison du Technopole - CS 52118, 40 rue Marc Seguin 68060 MULHOUSE Cedex
Technologies clés : 10, 12, 20, 45

Alsace Biovalley
Pôle de compétitivité
03 90 40 30 00
testez@alsace-biovalley.com
550 Boulevard Gonthier d'Andernach, Parc innovation 67400 Illkirch-Graffenstaden
Technologies clés : 14, 15, 26

BeAM
Spi-off de l'Irepa
Entreprise
03 88 65 54 13
contact@beam-machines.com
Pôle API - Parc d'Innovation F-67400 ILLKIRCH
Technologies clés : 9, 43

Cellprothera
Entreprise
03 69 71 97 71
http://www.cellprothera.com/contact-2/
12, Rue du Parc 68100 Mulhouse
Technologies clés : 26, 29

MICA
Institut Carnot
03 89 60 87 04
contact@carnot-mica.fr
15 rue Jean Starcky - BP 2488 - 68057 Mulhouse cedex
Technologies clés : 1, 9

CEED
Centre Européen d'Étude du Diabète
Académique
03 90 20 12 12
association@ceed-diabete.org
Boulevard René Leriche 67200 STRASBOURG
Technologies clés : 31

Eiffage-Clemessy
Entreprise
03 89 32 32 32
clemessy.groupe@clemessy.fr
18 rue de Thann, BP 52499, 68 057 MULHOUSE CEDEX 2
Technologies clés : 42

IHU MIX-Surg
Institut de Chirurgie Guidée par l'Image de Strasbourg
IHU
03 88 11 90 00
http://www.ihu-strasbourg.eu/ihu/contact/
IHU Strasbourg - S/c IRCAD - 1, place de l'Hôpital 67091 Strasbourg Cedex, France
Technologies clés : 14

IPCMS
Institut de Physique et de Chimie de Strasbourg
Académique
03 88 10 70 00
ipcms@ipcms.unistra.fr
23 Rue du Loess STRASBOURG 67034
Technologies clés : 42

Ircad
Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif
Académique
03 88 11 90 00
http://www.ircad.fr/fr/nous-contacter/
IRCAD/EITS - Hôpitaux Universitaires - 1, place de l'Hôpital - 67091 Strasbourg Cedex
Technologies clés : 14

Irepa Laser
Entreprise
03 88 65 54 00
Parc d'Innovation 67 400 Illkirch
Technologies clés : 9

IS2M (Mulhouse)
Institut de Science des Matériaux de Mulhouse
Académique
03 89 60 87 00
15, rue Jean Starcky - BP 2488 - 68057 Mulhouse cedex
Technologies clés : 23

ITAI Aérial
ITAI
03 88 19 15 15
aerial@aerial-crt.com
250 Rue Laurent Fries - Parc d'innovation - CS 40443 - 67412 Illkirch Cedex
Technologies clés : 28

Krinner
Entreprise
03 88 71 48 56
contact@krinner.fr
18 rue du baron Chouard F-67700 Monswiller
Technologies clés : 42

PCE Instrument
Entreprise
09 72 35 37 17
info@pce-france.f
76, Rue de la Plaine des Bouchers 67100 Strasbourg
Technologies clés : 36

Procal FS2I
Entreprise
03 90 20 22 06
http://www.procal.fr/fr/contact
Parc Club des Tanneries 2 rue de la faisanderie 67200 Lingolsheim
Technologies clés : 38

Proteogenix
Entreprise
03 90 20 54 70
contact@proteogenix.fr
15 rue de la Haye 67300 Schiltigheim
Technologies clés : 15

Pyrum Innovations
Start-up
03 88 34 44 13
contact@pyrum.net
279 route de La Wantzenau 67000 Strasbourg
Technologies clés : 15

Rhenovia Pharma
Entreprise
03 89 32 11 80
info@rhenovia.com
Technopole - Mer Rouge Plaza, 20C rue de Chemnitz 68200 Mulhouse Cedex
Technologies clés : 4

Sappel
Entreprise
03 89 69 54 00
67 Rue du Rhône, 68300 Saint-Louis
Technologies clés : 35

Transgene
Entreprise
03 88 27 91 00
communication@transgene.fr
400 Boulevard Gonthier d'Andernach - Parc d'Innovation - CS80166 - 67405 Illkirch Graffenstaden Cedex
Technologies clés : 26

Tryba
Entreprise
03 88 80 29 29
http://www.atrya.com/fr/contact
ZI Le Moulin – 67110 GUNDERSHOFFEN
Technologies clés : 38

Voltec Solar
Entreprise
03 88 49 49 84
info@voltec-solar.com
1, rue des Prés F-67190 DINSHEIM SUR BRUCHE
Technologies clés : 42

BPI Alsace
BPI
03 88 56 88 56
http://contact.bpifrance.fr/#
3, rue de Berne 67300 Schiltigheim
Technologies clés :

Conectus
SATT
03 68 41 12 60
info@satt.conectus.fr
Parc d'Innovation
650 boulevard Gonthier d'Andernach
67400 Illkirch
Technologies clés :

SEMIA
Incubateur
03 68 85 30 30
g.grand@semia-incal.com
4 rue Boussingault
67000 Strasbourg
Technologies clés :

Euroclima
Entreprise
03 88 50 43 38
http://www.euroclima.fr/contact_euroclima.php
AMELEC Sarl
37, av de la gare
67560 ROSHEIM
Technologies clés : 40

DIRECCTE Alsace
DIRECCTE
03 88 14 32 08
alsace-polec@direccte.gouv.fr
http://www.alsace.direccte.gouv.fr/accueil-27
Pôle C, immeuble l'Avancée, 26C Bd du présient Wilson BP 54
Technologies clés :

AQUITAINE

Total
Entreprise
R&D
01 47 44 45 46
http://www.total.com/fr/formulaire-de-contact
Pole d'études et de Recherche de Lacq (PERL), Total E&P
64170 Lacq
Technologies clés : 15, 21, 24

Fonroche Energie
Entreprise
05 53 77 21 31
http://www.fonroche.fr/fr/contact
Zac des champs de Lescaze 47310 ROQUEFORT
Technologies clés : 24, 40, 42

Total
Entreprise
05 59 83 40 00
http://www.total.com/fr/formulaire-de-contact
Avenue Larribau
64000 Pau
Technologies clés : 15, 21, 22

Exosun
Entreprise
05 56 64 09 24
info@exosun.net
Rue Jacques Monod, Technopole Bordeaux Montesquieu 33650 Martillac
Technologies clés : 40, 42

ICMCB
Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux
Académique
05 40 00 26 50
http://www.icmcb-bordeaux.cnrs.fr/spip.php?page=auteur&id_auteur=2&lang=fr
87 Avenue du Dr Albert Schweitzer, 33600 Pessac
Technologies clés : 23, 42

IHU LIRYC
L'Institut de RYthmologie et Modélisation Cardiaque
IHU
contact@ihu-liryc.fr
LIRYC- PTIB Site Xavier Arnozan Avenue du Haut Lévêque 33400 Pessac
Technologies clés : 14, 31

ISIFoR
Institute for the sustainable engineering of fossil resources
Institut Carnot
05 59 40 77 96
Université de Pau et des Pays de l'Adour, Présidence, Avenue de l'Université - BP 576 - 64012 Pau
Technologies clés : 15, 16

Bordeaux Metabolome Platform
Académique
05 57 57 16 83
beatrice.pou-morato@u-bordeaux.fr
Université de Bordeaux
146, rue Léo Saignat, 33076 Bordeaux
Technologies clés : 18

ActionPin
Entreprise
05 58 55 07 00
actionpinaction-pin.fr
Z.I. de Cazalieu - CS 60030 - 40260 CASTETS
Technologies clés : 27

Ademtech
Entreprise
05 57 02 02 01
http://www.ademtech.com/contact.asp
BioParc BIOGALIEN, Bat C 1 étage 27 allée Charles DARWIN 33600 PESSAC
Technologies clés : 1

Aetos
Cluster
05 57 26 76 56
jean-marc.grolleau@fr.thalesgroup.com
25 avenue Gustave Eiffel - F/33608 PESSAC Cedex
Technologies clés : 12

Agri-synergies
Entreprise
05 53 04 59 42
http://www.agrisynergie.com/fr/content/contact
7 Rue Tourville, 24000 Périgueux
Technologies clés : 27

Bigarren Bizi
Start-up
stephane.peys@bigarrenbizi.com
http://www.nirea-recycling.net/?page_id=68
ESTIA 2
Technopole Izarbel
64210 BIDART
Technologies clés : 16

Chaux et Enduits de St Astier
Entreprise
05 53 54 11 25
cesa@c-e-s-a.fr
La Jarthe, 24110 Saint-Astier
Technologies clés : 39

CNRS LBM
Laboratoire de Biogenèse Membranaire
Académique
05 57 12 25 89
UMR 5200 CNRS Université Bordeaux Segalen, Bâtiment A3
INRA Bordeaux Aquitaine,
71 Avenue Edouard Bourlaux
CS 20032, 33140 Villenave d'Ornon
Technologies clés : 31

DataMedCare
Entreprise
http://datamedcare.com/user/login
16 RUE EUGENE OLIBET
33400 TALENCE
Technologies clés : 33

De Sagosse
Entreprise
05 53 69 36 30
groupe@desangosse.com
"Bonnel" - CS 10005 - 47480 PONT DU CASSE
Technologies clés : 27

Fermentalg
Entreprise
05 57 25 02 20
http://www.fermentalg.com/contacts/contacts.html
4 Rue Rivière, 33500 Libourne
Technologies clés : 8

Fly-n-Sense
Entreprise
05 35 54 00 97
25 rue Marcel Issartier, BP 20005, 33702 Mérignac CEDEX
Technologies clés : 2

INEF4
Institut National d'Excellence Facteur 4
ITE
05 59 03 61 29
contact@inef4.com
67, rue de Mirambeau - 64600 ANGLE
Technologies clés : 38

Inserm - laboratoire « Bio-ingénierie tissulaire » de Bordeaux
Académique
05 57 57 14 88
joelle.amedee@inserm.fr
Université Bordeaux Segalen
146, rue Léo-Saignat
Case 45
33076 BORDEAUX cedex
Technologies clés : 9

IPREM (Pau)
Institut pluridisciplinaire de recherche sur l'environnement et les matériaux
Académique
05 40 17 50 00
helene.josse@univ-pau.fr
Technopole Hélioparc, 2 avenue du Président Pierre Angot - 64053 Pau cedex 09
Technologies clés : 23

ITERG
Institut des Corps Gras
CTI
05 56 36 00 44
http://iterg.com/-contact-
11 rue Gaspard MONGE - parc industriel Bersol 2 - 33600 PESSAC
Technologies clés : 8

LISA
Lipides pour l'industrie et la Santé
Académique
Institut Carnot
05 56 02 59 62
http://www.lisa-carnot.eu/spip.php?page=contact
ITERG - 11 Rue Gaspard Monge - Parc Industriel Bersol 2 - 33600 PESSAC
Technologies clés : 26

Lixol
Entreprise
05 56 54 14 78
lixol@wanadoo.fr
Zone Industrielle -525, Boulevard de l'Industrie 33260 LA TESTE DE BUCH
Technologies clés : 1

Metabohub
Académique
05 57 12 26 68
contact@metabohub.fr
Centre INRA Bordeaux-Aquitaine - 71 Av. Edouard Bourlaux – CS 30032 - 33140 Villenave d'Ornon
Technologies clés : 18

Navarra TS - groupe Vinci
Entreprise
05 57 26 69 20
18 Avenue Gustave Eiffel 33600 Pessac
Technologies clés : 37

Plastinov
Entreprise
05 53 64 22 22

plastinov@plastinove.fr
ZAC Marmande Sud 47250
SAMAZAN
Technologies clés : 43

Route des Lasers
Pôle de compétitivité
05 57 01 74 50
contact@routedeslasers.com
Pôle Route des Lasers - Institut d'optique d'Aquitaine - Rue François Mitterrand -33400 TALENCE
Technologies clés : 36

Smart Grid Energy
Réseau
05 31 60 01 31
https://www.smartgridenergy.fr/contact
7 rue de la Palinette
ZA Les Deux Pins - Porte A'
40130 Capbreton
Technologies clés : 22

Solvay - Laboratory of the Future
Entreprise
R&D
05 56 46 47 56
178, avenue du Dr Schweitzer
F-33608 Pessac
Technologies clés : 18

Sysolia
Cluster
05 56 15 80 06
contact@sysolia.com
6 allée du Doyen Georges Brus
33600 PESSAC
Technologies clés : 42

Vivagro
Entreprise
05 57 78 32 68
Espace France - Bat. C, 4, voie Romaine, 33610 Canejan
Technologies clés : 27

Xamen
Start-up
09 80 79 59 95
http://www.xamen.fr/index.php/fr/contact
28, rue des Laurets 64 000 PAU
Technologies clés : 12

Xylofutur
Pôle de compétitivité
05 56 81 54 87
http://xylofutur.fr/contactez-nous/
Campus Bordeaux Sciences Agro, 1 cours du Général de Gaulle – CS 40 201 - 33170 GRADIGNAN
Technologies clés : 39

Aquitaine Science Transfert
SATT
05 56 42 94 85
contact@ast-innovations.com
Centre Condorcet
162, avenue du Docteur Albert Schweitzer
33600 Pessac
Technologies clés :

BPI Aquitaine
BPI
05 56 48 46 46
http://contact.bpifrance.fr/#
Immeuble Bordeaux Plaza 1, place Ravezies - BP 50155 33042 Bordeaux Cedex
Technologies clés :

IRA
Incubateur
05 40 00 33 33
b.greno@incubateur-aquitaine.com
Université Bordeaux I
Domaine du Haut Carré
351 cours de la Libération
33405 Talence cedex
Technologies clés :

Pôle Avenia
Pôle de compétitivité
05 59 84 81 10
http://www.pole-avenia.com/contact-2/
POLE AVENIA Technopôle Hélioparc, Avenue du Président Pierre Angot, 64053 Pau cedex 09
Technologies clés :

ENSC
École nationale supérieure de cognitique
Académique
05 57 00 67 00
contact@ensc.fr
109 avenue Roul, CS 40007, 33405 TALENCE CEDEX
Technologies clés : 10

Toray CFE
Toray Carbonne Fibre Europe
Entreprise
05 59 60 71 00
http://www.toray-cfe.com/fr/2015-04-10-20-19-00/nous-contacter.html
Route de Lagor Abidos 64150
Technologies clés :

DIRECCTE Aquitaine
DIRECCTE
05 56 69 27 45
aquit-polec@direccte.gouv.fr
http://www.aquitaine.direccte.gouv.fr/accueil-2
Pôle C 118 Cours du Maréchal Juin
TSA 10001
Technologies clés :

AUVERGNE

Céréales Vallée
Pôle de compétitivité
04 73 33 71 90
info@cereales-vallee.org
Biopôle Clermont-Limagne , Rue Emile Duclaux 63360 Saint-Beauzire
Technologies clés : 26, 27

Limagrain
Entreprise
04 73 63 40 00
http://www.limagrain.com/fr/contact-limagrain-a-votre-ecoute
Biopôle Clermont-Limagne Rue Henri Mondor 63360 Saint Beauzire
Technologies clés : 8, 26

METabolic Explorer
Entreprise
04 73 33 43 00
contact@metabolic-explorer.com
Biopôle Clermont-Limagne 63360 Saint-Beauzire
Technologies clés : 8, 26

Michelin
Entreprise
04 73 32 20 00
http://www.michelin.com/fre/contacter-michelin
Place des Carmes Déchaux 63040 Clermont-Ferrand Cedex 9
Technologies clés : 6, 25

Plateforme d'Exploration du Métabolisme
Académique
04 73 62 48 12
marc.ferrara@clermont.inra.fr
INRA Site de Theix
63122 SAINT-GENÈS-CHAMPANELLE
Technologies clés : 18

Allegorithmic
Entreprise
04 73 34 70 80
https://www.allegorithmic.com/contact
31 rue Gonod 63000 Clermont-Ferrand
Technologies clés : 47

Biobasic Environnement
Entreprise
09 72 29 08 71
info@biobasicenvironnement.com
Biopôle Clermont-Limagne 63360 Saint-Beauzire
Technologies clés : 37

Carbios
Entreprise
04 73 86 51 76
contact@carbios.fr
Biopôle Clermont-Limagne 63360 Saint-Beauzire
Technologies clés : 8

Catopsys
Start-up
09 72 31 86 11
contact@catopsys.com
R&D HEADQUARTER - Plateforme Technologique de l'ISIMA - Les Cézeaux -63170 Aubière, France
Technologies clés : 14

Florepro « Flores protectrices »
RMT
Réseau - Coordination par l'ADIV
souad.christieans@adiv.fr
10 rue Jacqueline-Auriol, ZAC des Gravanches
63039 Clermont-Ferrand Cedex 2
Technologies clés : 28

Institut de Recherche Pharmabiotiques
Académique
04 71 45 57 69
http://www.pharmabiotic.org/contact
100 rue de l'Egalité - Locaux IUT Biologie Appliquée - 15000 AURILLAC
Technologies clés : 28

ITAI ADIV
Agro-Industriel des Filières Viandes
ITAI
04 73 98 53 80
http://www.adiv.fr/include/nous-contacter.php
10 rue Jacqueline Auriol - ZAC des Gravanches - 63039 Clermont-Ferrand Cedex 2
Technologies clés : 28

LASMEA
Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Électronique, et d'Automatique
Académique
lasmea@lasmea.univ-bpclermont.fr
Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand II)
24 Av des landais
63177 Aubière Cedex
Technologies clés : 2

Neuronax
Entreprise
04 73 44 94 30
CBRV / Faculté de Médecine, 28 Place Henri Dunant, 63000 Clermont-Ferrand
Technologies clés : 29

Phenix System
Entreprise
04 73 33 45 85
http://www.phenix-systems.com/en/contact-us?sid=18301
Parc Européen d'Entreprises, Rue Richard Wagner, 63200 Riom
Technologies clés : 9

Polytech Clermont Ferrand
Académique
04 73 40 75 00
Campus universitaire des Cézeaux - 2, av. Blaise Pascal - TSA 60026 - CS 60026 - 63178 AUBIÈRE cedex
Technologies clés : 39

Viaméca
Pôle de compétitivité
04 27 04 50 69
contact@viameca.fr
Parc technologique La Pardieu c/o Maceo 14 avenue Léonard de Vinci 63000 Clermont-Ferrand
Technologies clés : 9, 10

BPI Auvergne
BPI
04 73 34 49 90
http://contact.bpifrance.fr/#
Parc technologique La Pardieu - Immeuble Olympe 17bis, allée Alan Turing 63170 Aubière
Technologies clés :

BUSI
Incubateur
04 73 64 43 57
mrongere@busi.fr
Biopôle Clermont-Limagne
63360 Saint Beauzire
Technologies clés :

SATT Grand Centre
SATT
04 73 75 89 27
8 Rue Pablo Picasso, 63000 Clermont-Ferrand
Technologies clés :

DIRECCTE Auvergne
DIRECCTE
04 73 43 14 14
auver-polec@direccte.gouv.fr
http://www.auvergne.direccte.gouv.fr/accueil-19
Pôle C Cité administrative 2 rue Pélissier Bâtiment P
Technologies clés :

BASSE-NORMANDIE

TES
Transactions Electroniques Sécurisées
Pôle de compétitivité
02 31 53 63 30
contact@pole-tes.com
2 esplanade Anton Philips, Campus EffiScience 14460 Colombelles
Technologies clés : 2, 4, 7, 13, 20, 34

ENSICAEN
Académique
02 31 53 29 48
delegue.recherche@ensicaen.fr
6, boulevard Maréchal Juin
CS 45053
14050 CAEN cedex 04
Technologies clés : 19, 34

Aten
Structure d'interface
02 31 95 92 92
http://www.pole-aten.fr/contact
CRMA-BN 10-14 rue Claude Bloch
14000 Caen
Technologies clés : 6

Aykow
Start-up
09 50 48 96 47
info@aykow.fr
7 rue Alfred Kastler 14000 CAEN
Technologies clés : 36

GREYC
Groupe de recherche en informatique, image, automatique et instrumentation de l'Université de Caen
Académique
02 31 56 74 86
contact@greyc.fr
Université de Caen Basse-Normandie - Campus Côte de Nacre, Boulevard du Maréchal Juin - CS 14032 - 14032 CAEN cedex 5
Technologies clés : 11

ITAI Actalia
ITAI
02 33 06 71 71
130 rue Louise Michel - CS 82109 - 50 009 SAINT-LÔ
Technologies clés : 28

Laboratoire GREYC - ENSICAEN
Académique
02 31 56 74 86
contact@greyc.fr
https://www.greyc.fr/fr/node/10
ENSICAEN
6 Boulevard du Maréchal Juin
CS 45053
14050 CAEN cedex 4
Technologies clés : 34

Laboratoires Standa
Entreprise
02 31 74 54 89
standa@standa-fr.com
68 rue Robert Kaskoreff 14050 Caen
Technologies clés : 28

Maison France Confort
Entreprise
02 33 80 66 66
2, route d'Ancinnes - BP 17 - 61001 ALENCON CEDEX
Basse-Normandie
Technologies clés : 38

NUVIA Process
Entreprise
02 33 01 56 80
contact-process@nuvia.fr
ZA la Fosse Yvon - BP 907 - 50449 Beaumont Cedex
Technologies clés : 44

SCNAsolar
Entreprise
02 33 85 15 15
http://www.scnasolar.com/contactez-nous/
Parc d'activités de Sainte-Anne
61190 TOUROUVRE
Technologies clés : 42

Université de Caen - CIREVE
Centre interdisciplinaire de réalité virtuelle
Académique
02 31 56 62 38
philippe.fleury@unicaen.fr
Université de Caen Normandie / Esplanade de la Paix / CS 14032 / 14032 CAEN cedex 5
Technologies clés : 14

BPI Basse-Normandie
BPI
02 31 46 76 76
http://contact.bpifrance.fr/#
616, rue Marie Curie 14200 Hérouville-Saint-Clair
Technologies clés :

Hippolia
Pôle de compétitivité
02 31 94 94 20
http://pole-hippolia.org/le-pole/nous-contacter/
Pôle Hippolia - La Maison du cheval - 6 avenue du Maréchal Montgomery 14000 CAEN
Technologies clés :

Normandie Incubation
Incubateur
02 31 56 69 32
protin.incubateur@unicaen.fr
Centre d'Innovation Technologique
17 rue Claude Bloch
BP 55027
14076 Caen cedex 5
Technologies clés :

DIRECCTE Basse normandie
DIRECCTE
02 31 46 00
bnorm-polec@direccte.gouv.fr
http://www.basse-normandie.direccte.gouv.fr/accueil-29
Pôle C 6 rue de Courtonne
Technologies clés :

BOURGOGNE

Vitagora
Pôle de compétitivité
03 80 78 97 91
vitagora@vitagora.com
Maison des Industries Alimentaires de Bourgogne - 4 Bd Docteur Jean Veillet - BP 46524 - 21065 DIJON Cedex
Technologies clés : 2, 28

Bennefficience
Filiale groupe Elithis
Entreprise
Conseil
03 80 43 52 02
TOUR ELITHIS 1 C BOULEVARD DE CHAMPAGNE 21000 DIJON
Technologies clés : 40

FrancEole
Entreprise
03 85 77 98 00
http://www.franceole.com/contact-2/contact/
100 Allée Hubert Curien 71200 Le Creusot
Technologies clés : 43

Global Sensing Technologies
Entreprise
03 80 37 17 95
technical@gsensing.eu
14 rue Pierre de Coubertin, 21000 Dijon
Technologies clés : 2

INRA (réseau INDRES)
Académique
xavier.daire@dijon.inra.fr
http://www.dijon.inra.fr/infos/

contact/2469
17 rue Sully 21065 Dijon
Technologies clés : 28

Le2i
Laboratoire Electronique, Informatique et Images
Académique
03 80 39 36 91
dorielle.batis@u-bourgogne.fr
UFR Sciences et Techniques, allée Alain Savary, 21000 Dijon, France
Technologies clés : 14

Pôle Nucléaire de Bourgogne
Pôle de compétitivité
03 85 42 36 90
http://www.polenucleairebourgogne.fr/contact/
1 Avenue de Verdun - BP 60190 - 71105 Chalon sur Saône Cedex
Technologies clés : 44

RB3D
Entreprise
03 86 46 92 58
43 avenue de Paris 89470 MONETEAU
Technologies clés : 10

Spartacus 3D
Groupe Farinia
Start-up
06 77 79 06 07
Route des Forges BP 2, F- La Clayette", 71800 France
Technologies clés : 9

BPI Bourgogne
BPI
03 80 78 82 40
http://contact.bpifrance.fr/#
13, rue Jean Giono BP 57407 21074 Dijon Cedex
Technologies clés :

PREMICE
Incubateur
03 80 40 33 33
thomas.dupont@premice-bourgogne.com
Maison Régionale de l'Innovation
64A rue Sully
CS 77124
21071 Dijon cedex
Technologies clés :

SATT Grand Est
SATT
03 80 40 34 80
Maison Régionale de l'Innovation – 64 A, rue Sully – CS 77124 – 21071 Dijon Cedex
Technologies clés :

Inpal Industries
Entreprise
04 78 69 63 20
contact@inpal.com
http://www.inpal.com/fr/Contact-Inpal-Energie.html
12 Rue des Grahuches, 89100 Sens
Technologies clés : 40

DIRECCTE Bourgogne
DIRECCTE
03 80 76 99 10
bourg-polec@direccte.gouv.fr
http://www.bourgogne.direccte.gouv.fr/polec
Pôle C 19 bis-21, Bd Voltaire BP 81110
Technologies clés :

Images et Réseaux
Pôle de compétitivité
02 96 48 31 55
4 rue Ampère , 22300 Lannion
Technologies clés : 3, 4, 6, 7, 11, 13, 14, 22, 34, 47

BRETAGNE

B-COM
IRT
02 56 35 88 00
http://b-com.com/fr/contact
ZAC des Champs Blancs 1219 avenue Champs Blancs 35510 Cesson-Sévigné
Technologies clés : 5, 6, 7, 11, 13, 14, 19, 34, 47

Delta Dore
Entreprise
02 99 73 45 17
http://www.deltadore.fr/services/contact
Le Vieux Chêne 35270 Bonnemain
Technologies clés : 5, 38, 40

Mensia Technologies
Start-up
02 99 84 72 59
contact@mensiatech.com
BP 97143 Place du Granier
35571 Chantepie Cedex, France
Technologies clés : 29, 31, 33

Artefacto
Entreprise
02 23 46 46 60
http://www.artefacto-ar.com/contact/
2, route du Gacet 35 830 Betton
Technologies clés : 5, 14

Dynamixyz
Entreprise
02 99 12 18 01
80 Avenue des Buttes de Coësmes, 35700 Rennes
Technologies clés : 11, 47

Golaem
Entreprise
02 99 27 21 40
contact@golaem.com
Bâtiment Germanium - 80 avenue des Buttes de Coësmes - 35 700 Rennes
Technologies clés : 4, 47

Optinvent
Start-up
02 99 87 10 66
http://optinvent.com/contact
80 avenue des Buttes de Coesmes 35700 RENNES
Technologies clés : 5, 14

3D sound Labs
Start-up
01 40 60 75 37
hello@3dsoundlabs.com
http://3dsoundlabs.com/contact/
CENTRE D AFFAIRES ALIZES-22 RUE DE LA RIGOURDIERE 35510 CESSON SEVIGNE
Technologies clés : 14

BioArmor
Entreprise
02 96 32 04 33
http://bioarmor.com/contact/formulaire-contact/
Zone industrielle de la Gare - 22940 PLAINTEL
Technologies clés : 28

Blue Solutions (ex-BATSCAP)
Appartient au groupe Bolloré
Entreprise
01 46 96 46 73
ODET 29500 ERGUE GABERIC
Technologies clés : 23

CityzenData
Start-up
contact@cityzendata.com
ZONE DE PRAT PIP NORD - 55 Rue Charles Nungesser, 29490 Guipavas
Technologies clés : 3

FEM
France Énergie Marine
ITE
02 98 49 98 69
contact@france-energies-marines.org
15 rue Johannes Kepler - Technopôle Brest Iroise 29200 BREST
Technologies clés : 43

Goëmar
Entreprise
02 99 19 19 19
PARC TECHNOPOLITAIN ATALANTE - CS 41908 SAINT MALO - 35400 SAINT MALO
Technologies clés : 27

Insa de Rennes
Académique
02 23 23 82 00
20 Avenue des Buttes de Coësmes - CS 70839 - F – 35708 Rennes Cedex 7
Technologies clés : 6

Institut d'Electronique et de Télécommunication de Rennes
Académique
02 23 23 69 69
eric.moricet@univ-rennes1.fr
Eric MORICET - Bât: 11C. Pièce: 109 - Université de Rennes 1 - Campus de Beaulieu - 263 Avenue du Général Leclerc - CS 74205 - 35042 RENNES Cedex
Technologies clés : 6

IonWatt
Start-up
06 34 48 29 76
fhr@ionwatt.com
11 ALLEE DE BEAULIEU 35000 RENNES
Technologies clés : 23

IRISA
Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires
Académique
02 99 84 71 00
contact@irisa.fr
Campus universitaire de Beaulieu - 263 Avenue du Général Leclerc - CS 74205 - 35042 RENNES Cedex
Technologies clés : 6

ITAI Adria Développement
ITAI
02 98 10 18 18
adria.developpement@adria.tm.fr
ZA Créach Gwen - 29196 QUIMPER CEDEX
Technologies clés : 28

Laboratoire des Sciences chimiques de Rennes
Académique
02 23 23 38 88
sg-umrcnrs6226__AT__univ-rennes1.fr
Institut des Sciences Chimiques de Rennes - UMR6226 - 263, avenue du Général Leclerc, Campus de Beaulieu - Bâtiment 10B, 35042 Rennes Cedex
Technologies clés : 36

Lacroix Sofrel
Entreprise
02 99 04 89 00
telecontrol@sofrel.com
2, rue du Plessis 35770 Vern-sur-Seiche
Technologies clés : 35

LGCGM
Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique - Université Rennes 1/ Insa Rennes
Académique
02 23 23 87 40
Anne.Foutel-Richard@insa-rennes.fr
INSA de Rennes Bât 7 - 20 Avenue des Buttes de Coësmes - CS 70839 - 35708 RENNES Cedex 7
Technologies clés : 39

Nass & Wind
Entreprise
02 97 37 56 06
http://nassetwind.com/?page_id=349
1 rue d'Estienne d'Orves, Base de Keroman 56100 LORIENT
Technologies clés : 43

Pôle Mer Bretagne Atlantique
Pôle de compétitivité
02 98 05 63 17
http://www.pole-mer-bretagne-atlantique.com/fr/contact
40 Rue Jim Sévellec, 29200 Brest
Technologies clés : 43

Polymaris
Entreprise
02 98 88 04 57
Aéropôle Centre 29600 Morlaix
Technologies clés : 8

Ponsel
Entreprise
02 97 89 25 30
ZA de Bellevue - 35 rue Michel Marion 56850 CAUDAN
Technologies clés : 35

Saltel
Entreprise
02 23 41 64 12
contact@saltel-industries.com
Campus de Ker Lann - Rue Siméon Poisson 35170 Bruz
Technologies clés : 15

Silia VL
Entreprise
02 96 05 80 50
contact@sillia.com
4 Avenue Pierre Marzin 22300 LANNION
Technologies clés : 42

Siradel
Entreprise
02 23 48 05 00
http://www.siradel.com/fr/contact/
2 Parc de Brocéliande 35760 Saint-Grégoire
Technologies clés : 6

TDF
Télédiffusion de France
Entreprise
xavier.colas@tdf.fr
TDF DIRECTION TECHNIQUE - Rennes Atalante Beaulieu, 2 rue du Clos Courtel CS 37716 - 35577 CESSON-SEVIGNE CEDEX
Technologies clés : 6

Vegenov
CRT
02 98 29 06 44
contact@vegenov.com
Penn ar Prat - 29250 Saint Pol de Léon
Technologies clés : 27

Voxygen
Entreprise
02 96 14 12 81
contact@voxygen.fr
Route du Radôme - Pôle Phoenix - Bâtiment B1 - 22560 Pleumeur-Bodou
Technologies clés : 47

BPI Bretagne
BPI
02 99 29 65 70
http://contact.bpifrance.fr/#
6, place de Bretagne CS 34406 35044 Rennes Cedex
Technologies clés :

Emergys
Incubateur
02 99 12 73 73
yy.legoffic@rennes-atalante.fr
15 rue du Chêne Germain
35510 Cesson Sévigné
Technologies clés :

Ouest Valorisation
SATT
0299 87 56 01
info@ouest-valorisation.fr
14 C, rue du pâtis Tatelin
Métropolis 2 CS 80 804
35 708 Rennes Cedex
Technologies clés :

Valorial
Pôle de compétitivité
02 23 48 59 64
valorial@pole-valorial.fr
http://www.pole-valorial.fr/52/divers/contact-et-acces/
Agrocampus Ouest - Bât 16 B - 65 rue de St Brieuc CS 84215 - 35042 RENNES CEDEX
Technologies clés : 27, 28

Sanden
Entreprise
02 90 02 65 30
http://www.sanden-es.com/accueil/contact
4 rue René Dumont
35000 Rennes
Technologies clés : 40

M2S
Mouvement Sport Santé
Académique
02 90 09 15 80
http://m2slab.com/fr/laboratoire/nous-contacter
Avenue Robert Schuman
35170
Bruz
Technologies clés :

DIRECCTE Bretagne
DIRECCTE
02 99 12 22 22
bretag-polec@polec.direccte.gouv.fr
http://www.bretagne.direccte.gouv.fr/accueil-26
Pôle C Immeuble "Le Newton"
3 bis avenue de Belle Fontaine TSA 817751
Technologies clés :

CENTRE

BRGM
Institut Carnot BRGM
Institut Carnot
02 38 64 34 34
3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2
Technologies clés : 2, 15, 16, 36, 37

Pôle DREAM
Pôle de compétitivité
02 38 69 80 52
contact@poledream.org
16 rue Léonard de Vinci - CS 30019 - 45074 Orléans Cedex 2
Technologies clés : 35, 36

S2E2
Pôle de compétitivité
02 47 42 41 21
natacha.brebion-s2e2-ext@st.com
http://www.s2e2.fr/fr/contact
10, rue Thalès de Milet - CS 97 155 - 37071 TOURS Cedex 2
Technologies clés : 22, 40

Antéa France
Entreprise
02 38 23 23 00
ZONE D'AMENAGEMENT CONCERTE DU MOULIN 803 BOULEVARD DUHAMEL DU MONCEAU 45160 OLIVET
Technologies clés : 37

CEA Fontenay-aux-roses
Académique
01 46 54 70 80
http://fontenay-aux-roses.cea.fr/far/Pages/Formulaire-de-contact.aspx
18 Route du Panorama, 92260 Fontenay-aux-Roses
Technologies clés : 44

CEMHTI (Orléans)
Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation
Académique
02 38 25 55 24
dir.cemhti@cnrs-orleans.fr
1D avenue de la Recherche Scientifique 45071 ORLEANS cedex 2
Technologies clés : 23

CERIB
Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton
CTI
02 37 18 48 00
1 rue des Longs Réages CS 10010 FR - 28233 ÉPERNON CEDEX
Technologies clés : 38

Elastopole
Pôle de compétitivité
02 38 45 75 87
http://www.elastopole.com/Contact
5 rue du Carbone - 45072 ORLEANS Cedex 2
Technologies clés : 16

Galys Laboratoire
Entreprise
02 54 55 88 88
http://www.galys-laboratoire.fr/contact
14, rue André Boulle 41 000 BLOIS
Technologies clés : 36

GICC
Génétique Immunothérapie, Chimie et Cancer
Académique
02 47 36 60 79
gicc-cnrs@univ-tours.fr
GICC – UMR 7292 - UFR de Médecine - Bâtiment Vialle - 10 boulevard Tonnellé - BP 3223 - 37032 Tours Cedex 01
Technologies clés : 15

IDDEA Ingénierie
Entreprise
02 38 25 15 62
contact@iddea-ingenierie.fr
289, boulevard Duhamel du Monceau - 45160 OLIVET
Technologies clés : 37

Vergnet
Entreprise
02 38 52 35 60
http://www.vergnet.com/contact.php
12 rue des Châtaigniers 45140 ORMES
Technologies clés : 43

Vermon
Entreprise
02 47 37 42 78
contact@vermon.com
180 rue du Général Renault 37038 Tours
Technologies clés : 14

BPI Centre
BPI
02 38 22 84 66
http://contact.bpifrance.fr/#
32, rue Bœuf Saint-Paterne BP 14537 45045 Orléans Cedex 1
Technologies clés :

Cosmetic Valley
Pôle de compétitivité
02 37 211 211
cosmetic-valley@cosmetic-valley.com
1 place de la Cathédrale 28000 Chartres
Technologies clés : 8

Lanceo
Incubateur
02 38 88 88 71
melodie.fourez@arittcentre.fr
6 rue du carbone
45072 Orléans cedex 2
Technologies clés :

DIRECCTE Centre
DIRECCTE
02 38 72 79 10
dr-centre.direction@direccte.gouv.fr
http://www.centre.direccte.gouv.fr/accueil-24
Pôle C 1 bis, rue Saint Euverte
Technologies clés :

Champagne-Ardenne

ARD
Agro-Industrie Recherche et Développement
Association d'industriels
http://www.a-r-d.fr/contact-38.html
Route de Bazancourt
51110 Pomacle
Technologies clés : 24

3A
Applications Additives Avancées
Entreprise
03 52 18 00 50
info@rm4metal.com
Pôle Technologique de Haute-Champagne - Rue Lavoisier 52800 NOGENT
Technologies clés : 9

Inserm Laboratoire Interface Biomatériaux - Tissus hôtes
Académique
03 26 91 86 42
dominique.laurent-maquin@univ-reims.fr
1, rue du Maréchal Juin
51095 REIMS cedex, France
Technologies clés : 1

Les Chanvrières de l'Aube
Entreprise
03 25 92 31 92
Rue du Général de Gaulle, 10200 Bas sur Aube
Technologies clés : 39

LNIO
Laboratoire de Nanotechnologie et d'Instrumentation Optique, UTT
Académique
03 25 71 56 65
renaud.bachelot @ utt.fr
12 Rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes
Technologies clés : 2

BPI Champagne-Ardenne
BPI
03 26 79 82 30
http://contact.bpifrance.fr/#
Bâtiment Le Naos 9, rue Gaston Boyer 51722 Reims Cedex
Technologies clés :

Incubateur CARINNA
Incubateur
03 26 85 85 44
franck.morel@carinna.fr
14 rue Gabriel Voisin
51100 Reims
Technologies clés :

DIRECCTE Champagne-Ardenne
DIRECCTE
03 26 66 29 65
champ-polec@direccte.gouv.fr
http://www.champagne-ardenne.direccte.gouv.fr/accueil-32
Pôle C 21 Bd Léon Blum BP 26
Technologies clés :

CORSE

Université de Corse
Académique
04 95 45 06 71
myrte@univ-corse.fr
Centre de Recherches Georges Péri Vignola, Route des Sanguinaires, 20000 Ajaccio
Technologies clés : 25

BPI Corse
BPI
04 95 10 60 90
http://contact.bpifrance.fr/#
7, rue du Général Campi BP314 20177 Ajaccio Cedex 1
Technologies clés :

INIZIA
Incubateur
04 95 26 69 96
emmanuel.pierre@iei-inizia.fr
Immeuble Castellani
Quartier Saint Joseph
20290 Ajaccio
Technologies clés :

DIRECCTE Corse
DIRECCTE
04 95 23 90 47
corse.polec@direccte.gouv.fr
http://www.corse.direccte.gouv.fr/Corse
Pôle C 2 chemin de Loretto BP 332
Technologies clés :

Étranger

Ecsel (Artemis - Programme Européen)
Recherche
Réseau international
info@artemis-ia.eu
High Tech Campus 69-3, 5656 AG Eindhoven, Pays-Bas
Technologies clés : 20

IPA
International Probiotics Association
Association
info @ internationalprobiotics.org
http://www.internationalprobiotics.org/contact
Technologies clés : 28

Franche-Comté

LERMPS - UTBM
Académique
03 84 58 30 00
laboratoire.lermps@utbm.fr
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD
90010 Belfort cedex
Technologies clés : 9

BCB Tradical
Entreprise
03 81 47 40 10
contact@bcb-tradical.com
Zone d'aménagement concerté Valentin 25870 CHATILLON LE DUC
Technologies clés : 39

CG-Tec
Entreprise
03 81 89 87 26
26, rue du Lhotaud, F- 25560 FRASNE
Technologies clés : 18

FEMTO ST
Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies
Académique
03 63 08 24 00
contact@femto-st.fr
15b avenue des Montboucons Besançon, Doubs 25030
Technologies clés : 2

Pôle des Microtechniques
Pôle de compétitivité
03 81 25 53 65
contact@polemicrotechniques.fr
TEMIS INNOVATION 18 rue Alain Savary 25000 Besançon
Technologies clés : 1

SeT
Systèmes et Transports (Université de Technologie de Belfort-Montbéliard)
Académique
03 84 58 33 19
set@utbm.fr
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD 90010 Belfort cedex
Technologies clés : 14

BPI Franche-Comté
BPI
03 81 47 08 30
http://contact.bpifrance.fr/#
Parc Artemis 17D, rue Alain Savary 25000 Besançon
Technologies clés :

IEI-FC
Incubateur
03 81 66 67 29
blandine.tatin@univ-fcomte.fr
18 rue Alain Savary
25000 Besançon
Technologies clés :

Percipio Robotics
Entreprise
03 81 25 03 80
contact@percipio-robotics.com
18 Rue Alain Savary, 25000 Besançon
Technologies clés : 12

DIRECCTE Franche-Comté
DIRECCTE
03 81 65 89 13
franch-polec@direccte.gouv.fr
http://www.franche-comte.direccte.gouv.fr/accueil-22
Pôle C 5 place Jean Cornet
Technologies clés :

Guadeloupe

BPI Guadeloupe
BPI
05 90 89 65 58
http://contact.bpifrance.fr/#
Parc d'activités de la Jaille - Bât. 7 BP 110 97122 Baie-Mahault
Technologies clés :

DIECCTE Guadeloupe
DIRECCTE
05 90 99 35 99
971-polec@dieecte.gouv.fr
http://www.guadeloupe.dieccte.gouv.fr/Guadeloupe
Chemin des bougainvilliers-Guillard
Technologies clés :

GUYANE

Cofely Endel - Kourou
Entreprise
R&D
05 94 32 72 00
service.communication@cofelyendel-gdfsuez.com
av Préfontaine, 97310 KOUROU
Technologies clés : 15

Amazinc
Incubateur
franck.roubaud@ardi-gdi.fr
Guyane Développement Innovation
CS 90235

97325 CAYENNE CEDEX
Technologies clés :

BPI Guyane
BPI
05 94 29 90 90
http://contact.bpifrance.fr/#
c/o AFD - Lotissement Les Héliconias Route de Baduel - BP 1122 97345 Cayenne Cedex
Technologies clés :

DIECCTE Guyane
DIECCTE
05 94 25 61 00
973-polec@dieccte.gouv.fr
http://www.guyane.dieccte.gouv.fr/Guyane
Angle rues Rouget de l'Isle et Mme Payé BP 6009
Technologies clés :

Haute-Normandie

Mov'eo
Pôle de compétitivité
02 32 91 54 50
contact@pole-moveo.org
Technopôle du Madrillet, Avenue Galilée BP 20060, 76801 St Etienne du Rouvray
Technologies clés : 10, 12, 23, 45

Total - Raffinerie de Normandie
Entreprise
02 35 11 50 00
http://www.total.com/fr/formulaire-de-contact
Total - Raffinerie de Normandie BP98 - 76700 Harfleur
Technologies clés : 15, 22, 41

ESP
Énergie et Systèmes de Propulsion
Institut Carnot
02 32 95 36 14
contact@carnot-esp.fr
Technopôle du Madrillet - Avenue de l'Université - BP 12 - 76801 Saint Etienne du Rouvray
Technologies clés : 7, 43, 45

INSA
Académique
02 32 95 97 00
insa@insa-rouen.fr
Avenue de l'Université, 76800 Saint-Étienne-du-Rouvray
Technologies clés : 7, 45

Novalog
Pôle de compétitivité
02 78 63 00 05
info@novalog.eu
Docks Dombasle – 2, rue Dombasle – 76600 Le Havre
Technologies clés : 10, 12

Affinisep
Entreprise
02 32 59 61 01
contact@affinisep.com
Pharma Parc II - Voie de l'Innovation - Chaussée du Vexin 27100 VAL-DE-REUIL
Technologies clés : 1

Biocéane
Entreprise
02 35 42 52 75
https://www.bioceane.fr/nous-contacter/
132 Boulevard François 1er 76600 Le Havre
Technologies clés : 28

Cuiller Frères
Entreprise
02 35 68 15 64
contact@cuiller.fr
551 RUE PIERRE ET MARIE CURIE - 76650 PETIT COURONNE
Technologies clés : 39

Fouré Lagadec
Entreprise
02 35 25 59 99
http://www.fourelagadec.com/dm_contact.html
164 boulevard de Graville 76600 Le Havre
Technologies clés : 43

FranceWatts
Entreprise
02 35 91 02 02
http://www.francewatts.fr/contact/
436, boulevard de Normandie - BP 7 - 76360 Barentin
Technologies clés : 42

IRSEEM
Institut de Recherche en Systèmes Électronique Embarquée
Académique
02 32 91 58 58
irseem@esigelec.fr
Technopôle du Madrillet - Avenue Galilée - BP 10024 - 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray
Technologies clés : 20

Lineo
Entreprise
03 21 66 24 77
16 RUE GEORGES CHARPAK 76130 MONT-SAINT-AIGNAN
Technologies clés : 1

LITIS - INSA ROUEN
Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes.
Académique
02 32 95 50 11
secretariat@litislab.fr
Laboratoire LITIS - EA 4108 - Université de ROUEN - UFR Sciences et Techniques - Avenue de l'université 76800 SAINT ETIENNE DU ROUVRAY FRANCE
Technologies clés : 11

Saftair - Ventilation
Entreprise
02 35 04 69 15
saftair@saftair.com
Rue du Levant 76590 TORCY-LE-PETIT
Technologies clés : 40

Sysnav
Entreprise
02 78 77 03 46
57, rue de Montigny 27200 Vernon
Technologies clés : 2

Terre de Lin
Entreprise
02 35 97 41 33
http://www.terredelin.com/hp/page-contact.aspx?theme=tdl_fr&
605, route de la vallée 76740 Saint-Pierre-le-viger
Technologies clés : 39

BPI Haute-Normandie
BPI
02 35 59 26 36
http://contact.bpifrance.fr/#
20, place Saint-Marc 76000 Rouen
Technologies clés :

SEINARI Incubation
Incubateur
02 32 10 23 03
fabien.lieval@seinari.fr
73 rue Martainville
76000 Rouen
Technologies clés :

DIRECCTE Haute Normandie
DIRECCTE
02 32 81 88 88
hnorm-polec@direccte.gouv.fr
http://www.haute-normandie.direccte.gouv.fr/accueil-30
pôle C 30 rue H.Gadeau de Kerville - Immeuble les Galées du Roi
Technologies clés :

ILE-DE-FRANCE

INRIA
Institut national de recherche en informatique et en automatique
Institut Carnot
01 39 63 55 11
Domaine de Voluceau, 78150 Rocquencourt
Technologies clés : 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 33, 35, 45, 46, 47

Systematic
Pôle de compétitivité
01 69 08 06 85
contact@systematic-paris-region.org
Site Nano Innov, 8, avenue de la Vauve, bâtiment 863 - CS 70005, 91127 PALAISEAU Cedex
Technologies clés : 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 20, 21, 22, 33, 34, 45, 47

CEA LIST
Institut Carnot
info-list@cea.fr
Nano-INNOV, Avenue de la Vauve 91120 Palaiseau
Technologies clés : 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 14, 20, 44, 45, 47

CapDigital
Pôle de compétitivité
01 40 41 11 60
14 rue Alexandre Parodi 75010 Paris
Technologies clés : 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 22, 33, 47

SystemX
IRT
01 69 08 05 68
contact@irt-systemx.fr
Centre d'intégration Nano-INNOV – Bât N3, 8, Avenue de la Vauve 91120 PALAISEAU
Technologies clés : 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 34, 47

M.I.N.E.S.
Méthodes Innovantes pour l'Entreprise et la Société
Institut Carnot
01 40 51 90 50
60, Boulevard Saint Michel 75272 PARIS Cedex 06
Technologies clés : 2, 7, 9, 12, 13, 24, 25, 41, 44, 45

Thales Research and Technology
Entreprise
01 69 41 55 00
https://www.thalesgroup.com/fr/content/contactez-nous
Campus Polytechnique 1 av Augustin Fresnel 91767 PALAISEAU Cedex
Technologies clés : 3, 5, 6, 7, 9, 14, 20, 46

IFPEN
IFP Energies nouvelles
Académique
01 47 52 60 00
1-4, avenue de Bois Préau, 92852 Rueil Malmaison
Technologies clés : 7, 8, 15, 18, 24, 25, 26, 43, 45

IRSTEA
Irstea Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
Institut Carnot
01 40 96 61 21
1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030 92761 Antony cedex
Technologies clés : 2, 7, 10, 12, 24, 35, 36, 41, 45

EDF
Entreprise
R&D
01 47 65 43 21
1, avenue du général de Gaulle 92141 Clamart Cedex
Technologies clés : 2, 21, 22, 42, 43, 44, 46

Alcatel-Lucent
Entreprise
01 30 77 30 77
7 Route de Villejust, 91620 Nozay
Technologies clés : 4, 6, 11, 13, 20, 22, 46

Arkema
Entreprise
01 49 00 80 80
420 rue d'Estienne d'Orves 92705 Colombes Cedex
Technologies clés : 1, 8, 9, 23, 24, 41, 42

TSN
Télécom et Société numérique
Institut Carnot
01 45 81 80 80
Institut Mines-Télécom, 46 rue Barrault 75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 7, 10, 11, 12, 13, 34, 45

Orange
Entreprise
R&D
01 45 29 44 44
infos.groupe@orange.com
http://laborange.fr/contact
38-40 Rue du Général Leclerc, 92130 Issy-les-Moulineaux
Technologies clés : 3, 5, 6, 7, 13, 14

Atos
Entreprise
01 73 26 00 00
http://fr.atos.net/fr-fr/accueil/nous-contacter/contact-form.html?xud=SHD-UVuKh8PLGc7Qs7_OzA
80 quai Voltaire 95877 Bezons cedex
Technologies clés : 3, 4, 5, 6, 14, 34

Dassault Systemes
Entreprise
R&D
01 70 73 43 63
rbr@3ds.com
10 rue Marcel Dassault - CS 40501 - 78946 Vélizy-Villacoublay Cedex
Technologies clés : 4, 5, 11, 14, 20, 47

Medicen
Pôle de compétitivité
01 79 68 10 86
jdecanton@medicen.org
3-5 impasse Reille, 75014 Paris
Technologies clés : 2, 15, 18, 26, 29, 33

Véolia
Entreprise
01 34 93 31 31
Chemin de la Digue, 78600 Maisons-Laffitte
Technologies clés : 2, 4, 5, 35, 37

AirLiquide
Entreprise
01 49 83 55 55
57 Avenue Carnot 94500 CHAMPIGNY SUR MARNE
Technologies clés : 9, 24, 25, 41, 42

CSTB
Centre scientifique et technique du bâtiment
CTI
Institut Carnot
01 64 68 82 82
84, avenue Jean Jaurès Champs sur Marne 77447 Marne la Vallée cedex 2
Technologies clés : 26, 38, 39, 40, 41

Sanofi
Entreprise
01 53 77 40 00
http://www.sanofi.com/contact/contact.aspx
54, rue La Boétie 75008 Paris
Technologies clés : 8, 15, 18, 18, 26

Valéo
Entreprise
01 48 98 86 00
2, rue André Boulle, Créteil Cedex 94046, Créteil
Technologies clés : 2, 5, 7, 20, 45

Safran
Entreprise
01 40 60 80 28
catherine.malek@safran.fr
2, bd du Général Martial Valin 75015 Paris
Technologies clés : 1, 2, 20, 45

EDF
Entreprise
R&D
01 60 73 60 73
Avenue des Renardières, 77250 Écuelles
Technologies clés : 2, 23, 40, 44

Saint Gobain
Entreprise
R&D
01 48 39 58 00
39 Quai Lucien Lefranc, 93300 Aubervilliers
Technologies clés : 1, 2, 38, 39

Bouygues Construction
Entreprise
01 30 60 33 00
https://www.bouygues-construction.com/contact
1, avenue Eugène Freyssinet Guyancourt 78061 Saint-Quentin-en-Yvelines
Technologies clés : 2, 37, 39, 46

CentraleSupelec
Académique
01 69 85 12 12
communication@centralesupelec.fr
Plateau de Moulon 3 rue Joliot-Curie F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex
Technologies clés : 3, 6, 20, 22

CRIGEN
Académique
01 49 22 59 85
361 Avenue du Président Wilson, 93210 Saint-Denis
Technologies clés : 22, 24, 25, 41

Dassault Aviation
Entreprise
R&D
01 47 11 40 00
http://www.dassault-aviation.com/fr/services/contacts/
78, quai Marcel Dassault, Cedex 300, 92552 SAINT CLOUD
Technologies clés : 7, 9, 21, 45

Global Bioenergies
Start-up
01 64 98 20 50
http://www.global-bioenergies.com/contact/
5, rue Henri Desbruères 91000 Evry
Technologies clés : 8, 15, 24, 26

Institut Pasteur
Académique
01 45 68 80 00
25-28 rue du Dr Roux 75015 Paris
Technologies clés : 15, 18, 26, 29

ISIR
Institut des systèmes intelligents et de robotique
Académique
01 44 27 51 41
contact@isir.upmc.fr
Université Pierre et Marie CURIE, Pyramide - T55/65 CC 173 - 4 Place Jussieu 75005 Paris
Technologies clés : 7, 10, 11, 12

STMicroelectronics
Entreprise
01 58 07 75 75
29 boulevard Romain Rolland, 75669 PARIS CEDEX 14
Technologies clés : 2, 5, 7, 46

Renault Technocentre
Entreprise
01 76 84 04 04
andras.kemeny@renault.com
1 Avenue du Golf, 78280 Guyancourt
Technologies clés : 7, 20, 45

EDF
Entreprise
R&D
01 30 87 72 44
6 Quai Watier, 78400 Chatou
Technologies clés : 2, 21, 44

Advancity
Pôle de compétitivité
01 45 92 65 96
florence.castel@advancity.eu
c/o Esiee, 2 Boulevard Blaise Pascal 93162 NOISY-le-GRAND cedex
Technologies clés : 22, 35, 40

Aldebaran Robotics
Entreprise
01 77 37 17 59
contact@aldebaran-robotics.com
43 Rue Du Colonel Pierre Avia 75015 PARIS 15
Technologies clés : 5, 10, 12

Alten
Entreprise
01 46 08 72 00
http://www.alten.fr/contact
40 Avenue André Morizet 92100 Boulogne Billancourt
Technologies clés : 6, 7, 20

Areva
Entreprise
01 34 96 00 00
Tour AREVA, 1, place Jean Millier, 92400 Courbevoie
Technologies clés : 2, 43, 44

CapGemini
Entreprise
01 49 67 30 00
https://www.fr.capgemini.com/contact
Tour Europlaza - 20, avenue André Prothin - 92927 Paris - La Défense Cedex
Technologies clés : 4, 7, 34

Cirad
Académique
01 53 70 20 00
42, rue Scheffer, 75116 Paris
Technologies clés : 18, 24, 27

FPDC
Fédération Professionnelle du Drone Civil
Association
09 72 45 72 79
contact@federation-drone.org
16 rue de la Comète, 75007 Paris
Technologies clés : 10, 12, 21

IFREMER
Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
Académique
01 46 48 21 00
155, rue Jean-Jacques Rousseau, 92 138 Issy-les-Moulineaux Cedex
Technologies clés : 2, 28, 43

IHU Imagine
Institut des maladies Génétiques - Hopital Necker
IHU
01 42 75 42 00
contact@institutimagine.org
24, Boulevard de Montparnasse 75015 PARIS
Technologies clés : 15, 26, 29

Parrot
Entreprise
01 48 03 60 60
174, quai de Jemmapes, 75010 Paris
Technologies clés : 2, 5, 12

PSA Peugeot Citroën
Entreprise
01 57 59 30 00
Route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay
Technologies clés : 11, 20, 45

RTE
Réseau de transport d'électricité
Entreprise
01 79 24 85 27
rte-projet-fab@rte-france.com
100 esplanade du Général de Gaulle 92932 La défense
Technologies clés : 4, 22, 40

SYMOP
Association
01 47 17 67 17
Maison de la Mécanique, 45 rue Louis-Blanc 92400 Courbevoie
Technologies clés : 10, 12, 21

Technicolor
Entreprise
01 41 86 50 00
1-5 rue Jeanne d'Arc 92130 Issy les Moulineaux
Technologies clés : 3, 11, 47

DCNS
Entreprise
01 40 59 50 00
http://fr.dcnsgroup.com/nous-contacter/
40 rue du Docteur Finlay - 75015 Paris
Technologies clés : 14, 43

Hôpital Saint Louis - Thérapie cellulaire
Académique
01 42 49 47 50
1 Avenue Claude-Vellefaux 75010 Paris
Technologies clés : 29, 31

Bouygues Telecom
Entreprise
contact@btinitiatives.fr
https://www.btinitiatives.fr/contacts/
13/15 Avenue du Maréchal Juin, 92300 Meudon-La-Forêt
Technologies clés : 5, 6

Saint Gobain Glass - Crdc
Entreprise
R&D
01 48 39 58 00
http://www.saint-gobain-recherche.fr/fr/contact#
39, quai Lucien Lefranc, B. P. 135 93303 Aubervilliers Cedex FRANCE
Technologies clés : 23, 42

Medissimo
Entreprise
01 30 06 30 06
https://www.medissimo.fr/fr/contact/
Technoparc - 8, rue Charles-Edouard Jeanneret 78300 Poissy
Technologies clés : 5, 33

3DEXPERIENCE Platform - Dassault système
Entreprise
R&D
http://www.3ds.com/how-to-buy/contact-sales/
78946 Vélizy-Villacoublay Cedex
Technologies clés : 11, 47

Abolis
Start-up
06 81 90 31 64
contact@abolis.fr
Génopole Campus, Bât 6, 5 Rue Henri Desbruères 91030 Evry Cedex
Technologies clés : 8, 24

Actia
Réseau français des instituts techniques de l'agro-alimentaire
Association
Réseau
01 44 08 86 20
actia@actia-asso.eu
16 rue Claude-Bernard, 75231 Paris Cedex 5
Technologies clés : 2, 7

Actility
Entreprise
01 83 64 65 41
contact@actility.com
65-67, rue de la Victoire 75009, Paris
Technologies clés : 5, 22

Ademe
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
Agence publique
01 47 65 20 00
http://www.ademe.fr/content/contacter
27 rue Louis Vicat 75737 PARIS Cedex 15
Technologies clés : 37, 39

Adisseo
Entreprise
01 46 74 70 00
Immeuble Antony Parc 2 - 10, Place du Général de Gaulle 92160 Antony
Technologies clés : 8, 28

AKKA
Entreprise
R&D
01 56 69 26 59
akka.research@akka.eu
9-11 rue Montalivet, 75 008 PARIS
Technologies clés : 7, 20

Akuo Energy
Entreprise
01 47 66 09 90
contact@akuoenergy.com
140, avenue des Champs Elysées 75008 Paris
Technologies clés : 42, 43

Altran
Entreprise
R&D
01 30 67 48 00
http://www.altran.fr/contact.html#.Va-QMPnAay0
2, rue Paul Dautier 78457 Vélizy-Villacoublay
Technologies clés : 7, 20

ARTS
Actions de Recherche pour la Technologie et la Société
Institut Carnot
06 63 82 66 49
bertrand.coulon@ensam.eu
http://www.ic-arts.eu/contacts/
151, Bd de l'Hôpital 75 013 Paris
Technologies clés : 9, 11

Assystem
Entreprise
01 55 65 03 00
70, boulevard de Courcelles - 75017 Paris
Technologies clés : 7, 44

Astech
Pôle de compétitivité
01 55 64 04 60
sebastien.courrech@pole-astech.org
http://www.pole-astech.org/site/pages/index.php?lang=fr&section=contacts
ASTech Paris Region - 8 Rue des Vertugadins 92190 Meudon
Technologies clés : 20, 45

AVIESAN
Alliance nationale pour les sciences de la vie et de la santé
CVT
http://www.aviesan.fr/fr/aviesan/accueil/contact
Bâtiment A - 1er étage - 8 rue de la Croix Jarry 75013 Paris
Technologies clés : 15, 29

Avril
ex - Sofiproteol
Entreprise
01 40 69 48 00
11 rue Monceau, CS60003, 75378 PARIS CEDEX 08
Technologies clés : 8, 24

CAOR/Mines ParisTech
Centre de Robotique ParisTech
Académique
caor@mines-paristech.fr
60 Boulevard Saint-Michel, 75005 Paris
Technologies clés : 10, 12

Carmat
Entreprise
01 39 45 64 50
contact@carmatsas.com
36, avenue de l'Europe, CS 40533 - Immeuble l'Etendard 78941 Vélizy Villacoublay CEDEX
Technologies clés : 1, 31

Cegedim
Entreprise
01 49 09 22 00
127 rue d'Aguesseau 92100 Boulogne-Billancourt
Technologies clés : 4, 33

Cellectis
Entreprise
01 81 69 16 00
http://www.cellectis.com/fr/content/contact
8 rue de la Croix Jarry 75013 Paris
Technologies clés : 26, 29

CIMV
Compagnie Industrielle de la Matière Végétale
Start-up
01 46 24 30 29
contact@cimv.fr
11, rue Louis Philippe 92200 Neuilly sur Seine
Technologies clés : 15, 24

CNIL
Commission nationale de l'informatique et des libertés
Agence Publique
01 53 73 22 22

8, rue Vivienne - CS 30223 - 75083 Paris cedex 02
Technologies clés : 33, 34

Confluens
(Issu de l'association de 6 groupes majeurs - groupement IGNES)
Start-up
http://www.sasconfluens.com/
17 RUE DE L AMIRAL HAMELIN 75116 PARIS
Technologies clés : 2, 40

Eiffage
Entreprise
01 34 65 89 89
163 quai du Docteur-Dervaux 92601 Asnières-sur-Seine cedex
Technologies clés : 5, 39

Engie - CRIGEN
Entreprise
R&D
01 49 22 59 85
http://www.engie.com/contact/
361 Avenue du Président Wilson, 93210 Saint-Denis
Technologies clés : 24, 40

ENSTA
École nationale supérieure de techniques avancées
Académique
01 81 87 17 40
nathalie.branger@ensta-paristech.fr
828, Boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex
Technologies clés : 7, 45

Environnement SA
Entreprise
01 39 22 38 00
s.aflalo@environnement-sa.com
http://www.environnement-sa.fr/contactez-nous/
111 boulevard Robespierre – 78300 Poissy
Technologies clés : 2, 36

Eramet
Entreprise
01 30 66 27 27
eramet-research@erametgroup.com
1 Rue Albert Einstein, 78190 Trappes
Technologies clés : 1, 16

ESIEE
Académique
01 45 92 65 00
http://www.esiee.fr/fr/contact
2 boulevard Blaise Pascal - Cité Descartes - BP 99 - 93162 Noisy-le-Grand Cedex
Technologies clés : 13, 20

Faurecia
Entreprise
01 72 36 70 00
http://www.faurecia.com/fr/formulaire-de-contact
2, rue Hennape – 92000 NANTERRE
Technologies clés : 1, 45

FCBA
Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement
CTI
01 72 84 97 84
http://www.fcba.fr/content/contacts?ref=main
10 rue Galilée 77420 Champs-sur-Marne
Technologies clés : 24, 38

FeetMe
Start-Up
contact@feetme.fr
96 bis bd Raspail 75006 Paris
Technologies clés : 2, 5

Gemalto
Entreprise
01 55 01 50 00
6, rue de la Verrerie - CS20001 - 92197 Meudon Cedex
Technologies clés : 34, 46

Genci
Grand Equipement National de Calcul Intensif
Association
01 42 50 04 15
http://www.genci.fr/fr/contact
12 rue de l'Eglise 75015 PARIS
Technologies clés : 4, 21

Génopole d'Evry
Académique
01 60 87 83 00
presse@genopole.fr
http://www.genopole.fr/-Contactez-nous-.html#chercheur
5, Rue Henri Desbruères 91 030 Evry Cedex
Technologies clés : 18, 29

Hub One
Entreprise
01 74 37 24 24
http://www.hubone.fr/a-propos/contact
4 rue de La Haye, BP11937 - Roissypôle Le Dome - Tremblay-en-France, 95732 Roissy CDG
Technologies clés : 6, 13

Hybrigenics
Entreprise
01 58 10 38 00
http://www.hybrigenics.com/contact
3-5 impasse Reille 75014 Paris
Technologies clés : 18, 26

IFPEN TE
IFPEN Transports Energie
Académique
Institut Carnot
gaetan.monnier@ifpen.fr
1-4, avenue de Bois Préau 92852 Rueil Malmaison
Technologies clés : 2, 24

Institut Curie
Académique
01 56 24 55 00
26 rue d'Ulm 75248 Paris cedex 05
Technologies clés : 15, 29

Institut des biothérapies - AFM
Académique
http://www.institut-biotherapies.fr/contacts/
Département Ressources Humaines, 1 bis rue de l'Internationale, BP 60, 91002 EVRY Cedex
Technologies clés : 26, 29

Institut Mines Telecom
Académique
01 45 81 80 80
http://www.mines-telecom.fr/contacts-acces/
46 rue Barrault 75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 3, 6

IVEA - Solution
Start-up
01 69 35 88 20
info@ivea-solution.com
Centre Scientifique d'Orsay - Batiment 503 - 91400 Orsay
Technologies clés : 37, 44

Klearia
Start-up
01 69 63 61 29
info@klearia.com
Site Data IV - Route de Nozay 91460 Marcoussis
Technologies clés : 18, 36

Kronosafe
Entreprise
01 77 93 21 59
http://www.krono-safe.com/request-form/
Bât Erable - 86 rue de Paris, 91400 Orsay
Technologies clés : 19, 20

Lafarge
Entreprise
01 44 34 11 11
61 rue des Belles Feuilles 75116 Paris
Technologies clés : 38, 39

LIP6 (UPMC)
Laboratoire d'Informatique de Paris 6
Académique
01 44 27 87 69
Paule.Mayenga@nulllip6.fr
Boîte courrier 169 Tour 26, Couloir 26-00, 2è étage 4 place Jussieu 75252 Paris Cedex 05
Technologies clés : 6, 11, 19, 20

Neonen
Entreprise
01 70 91 62 62
http://www.neoen.fr/page/contact/
4 rue Euler, 75008 PARIS
Technologies clés : 42, 43

Netatmo
Start-up
https://www.netatmo.com/support
892 rue Yves Kermen, 92100 Boulogne Billancourt
Technologies clés : 5, 36

PARIS ACM SIGGRAPH
Association
http://paris.siggraph.org/contact-info
Maison des associations, 4 rue des Arènes 75005 Paris
Technologies clés : 11, 47

Sagem
Entreprise
01 55 60 38 00
Arcs de Seine 18/20 quai du Point du Jour 92659 Boulogne-Billancourt CEDEX
Technologies clés : 6, 11

Sequans Communication
Entreprise
http://www.sequans.com/contact/
Portes de la Défense
15-55, Boulevard Charles de Gaulle 92700 Colombes
Technologies clés : 6, 13

Sites
Entreprise
01 41 39 02 00
sites@sites.fr
http://www.sites.fr/index.php/fr/contactez-nous
SITES, 2bis avenue du centre 92500 RUEIL malmaison
Technologies clés : 2, 40

SPIE
Entreprise
01 34 24 30 00
10 avenue de l'Entreprise, 95863 Cergy-Pontoise cedex
Technologies clés : 39, 44

Suez Environnement
Entreprise
01 58 81 20 00
Tour CB21 - 16, place de l'Iris 92040 Paris La Défense Cedex
Technologies clés : 35, 37

Theravectys
Entreprise
01 43 90 19 20
1, mail du Professeur Georges Mathé 94800 Villejuif
Technologies clés : 15, 26

Vicat
Entreprise
01 58 86 86 86
http://www.vicat.fr/fr/Pied-de-page/Contact
Tour Manhattan, 6 place de l'Iris F-92095 PARIS LA DEFENSE CEDEX
Technologies clés : 38, 39

Vinci Energies
Entreprise
01 30 86 70 00
http://www.vinci-energies.com/contact/
280 rue du 8 mai 1945 - BP 72 - 78368 Montesson Cedex
Technologies clés : 22, 43

Withings
Start-up
01 41 46 04 60
2 rue Maurice Hartmann, 92130 Issy-les-Moulineaux
Technologies clés : 2, 5

Clinique Jouvenet
Académique
01 42 15 41 24
d.limeri@gsante.fr
6 Square Jouvenet 75016 Paris
Technologies clés : 31

Direct Energie
Entreprise
01 73 03 77 01
modelec@direct-energie.com
http://groupe.direct-energie.com/nous-contacter/
2 bis, rue Louis Armand - 75015 PARIS
Technologies clés : 22

INRA Jouy en Josas
Académique
01 34 65 21 21
http://www.jouy.inra.fr/infos/contact/2474
Allée de Vilvert, 78352 Jouy-en-Josas
Technologies clés : 26, 28

Data Sciences Starter Program - École polytechnique
Académique
01 69 33 33 33
https://www.polytechnique.edu/fr/contact-webform?contact=c2VjcmV0YXJpYXQtZGdhckBwb2x5dGVjaG5pcXVlLmZy
Route de Saclay, 91128 Palaiseau
Technologies clés : 3

TélécomParisTech - Centre de recherche du numérique: AxSEs Très Grans Réseaux et Sytèmes
Académique
01 45 81 77 77
Patrick.Duvaut@telecom-paristech.fr
46 rue Barrault F-75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 6

TélécomParisTech - Filière Image (IMA)
Académique
01 45 81 77 77
patricia.friedrich@telecom-paristech.fr
46 rue Barrault F-75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 14

Airbus
Entreprise
01 46 97 30 00
http://www.airbusgroup.com/int/en/investors-shareholders/Contact/Contact-Form.html
12 Rue Pasteur, 92150 Suresnes
Technologies clés : 1

ARD
Association pour la Recherche sur le Diabète
Académique
01 47 23 90 14
ardinfo@a-rd.fr
http://www.a-rd.fr/node/397
Bureau 601
19, Boulevard Malesherbes 75008 Paris
Technologies clés : 26

M2O - Orange
Entreprise
01 53 04 40 73
http://www.m2ocity.com/contact.html
6 rue de Saint Petersbourg, PARIS 75008
Technologies clés : 35

3BCAR
Institut Carnot
01 42 75 93 64
3bcar@instituts-carnot.eu
Institut Carnot 3BCAR - INRA Transfert - 28, rue du docteur Finlay - 75015 Paris
Technologies clés : 24

ABCell-Bio
Entreprise
01 42 80 19 08
http://www.abcell-bio.com/?tg=addon/forms/form&idx=application&id_app=1
6 rue Pierre Haret 75009 PARIS
Technologies clés : 29

Acta
Association
Réseau des instituts des filières animales et végétales
01 40 04 50 00
http://www.acta.asso.fr/menu/contacts.html

149, rue de Bercy
75595 Paris cedex 12
Technologies clés : 27

AFM
Association française contre les myopathies
Association
afm@afm.genethon.fr
1, rue de l'Internationale
BP 59
91002 EVRY Cedex
Technologies clés : 26

AFPR
Association Française du Prototypage Rapide
Association
http://www.afpr.asso.fr/contact/
5 av. du Maréchal Leclerc 92360 Meudon La Forêt.
Technologies clés : 9

AIMCC
Association des Industriels des Produits de Construction
Association
01 44 01 47 80
contact@aimcc.org
3, rue Alfred Roll - 75849 Paris Cedex 17
Technologies clés : 39

Airbus Defence and space - Centre d'Excellence Electronique
Entreprise
R&D
0 1 82 61 25 00
http://www.space-airbusds.com/fr/contacts/
1, Boulevard Jean Moulin - CS 30503 78997 Elancourt Cedex
Technologies clés : 13

Air-ESIEA
Académique
air-esiea@et.esiea.fr
http://air.esiea.fr/?page_id=41
74bis avenue Maurice Thorez 94200 Ivry-sur-Seine
Technologies clés : 45

Airlynx
Entreprise
09 81 43 46 46
http://air-lynx.com/en/contact/
1 avenue de l'Atlantique 91940 Les Ulis
Technologies clés : 13

Ajelis
Start-up
contact@ajelis.com
86 rue de PARIS Orsay, 91400
Technologies clés : 16

Alcatel Thalès III-V Lab
Entreprise
R&D
01 60 40 60 40
Route de Nozay, F-91461 Marcoussis Cedex
Technologies clés : 46

Alstom Grid
Entreprise
01 49 01 61 00
http://www.alstom.com/fr/general-contact-us/
Immeuble Galilée, 51 Esplanade du Général de Gaulle, Quartier Michelet - La Défense 10 92907 La Défense Cedex
Technologies clés : 22

Alvéole
Start-up
luc.talini@alveolelab.com
Alvéole - 68 bd de Port-Royal 75005 PARIS
Technologies clés : 18

Amarisoft
Entreprise
01 77 62 44 77
http://amarisoft.com/?p=contact
8 AVENUE DU VIEUX CEDRE 91130 RIS ORANGIS
Technologies clés : 6

ANAH
Agence nationale de l'habitat
Agence publique
01 44 77 39 39
8 avenue de l'Opéra 75001 Paris
Technologies clés : 38

Angus.Ai
Entreprise
contact@angus.ai
6 square Desaix 75015 Paris
Technologies clés : 19

ANSES
Entreprise
01 49 77 13 50
14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
Technologies clés : 36

Aqylon
Entreprise
01 42 57 41 53
contact@aqylon.com
46/48, rue René Clair 75592 PARIS CEDEX
Technologies clés : 41

Aragan
Entreprise
01 44 69 52 02
info@aragan.fr
4 avenue Bertie Albrecht - 75008 Paris
Technologies clés : 28

ARISEM (Thalès)
Entreprise
01 44 88 99 66
emmanuelle.chateau@arisem.com
74 RUE D ARCUEIL
BP 30183
94150 RUNGIS
Technologies clés : 19

Arvalis
Académique
01 44 31 10 00
contact@arvalis-infos.fr
ARVALIS - Institut du végétal - 3 rue Joseph et Marie Hackin 75016 PARIS
Technologies clés : 27

ASIP Santé
Agence des Systèmes d'Information Partagés de Santé
Agence publique
01 58 45 32 50
9, rue Georges Pitard 75015 PARIS
Technologies clés : 33

Association HQE
Association
01 40 47 02 82
s.benamor@assohqe.org
4 Avenue du Recteur Poincaré 75016 PARIS
Technologies clés : 39

Atawey
Entreprise
09 54 79 86 30
info-fra@ataway.com
10 rue de la Chaussée d'Antin 75009 PARIS
Technologies clés : 25

Augmentedev
Start-up
01 76 36 09 64
https://manager.augmentedev.com/contact_requests/new?origin=website_footer
107 Avenue Parmentier 75011 Paris
Technologies clés : 14

AutoDesk
Entreprise
01 46 46 38 00
89 Quai Panhard et Levassor, 75013 Paris
Technologies clés : 9

Axens
Entreprise
01 47 14 21 00
http://www.axens.net/contact.html
89, boulevard Franklin Roosevelt - BP 50802 - 92508 Rueil-Malmaison
Technologies clés : 24

Axway
Entreprise
01 47 17 24 24
https://www.axway.com/en/contact-us#tablist1-tab1
26, rue des Pavillons , CS 90001 - 92807 Puteaux Cedex
Technologies clés : 4

Bamo-Mesure
Entreprise
01 30 25 83 20
info@bamo.fr
22, Rue de la Voie des Bans - Parc d'activités de la Gare 95100 ARGENTEUIL
Technologies clés : 36

Bâtir Eco
Cluster
01 81 58 01 31
info@batireco.fr
http://www.batireco.fr/index.php/zoo
18 Bis rue de l'Industrie 77170 Brie-Comte-Robert
Technologies clés : 38

Bertin Technologies
Entreprise
01 39 30 60 00
http://www.bertin.fr/contact.aspx
Parc d'activités du Pas du Lac - 10 bis, avenue Ampère 78 180 Montigny-le-Bretonneux
Technologies clés : 41

Biogénie Europe
Entreprise
01 64 56 78 00
france@biogenie-env.com
Ecosite de Vert-le-Grand, Chemin de Braseux, BP 69, 91540 Echarcon
Technologies clés : 37

Bioprox (Proxis Développement)
Entreprise
01 81 93 00 70
rue Barbès - BP 177 - 92305 Levallois-Perret
Technologies clés : 28

Biosystèmes France
Entreprise
01 34 48 99 26
info@biosystemesfrance.com
P.A. des Béthunes - BP. 90458 - St-Ouen l'Aumône 95005 CERGY PONTOISE CEDEX
Technologies clés : 27

Bluefrog Robotics
Start-up
01 81 70 99 40
contact@bluefrogrobotics.com
10 rue Coquillière 75001 PARIS
Technologies clés : 12

Brainwave
Entreprise
01 84 19 04 10
contact@brainwave.fr
38-42 rue Gallieni 92600 ASNIERES-SUR-SEINE
Technologies clés : 19

Burgeap
Entreprise
01 46 10 25 70
27, rue de Vanves
92772 Boulogne Billancourt
Technologies clés : 37

Cadlink
Entreprise
0 977 215 105
http://www.cadlink.fr/contact/
20 rue Nungesser et Coli 91420 Morangis, France
Technologies clés : 9

CADVision
Entreprise
01 39 30 65 06
info@cadvision.fr
2, rue GALILEE 78280 Guyancourt
Technologies clés : 9

CEA IG
Institut de génommique
Académique
01 60 87 83 44
cng-enquiries@cng.fr
2, rue Gaston Crémieux 91057 EVRY
Technologies clés : 8

Cellectis Bioresearch
filiale de Cellectis
Entreprise
01 41 83 99 36
business-development@cellectis-bioresearch.com
102 Route de Noisy, 93230 Romainville
Technologies clés : 29

CellForCure
Entreprise
01 69 82 70 10
http://www.cellforcure.com/en/pages/contact
3, avenue des Tropiques Z.A. de Courtaboeuf 91940 LES ULIS
Technologies clés : 29

CellTechs
Académique
frank.yates@supbiotech.fr
66 rue Guy Môquet
94800 Villejuif
Technologies clés : 29

Centre de Mathématiques Appliquées
Académique
01 69 33 46 00
debouard@cmap-polytechnique.fr
CMAP UMR 7641 École Polytechnique CNRS, Route de Saclay, 91128 Palaiseau Cedex
Technologies clés : 4

Centre de Neuro-Imagerie de Recherche
plateforme d'imagerie de l'Institut du Cerveau et de la Moelle épinière - ICM
Académique
01 57 27 40 00
contact@icm-institute.org
http://icm-institute.org/fr/contact/
47, bd de l'hôpital 75013 PARIS
Technologies clés : 14

Cequami
Entreprise
l.posenel@cequami.fr
http://www.cequami.fr/pour-les-pros/neuf/obtenir-les-certifications/
4 Avenue du Recteur Poincare 75016 PARIS
Technologies clés : 39

Ceraver
Entreprise
01 48 63 88 63
CERAVER PARIS NORD 2 : 69, Rue de la belle étoile B.P. 54263 GONESSE 95957 Roissy cdg Cedex
Technologies clés : 31

Cerqual
Entreprise
http://www.qualite-logement.org/contact.html
1 Rue de Metz
75010 Paris
Technologies clés : 39

Certivéa
Entreprise
01 40 50 29 09
http://www.certivea.fr/contact
4 Avenue du Recteur Poincaré 75016 Paris
Technologies clés : 39

CETH2
Entreprise
R&D
0 1 79 36 02 82
contact@ceth.fr
http://www.ceth.fr/contacts.php?PHPSESSID=72d8a879c0db2191cdd0a61331d07812
Zone Industrielle de la Prairie - 10, rue de la Prairie 91140 VILLEBON-SUR-YVETTE
Technologies clés : 25

CGG
Entreprise
01 64 47 30 00
27 Avenue Carnot 91341 Massy Cedex
Technologies clés : 15

CHAPPEE
filiale de BDR THERMEA Group
Entreprise
preco@chappee.com

157 avenue Charles Floquet
93158 Le Blanc Mesnil Cedex
Technologies clés : 40

CHART
Laboratoire Cognitions Humaine et Artificielle
Académique
01 49 40 64 79
baccino@lutin-userlab.fr
2 rue de la Liberté
93526 SAINT-DENIS, France
Technologies clés : 19

CITEL
Entreprise
01 41 23 50 23
http://www.citel.fr/fr/contact.html
2 rue Troyon 92316 Sèvres CEDEX
Technologies clés : 40

CMLA
Laboratoire de mathématiques appliquées de l'ENS Cachan/CNRS
Académique
01 47 40 59 00
http://www.cmla.ens-cachan.fr/jsp/contact_mail.jsp?CODE=fdevuyst&LANGUE=0&ID_OBJET=31206&TYPE_OBJET=ANNUAIREKSUP&RH=1216281082650
CMLA - ENS Cachan - bât. Laplace, 1er étage, 61 av. du président Wilson
94235 CACHAN cedex
Technologies clés : 11

CNAM
Conservatoire National des Arts et Métiers
Académique
01 40 27 23 30
292 Rue Saint-Martin, 75003 Paris
Technologies clés : 9

CNIM
Entreprise
babcock@cnim.com
http://www.cnim.com/contacts.aspx
9 rue Francis de Pressensé
93 210 La Plaine Saint-Denis
Technologies clés : 41

CNR
Entreprise
cnr.lyon@cnr.tm.fr
http://www.cnr.tm.fr/contact.aspx
28 Boulevard Raspail, 75007 Paris
Technologies clés : 42

Cofely Ineo
filiale d'Engie
Entreprise
http://www.cofelyineo-gdfsuez.com/contact
1, Place des Degrés, Tour Voltaire
92059 Paris la Défense
Technologies clés : 5, 22, 25

Cofely Services (Groupe Suez Environnement)
Entreprise
01 41 20 10 00
1 place des degrés 92059 Paris La Défense
Technologies clés : 36

CogLab
Recherche
http://www.coglab.fr/contact/
La Paillasse - 226 rue Saint-Denis
75002 Paris
Technologies clés : 19

Criteo
Entreprise
01 40 40 22 90
http://www.criteo.com/fr/contact-us/
32 rue Blanche 75 009 Paris
Technologies clés : 3

CTICM
Centre Technique Industriel de la Construction Métallique
CTI
01 60 13 83 00
Espace technologique, L'orme de merisiers, Immeuble Apollo 91193 Saint-Aubin
Technologies clés : 38

CTIF
Centre Technique Industriel Fonderie
CTI
01 41 14 63 00
http://www.ctif.com/contact-ctif/
44 avenue de la Division Leclerc
F-92318 SEVRES CEDEX
Technologies clés : 1

CTMNC
Centre technique de matériaux naturels de construction
CTI
01 44 37 07 10
ctmnc@ctmnc.fr
17, rue Letellier 75015 Paris
Technologies clés : 39

Curie Cancer
Institut Carnot
01 69 86 30 00
Centre Universitaire - Bâtiments 110, 111, 112 91405 Orsay
Technologies clés : 15

CybelAngel
Start-up
contact@cybelangel.com
177 RUE DE LOURMEL 75015 Paris
Technologies clés : 34

DAMAE MEDICAL
Start-up
01 72 60 51 13
info@damaemedical.fr
96 bis boulevard Raspail 75006 Paris
Technologies clés : 14

Danone
Entreprise
R&D
01 69 35 70 00
danonecorporate@danone.com
Avenue de la Vauve, 91120 Palaiseau
Technologies clés : 28

Dataiku
Start-up
01 84 17 45 90
https://www.dataiku.com/dss/contact/
2 rue Jean Lantier 75001 Paris
Technologies clés : 3

Derichebourg
Entreprise
01 44 75 40 40
communication@derichebourg.com
119, Av. du Général Michel Bizot
75579 PARIS Cedex 12
Technologies clés : 44

Dietswell
Entreprise
01 39 30 21 60
contact@dietswell.com
Parc Ariane 3 - Immeuble Le Naïade - 1 rue Alfred Kastler 78284 Guyancourt Cedex
Technologies clés : 15

Diotasoft
Entreprise
01 78 90 02 02
contact@diotasoft.com
http://www.diotasoft.com/
15 avenue Emile Baudot 91300 MASSY
Technologies clés : 14

Docapost
Entreprise
01 56 29 70 01
http://www.docapost.com/contact/
Immeuble DOCAPOST
- 10 avenue Charles de Gaulle
94673 Charenton-le-Pont Cedex
Technologies clés : 33

Doris Engineering
Entreprise
01 44 06 10 00
http://www.doris-engineering.com/prod/email.php
58A, rue du Dessous des Berges
75013 PARIS
Technologies clés : 15

E.ZICOM
Entreprise
01 43 89 25 79
http://www.e-zicom.com/contacts
1 Rue Leon Bocquet 94100 Saint Maur des Fossés
Technologies clés : 12

EBIC
European Biostimulant Industry Council
01 40 91 05 70
c/o Prospero & Partners - 34 rue des Blondeaux - 94240 L'Haÿ-les-Roses
Technologies clés : 27

Eblink
Entreprise
01 69 00 40 07
http://e-blink.com/more-services/
3-5, rue Marcel Pagnol 91800 Boussy-Saint-Antoine
Technologies clés : 6

École des Gobelins
Académique
01 40 79 92 79
http://www.gobelins.fr/formulairebase/formulairecontact
73 Boulevard Saint-Marcel, 75013 Paris
Technologies clés : 47

Ecomesure
Entreprise
01 70 56 44 00
info@ecomesure.com
4 Rue René Razel, 91400 Saclay
Technologies clés : 36

Effilux
Entreprise
01 69 35 87 56
contact@effilux.fr
EFFILUX
Bâtiment 503
Centre scientifique
BP 44
91 400
ORSAY CEDEX
Technologies clés : 2

Egis
Entreprise
01 39 41 40 00
http://www.egis.fr/contact
15 avenue du Centre CS 20538
Guyancourt 78286
Saint-Quentin-en-Yvelines CEDEX
Technologies clés : 37

Eisko
Entreprise
01 85 08 52 51
contact@eisko.com
Eisko, 24 rue de l'Est 75020 Paris
Technologies clés : 47

Ektos
Start-up
contact@ektos.fr
10 avenue Blaise Pascal 77420 Champs sur Marne
Technologies clés : 2

Ela Medical
Entreprise
01 53 94 73 73
4 Avenue Réaumur ZA Novéos 92140 CLAMART
Technologies clés : 31

ELVESYS
Start-up
01 84 16 38 06
contact@elvesys.com
49 rue Condorcet 75009 PARIS
Ile-de-France
Technologies clés : 18

Embedded France
Association
06 72 39 74 19
eric.lerouge@embedded-france.org
http://www.embedded-france.org/contact-us/
148 Boulevard Haussman 75008 Paris
Technologies clés : 7

Emiota
Start-up
contact@emiota.com
16, rue de Picardie 75 003 Paris
Technologies clés : 5

Endentec (groupe Veolia)
Entreprise
01 45 11 55 55
http://www.endetec.com/fr/contacts/#
L'Aquarène - 1, place Montgolfier
94417 Saint-Maurice Cedex
Technologies clés : 36

Endocells
Entreprise
01 57 27 47 38
http://www.endocells.com/contact-us/
216 Bd Saint Germain Paris 75007
Technologies clés : 29

Enertime
Entreprise
01 75 43 15 40
http://www.enertime.com/fr/societe/contact
1, rue du Moulin des Bruyères 92 400 COURBEVOIE
Technologies clés : 41

ENS Cachan - Département électronique électrotechnique automatique (EEA)
Académique
01 47 40 74 00
secretariat@eea.ens-cachan.fr
61, avenue du Président Wilson
94235 Cachan cedex
Technologies clés : 46

ENSAE
École Nationale de la Statistique et de l'Administration Economique
Académique
01 41 17 65 25
info@ensae
3, avenue Pierre Larousse 92245 MALAKOFF Cedex
Technologies clés : 3

EOS Imaging
Entreprise
01 55 25 60 60
contact@eos-imaging.com
10 rue Mercœur 75011 Paris
Technologies clés : 14

EOS Innovation
Entreprise
01 84 18 04 29
contact@eos-innovation.fr
10 Avenue Arago 91380 Chilly Mazarin
Technologies clés : 12

Erasteel
Entreprise
01 45 38 63 00
infofrance@eramet-erasteel.com
Tour Maine Montparnasse
33 Avenue du Maine
75 755 PARIS CEDEX 15
Technologies clés : 9

Entreprise
01 80 38 41 32
http://www.ereie-sas.fr/contact/
3, rue de la Croix Martre – 91120 Palaiseau
Ile-de-France
Technologies clés : 41

Esi Group
Entreprise
01 49 78 28 00
https://www.esi-group.com/fr/entreprise/contactez-nous
99 rue des Solets 94513 Rungis
Technologies clés : 4

Etelm
Entreprise
01 69 31 79 00
http://www.etelm.fr/index.php?option=com_qcontacts&view=contact&id=1&Itemid=57&lang=fr
9 avenue des deux Lacs - P.A de Villejust 91971 Courtaboeuf cedex
Technologies clés : 13

Eurofins
Entreprise
01 69 10 88 97
info-eu@eurofins.com
http://www.eurofinsgenomics.eu/en/eurofins-genomics/service-center/contact-us/contact-form.aspx
9, avenue de Laponie
Les Ulis
F-91978 Courtaboeuf Cedex
Technologies clés : 26

Ex@tech - Exascal
Académique

http://www.exascale-computing.eu/contact-form/
Université de Versailles St Quentin
45, avenue des États-Unis
F-78035 VERSAILLES CEDEX
Technologies clés : 21

Expway
Entreprise
01 44 54 29 28
http://www.expway.com/contact/
44 rue La Fayette, 75009 Paris
Technologies clés : 13

Factory Systèmes
Entreprise
01 64 61 68 68
http://www.factorysystemes.fr/contact.html
19 Boulevard Albert Einstein 77420 Champs-sur-Marne
Technologies clés : 40

FIEV
Fédération des Industries des Equipements pour Véhicules
Association
01 46 25 02 30
fiev@fiev.fr
79 rue Jean-Jacques Rousseau 92150 Suresnes
Technologies clés : 45

Finance Innovation
Pôle de compétitivité
01 73 01 93 86
info@finance-innovation.org
Palais Brongniart - 28 place de la Bourse 75002 Paris
Technologies clés : 3

Finimetal
Entreprise
01 45 91 62 00
contact@finimetal.fr
157, avenue Charles Floquet 93158 Le Blanc-Mesnil Cedex
Technologies clés : 40

Fluigent
Entreprise
01 77 01 82 68
contact@fluigent.com
BIOPARK - 1, mail du professeur Mathé 94800 Villejuif
Technologies clés : 18

Force A
Entreprise
01 69 35 87 47
info@FORCE-A.fr
Université Paris Sud - Bâtiment 503 Rue du Belvédère - 91400 Orsay 91893 ORSAY CEDEX
Technologies clés : 2

GEEPS
Génie Electrique et Electronique de Paris
Académique
01 69 85 16 33
direction@lgep.supelec.fr
11, rue Joliot Curie - Plateau de Moulon 91192 Gif sur Yvette Cedex
Technologies clés : 42

Généthon
Académique
01 69 47 28 28
http://www.genethon.fr/contacts/
1 bis rue de l'Internationale 91 000 EVRY
Technologies clés : 26

Genosafe
Entreprise
01 69 47 11 57
http://www.genosafe.com/contact-2/lets-connect/
1 Rue de l'internationale, 91000 Évry
Technologies clés : 26

Geostock
Entreprise
01 47 08 73 00
infogroup@geostock.fr
2, rue des Martinets -CS 70030 - 92569 Rueil-Malmaison Cedex
Technologies clés : 15

Geovariance
Entreprise
01 60 74 90 90
info@geovariances.com
49bis avenue Franklin Roosevelt 77215 AVON
Technologies clés : 37

GIE carte bancaire
GIE
01 40 15 58 57
151 bis Rue St-Honoré 75001 Paris
Technologies clés : 34

GIFAS
Groupements des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales
Association
01 44 43 17 00
infogifas@gifas.fr
8, rue Galilée 75116 PARIS
Technologies clés : 45

GRETA (Telecom ParisTech)
Académique
catherine.pelachaud@telecom-paristech.fr
46 Rue Barrault, 75013 Paris
Technologies clés : 14

Guerbet
Entreprise
01 45 91 50 00
http://www.guerbet.com/fr/menu-bas-de-page/contact-us/formulaire-de-contact.html
22 avenue des Nations 93420 Villepinte
Technologies clés : 14

HiFiBio
Entreprise
01 40 79 45 82
10, Rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05
Technologies clés : 18

Hôpital Necker Laboratoire de thérapie cellulaire
Académique
01 42 19 28 25
liliane.dal-cortivo@nck.aphp.fr
Hôpital Necker-Enfants Malades
149, rue de Sèvres
75743 Paris Cedex 15
Technologies clés : 26, 29

Hôpital Necker Laboratoire de thérapie génique
Académique
01 44 38 15 27
salima.hacein-bey@nck.aphp.fr
Hôpital Necker-Enfants Malades
149, rue de Sèvres
75743 Paris Cedex 15
Technologies clés : 26, 29

Horiba Jobin Yvon
Entreprise
01 69 74 72 00
A 18 - 16 RUE DU CANAL - 91160 LONGJUMEAU
Technologies clés : 42

Hutchinson
Entreprise
01 40 74 83 00
http://www.hutchinson.fr/content/contactez-nous
2, rue Balzac 75008 Paris
Technologies clés : 23

Ibelem
Entreprise
01 78 89 35 00
info@ibelem.com
42 rue de Bellevue 92100 Boulogne-Billancourt Cedex
Technologies clés : 13

IBITECS - CEA
Institut de Biologie et de Technologies de Saclay
Académique
01 69 08 96 77
Cecile.GRECH@cea.fr
http://ibitecs.cea.fr/dsv/ibitecs/Pages/nous-contacter.aspx
DSV/IBITECS CEA Saclay - Bât. 532 PC 103
91191 Gif-Sur-Yvette cedex France
Technologies clés : 29

IBMA
International Biocontrol Manufacturers Association
http://www.ibmafrance.com/contacts.html
19 rue Jacques Bingen 75017 PARIS
Technologies clés : 27

ICM
Institut du cerveau et de la moëlle épinière IHU A-ICM
IHU
Institut Carnot
01 57 27 40 00
contact@icm-institute.org
http://icm-institute.org/fr/contact/
47, bd de l'hôpital 75013 PARIS
Technologies clés : 14

IDEX IPGG
Institut Pierre Gilles de Gennes pour la Microfluidique
IDEX
01 40 79 51 56
http://www.institut-pgg.fr/Contactez-l-IPGG_36.html
10 rue Vauquelin - 75005 Paris
Technologies clés : 18

IER (groupe Bolloré)
IMPRESSION ENREGISTRE RESULTAT
Entreprise
01 41 38 60 00
communication@ier.fr
3, rue Salomon de Rothschild 92150 Suresnes
Technologies clés : 2

IFSTTAR
Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
Académique
01 81 66 80 00
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne, F-77447 Marne la Vallée Cedex 2
Technologies clés : 39

IHU ICAN
Institut de cardiologie-Métabolisme-Nutrition
IHU
contact@fondation-ican.com
Hôpital la Pitié Salpêtrière
91 Bd de l'Hôpital
75013 Paris 13
Technologies clés : 18

Iliad Telecom - Free
Entreprise
01 73 50 20 00
contact@iliadtelecom.com
8 rue de la Ville l'Evêque 75008 Paris
Technologies clés : 6

Imerys
Entreprise
01 49 55 63 00
http://www.imerys.com/scopi/group/imeryscom/imeryscom.nsf/pagesref/SBDD-8Q7D5J?OpenDocument&Lang=FR
154 rue de l'Université - 75007 Paris
Technologies clés : 39

Immunologie-Immunopathologie-Immunothérapie - UPMC
Académique
01 44 17 74 61
david.klatzmann@upmc.fr
Biologie et Thérapeutique des Pathologies Immunitaires - UMR 7087- UPMC/CNRS- CERVI- Hôpital Pitié-Salpêtrière - 83, bd de l'Hôpital 75651 Paris cedex 13
Technologies clés : 15

Infotron
Entreprise
01 60 13 66 00
http://www.infotron.fr/CONTACT
17 rue Ampère - 91300 MASSY
Technologies clés : 12

Ingenico
Entreprise
01 58 01 80 00
28-32, boulevard de Grenelle 75015 Paris
Technologies clés : 34

INRA Environnement
Institut National de Recherche Agronomique
Académique
01 30 83 32 71
christian.mougin@versailles.inra.fr
INRA Centre de Versailles-Grignon RD 10- 78026 Versailles Cedex
Technologies clés : 37

Instent
Start-up
contact@instent.eu
73 Rue Léon Bourgeois 91120 PALAISEAU
Technologies clés : 31

Institut Cochin
Académique
01 40 51 64 57
u1016@inserm.fr
22 rue Méchain, 75014 Paris
Technologies clés : 29

Institut d'Electronique fondamentale de l'Université Paris Sud
Académique
01 69 15 65 10
direction.ief@u-psud.fr
Bât 220, rue André Ampère – Université Paris-Sud - Centre scientifique d'Orsay, F91405 Orsay cedex
Technologies clés : 46

Institut de la vision
Académique
01 53 46 26 48
contact@institut-vision.org
Institut de la Vision - 17 rue Moreau - 75012 Paris
Technologies clés : 31

Institut de Physique Nucléaire
Académique
communication@ipno.in2p3.fr
15 Rue Georges Clemenceau, 91400 Orsay
Technologies clés : 44

Institut d'imagerie neurofonctionnelle - NeuroSPin
Académique
Grand Infrastructure lié à l'institut d'imagerie biomédical implanté sur le site du CEA Saclay
chantal.gourlan@cea.fr
Bâtiment 145, Centre d'études de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette
Technologies clés : 14

IntegraGen
Entreprise
01 60 91 09 00485
http://www.integragen.com/fr/contactez-nous/formulaire-contact
Génopole Campus 1 – Bât. 8 - 5, Rue de Henri Desbruères 91000 Evry
Technologies clés : 26

IPVF
Institut Photovoltaïque d'Île-de-France
Académique
01 81 89 28 10
contact@ipvf.fr
8, rue de la Renaissance 92160 Antony
Technologies clés : 42

IRAMIS
Institut Rayonnement Matière de Saclay
Académique
01 69 08 70 38
herve.desvaux@cea.fr
Bât 524
CEA - Saclay 91191 Gif sur Yvette
Technologies clés : 8

IRDEP
Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque
Académique
01 30 87 72 44
6, quai Watier – BP 49 – 78401 Chatou
Technologies clés : 42

I-Stem
Institut des cellules Souches pour le Traitement et l'Étude des maldies Monogéniques
Académique
01 69 90 85 17

http://www.istem.eu/contacts/
Genopole Campus 1, 5 rue Henri Desbruères 91030 EVRY Cedex
Technologies clés : 29

ITAI IFIP
Institut du Porc
ITAI
01 58 39 39 50
ifip@ifip.asso.fr
5, rue Lespagnol 75020 Paris
Technologies clés : 28

Kalray
Entreprise
01 84 00 00 45
http://www.kalray.eu/kalray/contact-us/http://www.kalray.eu/kalray/contact-us/
86 rue de Paris 91400 Orsay
Technologies clés : 46

Keyrus
Entreprise
01 41 34 10 00
http://www.keyrus.com/keyrus/general-informations/contact/id/40694
155 rue Anatole France 92593 Levallois-Perret Cedex
Technologies clés : 3

Ile-de-France
Kidova
Entreprise
01 47 09 09 49
contact@kidova.com
155 avenue Roger Salengro, F-92370 Chaville
Technologies clés : 37

Laboratoire MMN
Microfluidique, Mems, Nanostructures
Académique
01 40 79 51 90
ESPCI
10, rue Vauquelin
75005 Paris
Technologies clés : 18

Laboratoire SAMOVAR, Télécom Sud-Paris/Institut Mines Télécom
Académique
walid.benameur@telecom-sudparis.eu
SAMOVAR UMR 5157
TELECOM Sudparis (ex INT)
9 rue Charles Fourier
91011 EVRY
Technologies clés : 34

Laster
Entreprise
01 77 06 70 94
contact@laster.fr
Zone d'Activité de Courtaboeuf - 7, avenue de l'Atlantique - Bât. A - 2eme ét.-91969 COURTABOEUF CEDEX
Technologies clés : 14

LCMCP (Paris)
Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris
Académique
01 44 27 15 08
Collège de France, Bat. C-D, 11 place Marcelin Berthelot 75231 PARIS Cedex 05
Technologies clés : 23

Leosphere
Entreprise
01 81 87 05 00
info@leosphere.com
http://www.leosphere.com/contact-leosphere-wind-measurement-lidar
16 rue Jean Rostand
91400 Orsay
Technologies clés : 2

LIGM (UPEM)
Académique
01 60 95 75 00
5 boulevard Descartes - Champs-sur-Marne - 77454 Marne-la-Vallée Cedex 2
Technologies clés : 19

LIMSI
Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur
Académique
01 69 85 80 80
contact@limsi.fr
Rue John von Neumann - Campus Universitaire d'Orsay - Bât 508 - 91405 ORSAY CEDEX
Technologies clés : 19

LIX - École Polytechnique
Laboratoire d'Informatique de l'École Polytechnique
Académique
01 77 57 80 30
UMR 7161 - 1 rue Honoré d'Estienne d'Orves - Bâtiment Alan Turing - Campus de l'École Polytechnique - 91120 Palaiseau
Technologies clés : 21

LNE
Laboratoire national de métrologie et d'essais
Académique
01 40 43 37 00
info@lne.fr
1, rue Gaston Boissier - 75724 Paris Cedex 15
Technologies clés : 36

Logic Instrument
Start-up
01 39 35 61 61
France@logic-instrument.com
43 Avenue de l'Europe, BP60012, 95331 DOMONT cedex
Technologies clés : 13

LPICM
Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Minces
Académique
01 69 33 43 03
pere.roca@polytechnique.edu
École Polytechnique
Route de Saclay
91128 Palaiseau
Technologies clés : 42

LPN
Laboratoire de Photonique et de Nanostructures
Académique
01 69 63 60 55
contact@lpn.cnrs.fr
LPN-CNRS - Route de Nozay 91460 MARCOUSSIS
Technologies clés : 46

LSV
Laboratoire specification et vérification (LSV)
Académique
0 1 47 40 75 20
61, avenue du Président Wilson 94235 CACHAN Cedex, France
Technologies clés : 20

LTCI
Laboratoire Traitement et Communication de l'Information
Académique
olivier.cappe@telecom-paristech.fr
CNRS LTCI
Télécom ParisTech
46 rue Barrault
F-75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 11

Luceor
Entreprise
01 47 36 22 80
contact@luceor.com
2, Place Jules Gévelot 92138 Issy-les-Moulineaux Cedex
Technologies clés : 13

MacGuff
Entreprise
01 53 58 46 46
6 rue de la Cavalerie 75015 Paris
Technologies clés : 47

Madea concept
Entreprise
01 60 66 31 20
contact@madeaconcept.com
Pôle d'activités de Melun Villaroche - Chemin de Viercy 77550 Limoges Fourches
Technologies clés : 4

MathWorks
Entreprise
01 41 14 87 00
Les Montalets - 2 rue de Paris 92190 Meudon
Technologies clés : 4

Mauna Kea Technologies
Entreprise
01 48 24 03 45
http://www.maunakeatech.com/fr/content/contactez-nous
9, rue d'Enghien 75010 Paris
Technologies clés : 14

Maurel & Prom
Entreprise
contact@maureletprom.fr
51, rue d'Anjou
75008 Paris
Technologies clés : 15

Mercenaries Engineering
Entreprise
01 80 05 30 42
contact@mercenaries-engineering.com
84 AVENUE DE LA REPUBLIQUE 75011 PARIS
Technologies clés : 47

Mersen
Entreprise
01 46 91 54 00
Immeuble La Fayette - 2, place des Vosges F-92051 La Défense Cedex
Technologies clés : 42

MetaGenoPolis
Académique
contact@mgps.com
http://mgps.eu/new/index.php?id=accueil#contact
MetaGenoPolis 78350 Jouy-en-Josas
Technologies clés : 28

Metrohm France
Entreprise
01 64 86 97 00
13, Avenue du Québec - CS 90038 - 91 978 Villebon Courtaboeuf
Technologies clés : 36

MIKROS Images
Entreprise
01 55 63 11 00
120 Rue Danton, 92300 Levallois-Perret – France
Technologies clés : 47

Millidrop
Start-up
contact@millidrop.com
10 RUE VAUQUELIN 75005 PARIS
Technologies clés : 18

Mines ParisTech
Académique
01 40 51 92 45
recherche@mines-paristech.fr
60, boulevard Saint-Michel 75272 Paris cedex 06
Technologies clés : 7

Mines Telecoms
Académique
01 45 81 80 80
http://www.mines-telecom.fr/contacts-acces/
46 rue Barrault 75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 13

Mircen
Molecular Imaging Research Center
Académique
01 46 54 84 11
CEA-Fontenay-aux-Roses Bâtiment 61 - 18, route du Panorama 92265 Fontenay-aux-Roses cedex
Technologies clés : 14

Mirsense
Start-up
http://mirsense.com/?page_id=33
BATIMENT ERABLE
86 RUE DE PARIS
91400 ORSAY
Read more at http://www.societe.com/societe/mirsense-809229750.html#LLXiVOWr3fk7IUsM.99
Technologies clés : 46

Morpho
Entreprise
01 58 11 25 00
info@morpho.com
11, boulevard Galliéni 92130 - Issy-les-Moulineaux
Technologies clés : 34

Motiontree
Entreprise
contact@motiontree.net
8 rue Georges Duhamel – 242 75015 PARIS
Technologies clés : 47

Murex
Entreprise
01 44 05 32 00
8 rue Bellini 75016 Paris
Technologies clés : 4

My Brain Technologies
Start-up
contact@mybraintech.com
http://www.melomind.com/fr/contact/
63 RUE BLANCHE 75009 PARIS
Technologies clés : 5

Neodyss
Start-up
06 64 75 21 17
info@neodyss.com
54, rue Nicolo 75116 Paris
Technologies clés : 15

Neovacs
Entreprise
01 53 10 93 00
http://neovacs.fr/contact/
3-5, Impasse Reille 75014 PARIS
Technologies clés : 15

Nexans
Entreprise
01 55 62 70 00
4-10 rue Mozart 92587 Clichy cedex
Technologies clés : 43

Nova Watt
Entreprise
01 70 82 11 70
contact@novawatt.com
La Grande Arche - Paroi NORD - 1, Parvis de la Défense 92800 PUTEAUX
Technologies clés : 22

Numericable
Entreprise
01 64 61 14 04
10 RUE ALBERT EINSTEIN 77420 CHAMPS SUR MARNE
Technologies clés : 6

Oberthur
Entreprise
01 78 14 70 00
420, rue d'Estienne d'Orves 92700 Colombes
Technologies clés : 34

Observatoire de la qualité de l'air intérieur
OQAI
entreprise
01 64 68 82 66
contact@oqai.fr
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment 84, avenue Jean Jaurès – Champs sur Marne 77447 Marne la Vallée Cedex 2
Technologies clés : 36

Opentrust
Entreprise
01 55 64 22 00
https://www.opentrust.com/contact/
175, rue Jean-Jacques Rousseau CS 70056 92138 Issy-les-Moulineaux Cedex
Technologies clés : 34

Optics Valley
Cluster
01 69 31 75 00
35 boulevard Nicolas Samson, 91120 Palaiseau
Technologies clés : 2

Orange Labs
Entreprise
R&D
01 45 29 44 44
38-40, rue du Général Leclerc 92130 Issy-les-Moulineaux
Technologies clés : 11

Orchidis
Entreprise
01 55 09 10 10

http://www.orchidis.com/fr/contact.php
90, Rue du professeur Paul Milliez ZI des Nations 94506 CHAMPIGNY SUR MARNE
Technologies clés : 36

Ortholine France
Entreprise
01 43 56 33 50
106 Rue de Charenton, 75012 Paris
Technologies clés : 31

Owi
Entreprise
contact@owi-tech.com
31, avenue du Général Leclerc 92340 Bourg-la-Reine
Technologies clés : 19

Partnering Robotics
Entreprise
info@partnering.fr
4, Rue du lendemain - 95800 Cergy
Technologies clés : 12

PECSA - Laboratoire Physicochimie des Electrolytes, Colloïdes et Sciences Analytiques
Académique
veronique.peyre@upmc.fr
Université Pierre et Marie Curie/CNRS UMR79 - 4, place Jussieu 75005 Paris
Technologies clés : 23

Perenco
Entreprise
01 53 57 66 00
7 rue de Logelbach 75017 Paris
Technologies clés : 15

Pertimm
Entreprise
01 47 33 88 49
web-contact@pertimm.com
51 boulevard Voltaire 92600 Asnières-sur-Seine
Technologies clés : 19

Phytorestore
Entreprise
01 43 72 38 00
info@phytorestore.com
146 Boulevard de Charonne 75020 Paris
Technologies clés : 37

Pierre Fabre
Entreprise
01 53 53 20 50
Avenue Hoche 75008 Paris
Technologies clés : 8

Pixium vision
Entreprise
01 76 21 47 30
infos@pixium-vision.com
74 rue du Faubourg Saint-Antoine, 75012 Paris
Technologies clés : 31

Plateforme de la filière automobile
Recherche
01 41 44 94 30
http://www.pfa-auto.fr/index.php/contact/
79 rue JJ Rousseau 92150 Suresnes
Technologies clés : 20

Poly-Ink
Entreprise
01 41 11 45 10
contact@poly-ink.fr
27, Boulevard Louise Michel 92230 Gennevilliers
Technologies clés : 1

Precogs Software
Start-up
01 84 16 09 86
33 RUE ALBERT THOMAS - Paris 75010
Technologies clés : 3

Prescom
Entreprise
01 30 85 55 55
http://www.prescom.fr/compagnie/nous-contacter/
3 rue Michael Faraday F-78180 Montigny le Bretonneux
Technologies clés : 13

PRISM
Académique
01 39 25 40 77
chantal.ducoin@uvsq.fr
Université de Versailles St Quentin
45, avenue des États-Unis
F-78035 VERSAILLES CEDEX
Technologies clés : 21

Prodways
Entreprise
01 30 90 44 12
http://www.prodways.com/nous-contacter/
ZI Les Garennes 1/3 rue Chappe, 78130 Les Mureaux
Technologies clés : 9

Projet LiveGrid
Académique
consortium regroupant : Université Paris-Saclay, EDF, CEA…
http://www.livegrid.fr/contact.html
6, boulevard Dubreuil
91400 Orsay
Technologies clés : 22

PS2E
Paris-Saclay Efficacité Energétique ITE
01 39 07 62 62
contact@institut-ps2e.com
1, chemin de la porte des loges - BP 126 Les Loges-en-Josas 78354 Jouy-en-Josas Cedex
Technologies clés : 41

Qualibat
Association
01 47 04 26 01
55 avenue Kléber 75784 PARIS Cedex 16
Technologies clés : 39

Quantic Dream
Entreprise
01 44 64 00 90
54 boulevard DAVOUT 75020 Paris
Technologies clés : 47

Radiall
Entreprise
01 49 35 35 35
info@radiall.com
25, Rue Madeleine VIONNET 93300 AUBERVILLIERS
Technologies clés : 46

RedBird
Entreprise
01 84 16 52 01
contact@redbird.fr
130 rue de Lourmel, 75015 Paris
Technologies clés : 12

Rivale
Entreprise
01 47 76 32 66
7-9 rue Paul Lafargue - La Défense 92800 Puteaux
Technologies clés : 27

SAFT
Entreprise
01 49 93 19 18
12 rue Sadi Carnot 93170 Bagnolet
Technologies clés : 23

Sagemcom R&D
Entreprise
01 57 61 10 00
switchboard@sagemcom.com
250 route de l'Empereur 92848 Rueil-Malmaison Cedex
Technologies clés : 22

Saipem
Entreprise
01 61 37 88 88
contact@saipem-sa.com
7 Avenue de San Fernando, 78180 Montigny-le-Bretonneux
Technologies clés : 43

Saur
Entreprise
01 30 60 84 00
1, rue Antoine Lavoisier 78280 - GUYANCOURT
Technologies clés : 35

Scienomics
Entreprise
http://scienomics.com/contact/general-inquiry
16, rue de l'Arcade
75008 Paris, France
Technologies clés : 4

Sculpteo
Entreprise
01 83 64 11 22
10 Rue Auguste Perret 94800 Villejuif
Technologies clés : 9

Secomam
Entreprise
01 55 09 10 10
90, rue du Professeur P. Milliez 94506 Champigny/Marne
Technologies clés : 36

Segula
Entreprise
01 41 39 44 00
17/23, rue d'Arras - 92000 NANTERRE
Technologies clés : 20

Sen.se
Entreprise
01 40 11 15 93
touch@sen.se
34 Av. des Champs-Élysées, Bâtiment A - 3e étage, 75008 Paris
Technologies clés : 5

Serious Factory
Entreprise
01 70 71 98 40
contact@seriousfactory.com
4, rue Gustave Flourens 92150 Suresnes
Technologies clés : 4

Servier
Entreprise
01 55 72 60 00
http://www.servier.fr/contact
50 rue Carnot 92284 Suresnes
Technologies clés : 29

Sevenhugs
Entreprise
01 46 57 79 61
contact@seven-hugs.com
21 bis rue des Citeaux – 92130 Issy les Moulineaux
Technologies clés : 5

Silex International
Entreprise
01 30 37 00 00
info@silexinternational.com
63, chemin de la Chapelle Saint Antoine - Zone d'Activités - 95300 ENNERY
Technologies clés : 37

Simpulse
Entreprise
09 52 63 65 85
contact@simpulse-dsp.com
7 rue de la Croix Martre 91120 Palaiseau
Technologies clés : 6

SNCF
Entreprise
com.recherche@sncf.fr
45 rue de Londres 75379 Paris
Technologies clés : 45

Snecma
Entreprise
01 69 87 09 00
10, allée du Brévent CE 1420 Courcouronnes 91019 Evry Cedex
Technologies clés : 9

Snips
Entreprise
contact@snips.net
8 rue Edouard Lockroy 75011 Paris
Technologies clés : 11

Société Française de Radiologie
Académique
01 53 59 59 69
sfr@sfradiologie.org
20, av. Rapp - F-75007 Paris
Technologies clés : 14

Socotec
Entreprise
01 30 12 80 00
Les Quadrants - 3 avenue du Centre - CS 20732 - Guyancourt 78182 St-Quentin-en-Yvelines Cedex
Technologies clés : 37

Sofradir
Entreprise
01 60 92 18 30
Avenue de la Vauve - CS20018, 91127, PALAISEAU
Technologies clés : 2

Sogeti High Tech
Recherche
01 40 93 73 00
infohightech@sogeti.com
2-10 rue Marceau 92136 Issy Les Moulineaux
Technologies clés : 20

Sol Environnement
Entreprise
01 47 76 55 90
22-24 rue Lavoisier, Bât B 92000 Nanterre
Technologies clés : 37

Soléo Services
Entreprise
01 39 29 75 70
http://www.soleo-services.fr/soleo-services/contact-soleo/
ZAC des Chevries 11 rue des Chevries 78410 Aubergenville
Technologies clés : 37

SolidAnim
Entreprise
01 46 70 96 43
http://www.solidanim.com/contact/
52 avenue Pierre Sémard 94200 Ivry Sur Seine
Technologies clés : 47

Spectralys
Entreprise
01 41 50 67 70
102 Avenue Gaston Roussel, 93230 Romainville
Technologies clés : 2

Spirops
Entreprise
R&D
01 48 05 10 98
contact@spirops.com
8, passage de la bonne graine 75011 Paris
Technologies clés : 11

Spring Technologies
Entreprise
01 43 60 25 00
Immeuble Le Méliès - 261, rue de Paris - 93556 Montreuil Cedex
Technologies clés : 4

Stanley Robotics
Entreprise
contact@stanley-robotics.com
13 Rue Saint-Honoré 78000 Versailles
Technologies clés : 12

Starbreeze
ex-Infiniteye
Entreprise
ir@starbreeze.com
10 RUE DES 3 PORTES 75005 PARIS France
Ile-de-France
Technologies clés : 14

Stilla Technologies
Entreprise
01 69 33 52 87
info@stilla.fr
École Polytechnique 91128, Palaiseau
Technologies clés : 18

Stratecollege
Académique
01 46 42 88 77
27, avenue de la Division Leclerc 92310, Sèvres
Technologies clés : 47

Structure et Computation
Entreprise
contact@structure-computation.com
86 rue de Paris, 91400 Orsay
Technologies clés : 4

Suez - CIRSEE
Centre International de Recherche Sur l'Eau et l'Environnement
Académique
01 34 80 23 45
38, rue du Président Wilson 78 230 Le Pecq
Technologies clés : 2

Sun'R
Entreprise
01 53 81 03 15
http://www.jotformeu.com/sunr/contact-autres
7 Rue Clichy, 75009 Paris
Technologies clés : 42

Syllabs
Start-up
01 55 28 67 34
hello@syllabs.com
26 rue Notre-Dame de Nazareth 75003 Paris
Technologies clés : 3

Teratec
Pôle européen de compétence en simulation numérique haute performance
Entreprise
R&D
09 70 65 02 10
infos@teratec.fr
http://www.teratec.eu/info/contacts.html
Campus Teratec - 2, rue de la piquetterie 91680 BRUYERES-LE-CHATEL, France
Technologies clés : 21

Texcell
Entreprise
01 60 91 33 10
info@texcell.com
GENAVENIR 5 1, Rue Pierre Fontaine F-91058 EVRY Cedex
Technologies clés : 29

Très Grand Centre de Calcul - CEA
Académique
09 70 65 02 10
infos@teratec.fr
Campus Teratec, 2, rue de la piquetterie 91680 BRUYERES-LE-CHATEL
Technologies clés : 21

Trinov
Entreprise
01 70 61 19 40
info@trinov.com
37 rue Guersant 75017 Paris
Technologies clés : 4

Ubisoft
Entreprise
01 48 18 50 00
28 rue Armand Carrel 93108 Montreuil-sous-Bois
Technologies clés : 47

UFIP
Union Française de l'Industrie Pétrolière
Fédération professionnelle
01 40 53 70 00
4, avenue Hoche, 75008 Paris
Technologies clés : 15

Umanlife
Entreprise
01 40 54 99 65
contact@umanlife.com
2, rue Meissonier 75017 Paris
Technologies clés : 33

United Biometrics
Entreprise
contact@unitedbiometrics.com
ORSAY PARC
86 rue de Paris
91400 ORSAY
Technologies clés : 34

Valgo
Entreprise
01 56 43 64 50
http://www.valgo.com/fr/Contact/Contactez-nous/id_61
25 rue de Ponthieu - Bât C - 4ème étage - F-75008 PARIS
Technologies clés : 37

VeDeCoM
IRT
01 30 97 01 80
http://vedecom.fr/fr/contactez-nous.html
77 rue des Chantiers, 78000 Versailles
Technologies clés : 45

Vinci Construction
Entreprise
01 46 95 70 00
61 Avenue Jules Quentin, 92000 Nanterre
Technologies clés : 39

Viotech
Entreprise
09 81 91 93 31
Contact@viotech.net
13 rue Saint Honoré 78000 Versailles
Technologies clés : 20

Voir et Entendre
Institut Carnot
01 53 46 26 48
17 rue Moreau 75012 Paris
Technologies clés : 19

Voltalia
Entreprise
01 44 63 14 40
http://www.voltalia.com/fr/contact_81.html
28 rue de Mogador 75009 Paris
Technologies clés : 43

Voltalis
Entreprise
01 49 06 47 00
contact@voltalis.com
Tour Franklin - 100/101 Terrasse Boieldieu 92042 PARIS LA DEFENSE
Technologies clés : 22

Wandercraft
Start-up
http://www.wandercraft.eu/contacts.html
Incubateur de l'École Nationale Supérieure des Arts & Métiers - 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris
Technologies clés : 10

Watchfrog
Entreprise
01 69 36 11 15
info@watchfrog.fr
4 RUE PIERRE FONTAINE / 91000 ÉVRY
Technologies clés : 26

Zodiac Aerospace
Entreprise
01 61 34 23 23
http://www.zodiacaerospace.com/fr/contact
61 rue Pierre Curie - CS20001 - 78373 Plaisir Cedex
Technologies clés : 20

BPI Ile-de-France - Paris
Paris
BPI
01 53 89 78 78
http://contact.bpifrance.fr/#
6/8, boulevard Haussmann 75009 Paris
Technologies clés :

BPI Ile-de-France - Est
Ile de France Est
BPI
01 48 15 56 55
http://contact.bpifrance.fr/#
16, boulevard du Mont d'Est Maille Nord IV - Hall 41 93192 Noisy-le-Grand Cedex
Technologies clés :

BPI Ile-de-France - Ouest
Ile de France Ouest
BPI
01 46 52 92 00
http://contact.bpifrance.fr/#
La Grande Arche - Paroi Nord 1, parvis de la Défense 92044 Paris La Défense Cedex
Technologies clés :

AGORANOV
Incubateur
01 44 18 07 15
jean-michel.dalle@upmc.fr
96 bis boulevard Raspail
75006 Paris
Technologies clés :

IDF Innov
SATT
01 44 23 21 50
contact@idfinnov.com
37 rue de Lyon, 75012 Paris
Technologies clés :

Incuballiance
Incubateur
01 77 93 21 01
p.moreau@incuballiance.fr
Orsay Parc – Bâtiment Erable
86 rue de Paris
91400 Orsay
Technologies clés :

Institut de soudure
CTI
http://www.isgroupe.com/fr/Contacts/_layouts/IS/ContactForm.aspx?language=fr
90 Rue des Vanesses, 93420 Villepinte
Technologies clés :

PARIS BIOTECH SANTÉ
Incubateur
01 53 10 53 53
amedeemanesme.o@parisbiotech.org
Université Paris 5 René Descartes
Faculté de médecine Cochin Port Royal
24 rue du Faubourg Saint Jacques
75014 Paris
Technologies clés :

SATT Paris-Saclay
SATT
contact@satt-paris-saclay.fr
http://satt.e-monsite.com/contact/demande-de-renseignements.html
24, boulevard de l'Hôpital
75005 PARIS
Technologies clés :

Inserm Idf (u951)
Académique
01 69 47 29 93
http://www.idf.inserm.fr/contact
1 bis rue de l'Internationale
91002 Evry
Technologies clés : 26

Balyo
Entreprise
01 55 26 43 10
http://www.balyo.com/fr/Contact
170 Rue Raymond Losserand, 75014 Paris
Technologies clés : 10

Eolfi
Filiale du groupe Véolia
Environnement
Entreprise
0 1 40 07 95 00
contact@eolfi.com
http://www.eolfi.com/fr/contact.htm
12 rond-point des Champs-Elysées
75008 PARIS
Technologies clés : 43

Deezer
Entreprise
01 55 80 69 00
cantact-fr@deezer.com
12 rue d'Athènes 75009 Paris
Technologies clés :

Dailymotion Paris
Entreprise
01 77 35 11 00
140 boulevard Malesherbes
75017 Paris
Technologies clés :

Le Labo de l'édition
Entreprise
01 83 64 89 00
labodeledition@parisregionlab.com
2, rue Saint-Médard
75005 Paris
Technologies clés :

ICCA
Industries Culturelles et Création Artistique
Académique
Labex
01 49 40 30 00
labex.icca@univ-paris13.fr
Université Paris 13
99, Avenue Jean-Baptiste Clément
93 430 Villetaneuse
Technologies clés :

IREST
Institut de recherche et d'études supérieures du tourisme
Académique
01 79 41 90 17
dirirest@univ-paris1.fr
16 boulevard Carnot 93340 BOURG LA REINE
Technologies clés :

Patrima
Académique
Labex
fondation.patrima@gmail.com
33, boulevard du Port
95011 Cergy-Pontoise Cedex
Technologies clés :

CEISME
Centre d'Étude sur les Images et les Sons médiatiques
Académique
01 45 87 79 50
francois.jost@univ-paris3.fr
Université Sorbonne Nouvelle - Paris 3
1, rue Censier 3e étage
75005 Paris
Technologies clés :

IRCAV
Institut de recherche sur le cinéma et l'audiovisuel
Académique
01 45 87 79 88
ircav@univ-paris3.fr
Université Sorbonne Nouvelle - Paris 3
Centre Censier 13, rue Santeuil
75231 Paris Cedex 05
Technologies clés :

LABSIC
Laboratoire des Sciences de l'Information et de la Communicatopn
Académique
legendre.bertrand@wanadoo.fr
http://labsic.univ-paris13.fr/index.php/contacts/67-labsic/8-directeur-du-labsic-
UNIVERSITÉ PARIS 13
UFR des sciences de la communication
99, avenue Jean Baptiste Clément
93430 Villetaneuse
Technologies clés :

DIRECCTE Ile de France
DIRECCTE
01 70 96 17 05
idf-polec@direccte.gouv.fr
http://www.idf.direccte.gouv.fr/accueil-31
Pôle C 19 rue Madeleine Vionnet
Technologies clés :

La réunion

Qualitropic
Pôle de compétitivité
02 62 97 10 88
qualitropic@qualitropic.fr
http://www.qualitropic.fr/nous-contacter.php?postname_fr=nous-contacter
Quartier d'Affaires La Mare - Bât B – La Turbine - 5ème niveau - 5 rue André Lardy 97438 Sainte-Marie
Technologies clés : 27, 28

DIECCTE La Réunion
DIECCTE
02 62 90 21 41
974-polec@dieccte.gouv.fr
http://www.reunion.dieccte.gouv.fr/La-Reunion
Rue Bois de Nègles 12, Lotissement Lemerle
Technologies clés :

Languedoc Roussilon

DIRECCTE Languedoc Roussillon
DIRECCTE
04 67 22 88 88
lrouss-polec@direccte.gouv.fr
http://www.languedoc-roussillon.direccte.gouv.fr/accueil-3
Pôle C 615 Bd d'Antigone CS 19002
Technologies clés :

Derbi
Pôle de compétitivité
04 68 66 17 96
contact@pole-derbi.com
52 avenue Paul Alduy 66860 Perpignan Cedex
Technologies clés : 22, 24, 40, 42

CEA Marcoule
Académique
04 66 79 60 00
communication-marcoule@cea.fr
30200 Chusclan
Technologies clés : 4, 44

CED2 - CHIMIE BALARD
Chimie, Environnement et Développement Durable
Académique
Institut Carnot
06 43 56 43 32
contact@carnot-chimie-balard.fr
École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier, 8 rue de l'École Normale 34296 Montpellier cedex 5
Technologies clés : 1, 26

Deinove
Entreprise
04 48 19 01 00
http://www.deinove.com/fr/contact
Cap Sigma / ZAC Euromédecine II, 1682 rue de la Valsière 34790 Grabels
Technologies clés : 8, 26

ICSM
Institut de Chimie Séparative de Marcoule
04 66 33 92 79
icsm@cea.fr
ICSM UMR 5257 – CEA / CNRS / UM2 / ENSCM, Site de Marcoule, Bâtiment 426, BP 17171, F-30207 Bagnols Sur Ceze Cedex
Technologies clés : 8, 44

INRA LBE
Laboratoire de biotechnologie de l'environnement
Académique
04 68 42 51 51
lbe-contact@supagro.inra.fr
http://www6.montpellier.inra.fr/narbonne/Contact
Avenue des Etangs. 11100 Narbonne
Technologies clés : 8, 24

Pôle EAU
Pôle de compétitivité
04 34 88 34 43
direction@pole-eau.com
http://www.pole-eau.com/Informations/Contact
672 rue du Mas de Verchant 34000 Montpellier
Technologies clés : 35, 36

Apex Energies
Entreprise
04 99 62 26 22
contact@apexenergies.fr
256 rue de Thor 34000 Montpellier
Technologies clés : 42

Biophytec
Entreprise
06 24 41 33 07
http://www.biophytech.fr/contacts
4, rue du Grand Chêne - ZA des Avants 34270 SAINT-MATHIEU-DE-TREVIERS
Technologies clés : 27

Bodysens
Entreprise
09 72 45 08 42
442 Rue Georges Besse, Immeuble Innovation 3, 30035 Nîmes
Technologies clés : 2

Dyneff
Entreprise
04 67 12 35 70
Stratégie Concept Bât.5 - 1300 Avenue Albert Einstein - CS 76033 - 34060 Montpellier Cedex
Technologies clés : 15

EDF EN
EDF Energies Nouvelles
Entreprise
R&D
04 67 09 82 00
http://www.edf-en.fr/vous-avez-un-projet/
Centre Européen de Colombiers
10 rue de la Jasse
ZA Viargues
34440 Colombiers
Technologies clés : 43

ICG-AIME (Montpellier)
Agrégats, Interfaces et Matériaux pour l'Energie
Académique
04 67 14 33 41
lammi@univ-montp2.fr
ICGM - UMR5253- Equipe AIME
Université Montpellier 2
2 Place Eugène Bataillon
CC1502
34095 Montpellier CEDEX 5
Technologies clés : 23

Indatech
Entreprise
07 62 83 59 45
sales@indatech.eu
Z.A. La Plaine
4 rue Georges Besse
34 830 CLAPIERS
Technologies clés : 2

Izuba energies
Entreprise
04 67 18 31 10
contact@izuba.fr
35 rue Gine - Écoparc - 34690 FABRÈGUES
Technologies clés : 4

LFB Biomanufacturing
Entreprise
04 66 56 40 80
LFB-Biomanufacturing@lfb.fr
Impasse des Chênes Rouges 30319 Alès
Technologies clés : 26

LIRMM
Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier
Académique
04 67 41 85 85
Université Montpellier 2
LIRMM UMR 5506
CC477
161 rue Ada
34095 Montpellier Cedex 5
Technologies clés : 12

MACS
Matériaux avancés pour la catalyse et la Santé, ICG Montpellier
Académique
04 67 16 34 62
Institut Charles Gerhardt Montpellier - École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier - Parc Euromédecine
104 Rue de la Galéra 34090 Montpellier Cedex 5
Technologies clés : 1

Medtech
Entreprise
04 67 10 77 40
http://medtech.fr/fr/contact
ZAC Eurêka - 900, rue du Mas de Verchant 34000 Montpellier
Technologies clés : 12

Neollia
Entreprise
04 67 16 34 98
info@neollia.com
8, rue de l'École Normale 34298 Montpellier
Technologies clés : 1

Oceasoft
Entreprise
04 99 13 67 30
126 Rue Emile Baudot, 34000 MONTPELLIER
Technologies clés : 2

Oreka Solutions
Entreprise
04 66 33 74 10
contact@orekasolutions.com
ZA de Berret 615 avenue de la roquette 30200 Bagnols-sur-Cèze
Technologies clés : 44

Phylogene
Entreprise
04 66 04 77 99
contact@phylogene.com
62 RN 113 30620 Bernis
Technologies clés : 18

Plateforme MGX
Montpellier Genomix
Académique
Bureau biologie moléculaire :
04 34 35 92 41
Bureau bioinformatique :
04 34 35 92 39
http://www.mgx.cnrs.fr/spip.php?article12
c/o Institut de Génomique Fonctionnelle
IGF-sud, Rez-de-chausée, Bureaux 20 et 21
UMR 5203 CNRS – U 661 INSERM – Université de Montpellier
141, rue de la cardonille
34094 MONTPELLIER Cedex 05
Technologies clés : 26

PROMES
PROcédés, Matériaux et Énergie Solaire
Académique
04 68 30 77 00
7 rue du four solaire, ODEILO - 66120 FONT - ROMEU
Technologies clés : 41

Quadran
Entreprise
04 67 26 61 28
contact@quadran.fr
Domaine de Patau - Chemin de Maussac-Patau 34420 VILLENEUVE-LES-BÉZIERS
Technologies clés : 43

SEMCO Engineering
Entreprise
04 67 61 90 90
625 Rue De La Croix Verte, Parc Euromedicine Cedex 5 - 34196 Montpellier
Technologies clés : 42

Tellmeplus
Entreprise
04 67 13 01 10
contact@tellmeplus.com
Cap Omega CS 39521 - 34960 Montpellier Cedex
Technologies clés : 11

T-Waves Technologies
Entreprise
09 72 44 13 81
Laboratoire Charles Coulomb UMR 5221 CNRS-UM2, Université Montpellier 2 – Batiment 13, Place Eugène Bataillon – CC069, F-34095 Montpellier Cedex 5
Technologies clés : 2

Unelvent
Entreprise
04 68 53 02 60
unelvent@unelvent.com
ZI Côte Vermeille 66300 Thuir
Technologies clés : 40

Université de Montpellier Centre HPC@LR
Centre de compétence Calcul Haute Performance
Académique
04 67 14 47 89
hpc-lr.contact@univ-montp2.fr
Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieurbât. 10 - Case courrier 00427
Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier Cedex 5
950 rue de Saint-Priest
34097 MONTPELLIER CEDEX 5
Technologies clés : 21

Inserm - Cellules souches, plasticité cellulaire, régénération tissulaire et immunothérapie des maladies inflammatoires
Académique
04 67 33 04 55
c-jorgensen@chu-montpellier.fr
Hopital Saint-Eloi
80 rue Auguste Fliche
34295 MONTPELLIER CEDEX 5
Technologies clés : 15

AxLR
SATT
04 67 04 75 00
contact@axlr.com
1 000, Avenue Agropolis
34394 Montpellier cedex 5
Technologies clés :

BPI Languedoc-Roussillon
BPI
04 67 69 76 00
http://contact.bpifrance.fr/#
Arche Jacques Cœur 222, place Ernest Granier - CS 89015 34967 Montpellier Cedex 2
Technologies clés :

LRI
Incubateur
04 67 14 49 85
philippe.gabrion@lr-incubation.com
Université Montpellier 2 – CC 483
Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier cedex 5
Technologies clés :

Qualiméditerranée
Pôle de compétitivité
04 67 04 75 56
info@qualimediterranee.fr
Agropolis International, 1000 Avenue Agropolis 34394 Montpellier CEDEX 5
Technologies clés : 27, 28

Trimatec
Pôle de compétitivité
04 66 89 00 49
accueil@pole-trimatec.fr
http://www.pole-trimatec.fr/contact/contacter
418, avenue Général de Gaulle 30130 PONT-SAINT-ESPRIT
Technologies clés : 8, 15

Novotek Industry
Entreprise
08 11 03 17 57
contact@novotek.fr
http://www.novotek.fr/contact/
CAP OMEGA
ROND POINT BENJAMIN FRANKLIN
CS 39521
34000 MONTPELLIER
Technologies clés : 40

Limousin

Legrand
Entreprise
05 55 06 87 87
TASSIGNY, 128 AV MAL DE LATTRE DE TASSIGNY, 87000 LIMOGES
Technologies clés : 2, 5, 40

CTTC
Centre de Transfert de Technologies Céramiques
Association
05 55 42 61 50
contact@cttc.fr
Parc d'ESTER - 7, Rue Soyouz 87068 LIMOGES CEDEX
Technologies clés : 9

Domocreuse
Agence Publique
05 55 81 24 30
creuse@ecoute19.fr
11, rue des Sabots (place du Marché) 23000 Guéret
Technologies clés : 38

Elopsys
Pôle de compétitivité
05 87 21 21 60
elopsys@elopsys.fr
http://www.elopsys.fr/115/accueil/article/contact
ELOPSYS - Centre d'Innovation et de Recherche en Electronique - 12 rue Gémini, Bâtiment 2, 87068 Limoges Cedex
Technologies clés : 6

Emix
Entreprise
05 55 63 30 30
info@emix.fr
BP 90001 – Parc d'activités de la Croisière 23300 St Maurice

La Souterraine
Technologies clés : 42

Id-Bio
Entreprise
05 55 35 05 35
info@idbio.eu
ESTER Technopole - 6 allée Skylab
87068 LIMOGES Cedex
Technologies clés : 8

Pôle Européen de la Céramique
Pôle de compétitivité
05 55 38 16 21
contact@cerameurop.com
ESTER Technopole 1 avenue d'Ester
87069 Limoges Cedex
Technologies clés : 1

Silab
Entreprise
05 55 84 58 40
silab@silab.fr
BP 213 - 19108 Brive Cedex France
Technologies clés : 8

Solumix
Entreprise
http://www.solumix.fr/contact/contactez-nous/
Limoges B 798 546 453 - 5 allée Gustave Eiffel 87410 LE PALAIS SUR VIENNE
Technologies clés : 25

Avrul
Incubateur
05 55 35 77 03
matthieu.valetas@unilim.fr
ESTER Technopole
BP 6935
87069 Limoges cedex
Technologies clés :

BPI Limousin
BPI
05 55 33 08 20
http://contact.bpifrance.fr/#
7, rue Columbia Le Parc d'Ester - BP 76827 87068 Limoges
Technologies clés :

DIRECCTE LIMOUSIN
DIRECCTE
05 55 11 66 00
limou-polec@direccte.gouv.fr
http://www.limousin.direccte.gouv.fr/accueil-20
Pôle C 2 allée Saint-Alexis BP 13203
Technologies clés :

Lorraine

IRT M2P
Matériaux Métallurgie et Procédés
IRT
03 72 39 50 85
contact(at)irt-m2p.fr
4 Rue Augustin Fresnel, 57070 Metz
Technologies clés : 1, 9, 16, 45

Glagla Shoes
Start-up
03 83 36 72 72
contact@glaglashoes.com
13, rue Héré – Place Stanislas 54000 Nancy
Technologies clés : 1, 2, 5

ICEEL
Institut Carnot Énergie et Environnement en Lorraine
Institut Carnot
03 83 17 51 98
UPS-CNRS 3112 ENSIC / 1, Rue Grandville / BP 20451, 54001 Nancy Cedex
Technologies clés : 9, 23, 24

Materalia
Pôle de compétitivité
03 87 37 42 82
info@materalia.fr
Ciram - 4 Rue Augustin Fresnel 57070 Metz
Technologies clés : 1, 9, 16

Airboxlab/ Anaximen
Start-up
http://foobot.io/
12 Rue LEPOIS
54 000 NANCY
Technologies clés : 5, 36

Agrolor
Entreprise
03 83 98 86 61
17 Rue Laurent Bonnevay 54000 Nancy

Technologies clés : 27

Cirtes
Centre Européen de Développement Rapide de Produit
Entreprise
03 29 55 11 71
info@cirtes.fr
36 bis, rue de la Bolle 88 100 Saint-Dié-des-Vosges
Technologies clés : 9

GIFSI
Groupement d'intérêt scientifique sur les Friches Industrielles
GIS
03 83 59 57 91
contact@gisfi.fr
2 avenue de la Forêt de Haye • B.P. 172 • F-54505 Vandœuvre lès Nancy
Technologies clés : 37

Grundfos France
Entreprise
03 87 91 84 00
Route de Faulquemont F-57740 Longeville les St Avold
Technologies clés : 35

HYDREOS
Pôle de compétitivité
03 83 18 15 16
tomblaine@hydreos.fr
71, rue de la Grande Haie - 54510 Tomblaine - France
Technologies clés : 36

LORIA
laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications
Académique
03 83 59 20 00
josiane.reffort@loria.[fr]
LORIA - UMR 7503 - Campus scientifique - BP 239 - 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex
Technologies clés : 7

LRGP
Laboratoire Réactions et Génie des Procédés
Académique
03 83 17 51 90
http://lrgp.univ-lorraine.fr/presentation-du-laboratoire/contacts/deposer-un-message/
1, rue Grandville BP 20451 - 54001 Nancy Cedex
Technologies clés : 24

Saint-Gobain Pont-à-Mousson
Entreprise
R&D
03 83 80 67 89
Pamline@saint-gobain.com
21, avenue Camille Cavallier - BP 129 - 54705 PONT-A-MOUSSON CEDEX
Technologies clés : 35

BPI Lorraine
BPI
03 83 67 46 74
http://contact.bpifrance.fr/#
9, rue Pierre Chalnot CS 40375 54007 Nancy Cedex
Technologies clés :

IL
Incubateur
03 83 68 52 70/
natacha.hauser-costa@univ-lorraine.fr
24-30 rue Lionnois
BP 60120
54003 Nancy cedex
Technologies clés :

Inserm Grand Est (u954)
Académique
03 83 68 32 92
jean-louis.gueant@inserm.fr
Faculté de médecine
Bâtiment C 2ème étage
9 avenue de la Forêt de Haye - B.P. 184 54505 VANDOEUVRE-LES-NANCY CEDEX - France
Technologies clés : 26

7DIRECCTE Lorraine
DIRECCTE
03 54 48 20 01
lorrai-polec@direccte.gouv.fr
http://www.lorraine.direccte.gouv.fr/accueil-28
Pôle C Cité administrative BP 61011
Technologies clés :

Martinique

BPI Martinique
BPI
05 96 59 44 73
http://contact.bpifrance.fr/#
Immeuble Cascades III Place François Mitterrand – BP 804 97244 Fort-de-France Cedex
Technologies clés :

DIECCTE Martinique
DIRECCTE
05 96 59 55 14
972-polec@dieccte.gouv.fr
http://www.martinique.dieccte.gouv.fr/Martinique
Hôtel des Finances Route de Cluny BP 7002
Technologies clés :

Mayotte

BPI Mayotte
BPI
02 69 64 35 00
http://contact.bpifrance.fr/#
c/o AFD - Résidence Sarah - Place du marché BP 610 97600 Mamoudzou
Technologies clés :

DIECCTE Mayotte
DIECCTE
02 69 61 16 57
976.polec@dieccte.gouv.fr
http://www.mayotte.dieccte.gouv.fr/Mayotte
3 ter rue Mahabou BP 174
Technologies clés :

Midi-Pyrénées

Aerospace Valley
Pôle de compétitivité
05 61 14 80 30
118 route de Narbonne, 31342 TOULOUSE CEDEX 4
Technologies clés : 1, 2, 4, 7, 9, 10, 12, 20, 21, 45

LAAS CNRS
Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes
Institut Carnot
05 61 33 62 00
7, avenue du Colonel Roche, BP 54200, 31031 Toulouse cedex 4
Technologies clés : 2, 7, 10, 11, 12, 18, 45, 46, 47

Airbus
Entreprise
05 61 93 33 33
http://www.airbusgroup.com/int/en/investors-shareholders/Contact/Contact-Form.html
1, Rond Point Maurice Bellonte, 31707 Blagnac Cedex
Technologies clés : 2, 5, 6, 7, 11, 20

IRT Saint-Exupéry
Ex AESE : Aéronautique, Espace, Systèmes Embarqués
IRT
05 61 00 67 50
118 route de Narbonne, CS 44248 , 31432 Toulouse cedex 4
Technologies clés : 1, 7, 10, 12, 20, 45

Sigfox
Entreprise
05 34 31 03 16
Bâtiment E-volution, 425, rue Jean Rostand , 31670 Labège
Technologies clés : 2, 5, 6, 13

CIRIMAT
Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux
Institut Carnot
05 61 55 62 80
Université Paul Sabatier, batiment CIRIMAT, 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse
Technologies clés : 1, 9, 23

MetaToul
Académique
05 61 55 96 89
http://www.metatoul.fr/
LISBP/INSA de Toulouse
135 Avenue de Rangueil
31077 Toulouse cedex 4
Technologies clés : 18

INRA Toulouse
Académique
05 61 28 50 28
http://www.toulouse.inra.fr//infos/contact/2519
24 Chemin de Borde Rouge, 31326 Castanet-Tolosan
Technologies clés : 26

ABM Enerie Conseil
Entreprise
Conseil
05 62 13 00 50
abmtoulouse@abmec.fr
ZAD du TAURE, Avenue L. de Vinci, 31880 La SalvÉtat Saint-Gilles
Technologies clés : 40

Affichem
Entreprise
info@affichem.com
9 rue Saint Joseph 31400 Toulouse
Technologies clés : 18

Cancer Bio Santé
Pôle de compétitivité
05 34 25 50 40
http://www.cancerbiosante.fr/fr/contact.html
5 Avenue Irène Joliot-Curie 31000 Toulouse
Technologies clés : 14

Centre National de Recherches Météorologiques
Entreprise
contact@cnrm.meteo.fr
42,avenue Gaspard Coriolis
31057 Toulouse Cedex 1
Technologies clés : 21

Centre Rapsodee des Mines d'Albi-Carmaux
laboratoire de Recherche d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement
Académique
05 63 49 30 07
Campus Jarlard 81013 ALBI Cedex 09
Technologies clés : 24

Continental
Entreprise
01 34 57 40 26
gaelle.jamet-vedrines@continental-corporation.com
1 AVENUE PAUL OURLIAC
31100 TOULOUSE
Technologies clés : 20

Génibio
Entreprise
05 61 04 80 18
http://www.genibio.fr/contact.html
Le Pradas - ZI du Couserans 09190 Lorp-Sentaraille
Technologies clés : 28

Icelltis
Entreprise
05 31 21 68 52
http://www.icelltis.com/contact/
436, rue Pierre et Marie Curie, 31670 Labège
Technologies clés : 29

INRA Laboratoire de Chimie Agro-Industrielle
Laboratoire de biotechnologie de l'environnement
Académique
05 34 32 35 00

http://www6.toulouse.inra.fr/lca/
Contact
4, allée Emile Monso - 31030
TOULOUSE
Technologies clés : 8

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés (INSA Toulouse)
Académique
05 61 55 94 01
nathalie.vettori @ insa-toulouse.fr
135 avenue de Rangueil - 31077
Toulouse cedex 4
Technologies clés : 24

Lallemand Plant Care
Entreprise
05 34 27 67 80
http://www.lallemandplantcare.com/nous-contacter/
4, Route de Beaupuy 31180
CASTELMAUROU
Technologies clés : 27

LGC de l'Ensiacet
Laboratoire de Génie Chimique
Académique
05 34 32 36 00
lgc-contact@ensiacet.fr
CAMPUS INP - ENSIACET - 4 allée
Emile Monso - CS 84234 - 31 432
Toulouse cedex 4
Technologies clés : 24

LibraGen
Entreprise
05 62 19 32 90
contact@libragen.com
Canal Biotech I, 3 rue des Satellites,
31400 Toulouse
Technologies clés : 8

LISBP
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés
Académique
05 61 55 94 01
nathalie.vettori @ insa-toulouse.fr
UMR INSA/CNRS 5504 - UMR INSA/INRA 792
135 Avenue de Rangueil
31077 TOULOUSE CEDEX 4
Technologies clés : 24

MiPih
groupement d'intérêt public de centres hospitaliers
GIP
05 34 61 50 00
http://www.mipih.fr/contact.html
12, rue Michel Labrousse 31036
Toulouse Cedex 1
Technologies clés : 33

MyFox
Entreprise
05 61 00 07 11
REGENT PARK II BATIMENT I - 2460
L'OCCITANE 31670 LABEGE
Technologies clés : 5

Naio Technologies
Entreprise
09 72 45 40 85
contact@naio-technologies.com
Villa EL PASO - 12 avenue de l'Europe
31520 Ramonville Saint Agne
Technologies clés : 10

Perax
Entreprise
05 62 75 95 75
ventes@perax.fr
18 chemin de la Violette - 31240
L'UNION
Technologies clés : 35

QoS Design
Entreprise
05 61 58 33 57
info@qosdesign.com
6, Avenue Marcel Doret 31500,
Toulouse
Technologies clés : 4

Robotics Place
Cluster
contact@robotics-place.com
815 la Pyrénéenne – Prologue, 31670
LABEGE
Technologies clés : 12

Solvonic
Entreprise
05 62 25 73 71
contact@solvionic.com
Site SNPE Chemin de la Loge CS
27813 - 31078 Toulouse cedex 4
Technologies clés : 23

Sunbirds
Start-up
06 77 23 93 11
laurent.riviere@sunbirds-uas.com
10, avenue de l'Europe 31 520
Ramonville-St-Agne
Technologies clés : 12

Agri Sud-Ouest Innovation
Pôle de compétitivité
0 5 61 32 13 60
http://www.agrisudouest.com/fr/contact.html
Agri Sud-Ouest Innovation - Parc Techonologique du Canal - Bât. Napa Center A - 3 rue Ariane - BP 72137 - 31521 Ramonville Saint Agne Cedex
Technologies clés : 27

BPI Midi-Pyrénées
BPI
05 61 11 52 00
http://contact.bpifrance.fr/#
Boite postale 63379 - 24, avenue Georges Pompidou - 31133 Balma Cédex
Technologies clés :

MIPY
Incubateur
05 34 31 67 47
charbonnier@incubateurmipy.com
49 Grande Rue Saint Michel
Résidence Axe Sud
31400 Toulouse
Technologies clés :

Toulouse Tech Transfer
SATT
05 62 25 50 60
http://www.toulouse-tech-transfer.com/contact/
118 route de Narbonne
CS 24246 - 31432 Toulouse cedex 4
Technologies clés :

DIRECCTE Midi-Pyrénées
DIRECCTE
05 62 89 81 00
midipy-polec@direccte.gouv.fr
http://www.midi-pyrenees.direccte.gouv.fr/accueil-16
Pôle C 5 esplanade Compans Caffarelli
BP 98016
Technologies clés :

Nord-Pas-de-Calais

CITC EuraRFID
Centre d'Innovation des Technologies sans Contact
Cluster
03 20 19 18 52
165 Avenue de Bretagne, 59000 Lille
Technologies clés : 5, 7, 10, 12

IEMN Lille
Institut d'électronique de microélectronique et de nanotechnologie
Académique
03 20 19 79 79
http://exploit.iemn.univ-lille1.fr/contact
UMR CNRS 8520 - Laboratoire Central – Cité Scientifique – Avenue Poincaré - CS 60069 – 59652 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX
Technologies clés : 2, 5, 18, 46

I-Trans
Pôle de compétitivité
03 27 19 00 10
stephane.torrez@i-trans.org
2 Place de la Bourse, B.P. 500, 59001
LILLE
Technologies clés : 10, 12, 20, 45

CRISTAL
Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille
Académique
03 28 77 85 41
Bâtiment M3, Université Lille 1, 59655
Villeneuve d'Ascq Cedex
Technologies clés : 10, 12, 19

Railenium
IRT
03 66 72 26 93
contact@railenium.eu
http://www.railenium.eu/contact/
Espace Technopôle - Le Mont Houy - Route départementale 958, 59300
FAMARS
Technologies clés : 1, 7, 45

Tereos
Entreprise
03 28 38 79 30
infotereos@tereos.com
Parvis de Rotterdam, Tour Lilleurope
F-59777 LILLE
Technologies clés : 8, 24, 26

Lesaffre
Entreprise
03 20 81 61 00
http://www.lesaffre.com/fr/contact/
137 rue Gabriel Péri - 59700 Marcq-en-Baroeul
Technologies clés : 24, 26

Matikem
Pôle de compétitivité
03 20 34 54 80
http://www.matikem.com/contactez-nous
Parc scientifique de la Haute Borne - 9 rue Héloïse 59650 Villeneuve d'Ascq
Technologies clés : 1, 39

Picom
Pôle de compétitivité des industries du commerce
Pôle de compétitivité
03 20 99 23 90
picom@citeonline.org
Entreprises et Cités, 40 rue Eugène Jacquet 59708 Marcq-En-Baroeul
Technologies clés : 10, 12

TEAM2
Pôle de compétitivité
03 21 20 91 62
info@team2.fr
Base du 11/19 Rue de Bourgogne
62750 Loos-en-Gohelle
Technologies clés : 16, 37

Alkern
Entreprise
03 21 79 34 30
info@alkern.fr
ZI PARC DE LA MOTTE AU BOIS, RUE ANDRE BIGOTTE 62440 HARNES
Technologies clés : 39

Alstom Transport
Entreprise
R&D
03 27 14 18 00
http://www.alstom.com/fr/general-contact-us/
Rue Jacquart, 59494 Petite-Forêt
Technologies clés : 7, 45

AxBx
Entreprise
03 66 72 27 00
contact@axbx.com
AxBx, 53, rue Albert Samain 59650
Villeneuve d'Ascq
Technologies clés : 19

Baudelet Environnement
Entreprise
03 28 43 92 20
http://www.baudelet-environnement.fr/contact/
Lieu-dit « Les Prairies » 59173
Blaringhem
Technologies clés : 16

Bombardier
Entreprise
03 27 23 53 00
anne.froger@fr.transport.bombardier.com
1 Place des Ateliers BP1
59154 Crespin
Technologies clés : 45

CRIL
Centre de Recherche en Informatique de Lens
Académique
03 21 79 17 23
gestion@cril.univ-artois.fr
UFR des Sciences Jean Perrin
Rue Jean Souvraz SP 18
62307 Lens Cedex
Technologies clés : 5

Département Génie civil et environnemental des Mines de Douai
Académique
03 27 71 22 22
http://gce.mines-douai.fr/contact
École des Mines de Douai
Centre de Recherche
764 boulevard Lahure
59508 DOUAI Cedex
Technologies clés : 37

École des Mines de Douais
Académique
03 27 71 22 22
esm@mines-douai.fr
746 Boulevard Lahure 59500 DOUAI
Technologies clés : 1

Genoscreen
Entreprise
03 20 87 71 53
http://www.genoscreen.fr/fr/contact
Campus de l'Institut Pasteur de Lille-Bâtiment Guérin - 4ème étage-1 rue du Professeur Calmette 59000 Lille
Technologies clés : 26

Giroptic
Start-up
contact@giroptic.com
http://support.360.tv/customer/widget/emails/new
165 Avenue de Bretagne, 59000 Lille
Technologies clés : 5

IEMN
Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie
Académique
Recherche
http://exploit.iemn.univ-lille1.fr/contact
Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie UMR CNRS 8520
Laboratoire Central – Cité Scientifique – Avenue Poincaré - CS 60069 – 59652 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX
Technologies clés : 23

IFMAS
Institut Français des Matériaux Agro-Sourcés
ITE
03 62 26 00 14
contact@ifmas.eu
60 Avenue Halley 59650 VILLENEUVE D'ASCQ
Technologies clés : 8

INRA - Laboratoire d'analyse des sols
Laboratoire d'analyse des sols
Académique
03 21 21 86 00
http://www6.lille.inra.fr/las/Contact
273 rue de Cambrai
62000 ARRAS
Technologies clés : 37

Institut Français du textile et de l'Habillement
Fédération professionnelle
france@ifth.org
Zone de l'Union
41, rue des Métissages
59 200 TOURCOING
Technologies clés : 1

IRCICA
Académique
03 62 53 15 00
http://www.ircica.univ-lille1.fr/spip.php?page=auteur&id_auteur=1&lang=fr
50 Avenue du Halley 59650
Villeneuve-d'Ascq
Technologies clés : 5

L2EP
Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille
Académique
03 20 43 42 35
Secretariat-L2ep@univ-lille1.fr
Université des Sciences et Technologies de Lille - Bâtiment P2 - 59655
Villeneuve d'Ascq
Technologies clés : 22

Laboratoire des Sciences chimiques des Mines de Douai
Académique
03 27 71 22 22
http://ce.mines-douai.fr/contact
764 Boulevard LahureÉcole des Mines de Douai
941 rue Charles Bourseul
CS10838
59508 DOUAI Cedex
59500 Douai
Technologies clés : 36

Lesaffre Human Care
Entreprise
03 20 81 61 00
http://www.lesaffrehumancare.fr/autres/contact.html
Benoît LAPLAIZE, 137 rue Gabriel Péri
59700 MARCQ-EN-BAROEUL
Technologies clés : 28

Natural Security Alliance
Association
03 61 76 14 61
Contact@naturalsecurityalliance.org
165 avenue de Bretagne 59000 Lille
Technologies clés : 34

Nenuphar Wind
Entreprise
09 83 89 27 78
http://www.nenuphar-wind.com/contact.php
Campus de l'Institut Pasteur - 1 Rue du Professeur Calmette 59000 LILLE
Technologies clés : 43

Neo Eco
Entreprise
03 20 10 31 18
Contact@neo-eco.fr
70 Rue de la Canteraine 59320 Haubourdin
Technologies clés : 16

Nutrition Santé Longévité
Pôle de compétitivité
03 28 55 50 14
http://pole-nsl.org/contact/
Pôle Nutrition Santé Longévité - Parc Eurasanté Ouest - 310 avenue Eugène Avinée 59120 LOOS (Lille métropole - FRANCE)
Technologies clés : 28

Pictanovo
Cluster
03 20 28 26 40
sfouille@pictanovo.com
21 rue Edgar Quinet - CS 40152 - 59333 Tourcoing Cedex
Technologies clés : 47

Plateforme Pégase
Académique
patricia.paul@pasteur-lille.fr
http://www.pegase-biosciences.com/contactez-nous/
Unité PEGASE
2ème étage - Bâtiment Guerin
Institut Pasteur de Lille
59000 LILLE
Technologies clés : 26

Ramery Environnement
Entreprise
03 20 77 86 00
http://www.ramery.fr/contact.html
740 Rue du bac 59193 ERQUINGHEM-LYS
Technologies clés : 37

Recytech
Entreprise
03 21 79 13 50
SecretariatRECYTECH@RECYTECH.FR
route de Noyelles - 62740 Fouquières-lez-Lens
Technologies clés : 16

Roquette
Entreprise
03 21 63 36 00
Roquette Freres 62080 Lestrem
Technologies clés : 8

Rubika
Académique
03 27 51 35 10
http://rubika-edu.com/contact
2 rue Peclet - 59300 Valenciennes
Technologies clés : 14

Smarteo Water
Start-up
01 79 73 38 00
smarteo@smarteo-water.com
4 avenue de l'Europe C. I. T. 59 223 RONCQ
Technologies clés : 35

Stratiforme
Entreprise
03 20 84 90 10
commercial@stratiforme.com
570 rue du Pavé F – 59235 Bersée
Technologies clés : 1

UCCS
Unité de Catalyse et de Chimie du Solide de Lille
Académique
03 20 43 49 49
Université Lille 1, Sciences et Technologies - Bâtiment C3 - 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
Technologies clés : 24

Up-Tex
Pôle de compétitivité
03 62 72 61 00
contact@up-tex.fr
41 rue des Métissages - CS 70314 - 59336 TOURCOING CEDEX
Technologies clés : 1

VF Bioscience
Entreprise
http://www.vfbioscience.com/en/contact
Parc Eurasanté 310 rue Jules Vallès, 59120 Loos-lez-Lille
Technologies clés : 28

Yanara
Entreprise
03 61 25 07 73
info@yanara-technologies.com
9 Avenue Marc Lefrancq, ZAC Valenciennes-Rouvignies 59121 PROUVY
Technologies clés : 1

Aquimer
Pôle de compétitivité
03 21 10 78 98
http://www.poleaquimer.com/fr/contact.html
16 rue du Commandant Charcot 62200 Boulogne-sur-Mer
Technologies clés : 28

BPI Nord-Pas-de-Calais
BPI
03 20 81 94 94
http://contact.bpifrance.fr/#
32, boulevard Carnot 59000 Lille
Technologies clés :

Eurasanté
Incubateur
03 28 55 90 60
skalla@eurasante.com
Parc Eurasanté
310 avenue Eugène Avinée
59120 Looz lez Lille
Technologies clés :

SATT Nord
SATT
03 28 36 04 68
lille@sattnord.fr
http://sattnord.fr/rencontrer/nous-contacter/
2, Rue du Priez - 59800 Lille
Technologies clés :

DIRECCTE Nord-Pas-de-Calais
DIRECCTE
03 20 13 62 00
nordpdc-polec@direccte.gouv.fr
http://www.nord-pas-de-calais.direccte.gouv.fr/accueil-240
Pôle C 107 boulevard de la liberté
CS 20008
Technologies clés :

Pays de la Loire

IRT Jules Verne
IRT
02 28 44 34 07
contact@irt-jules-verne.fr
Chemin du Chaffault, 44340 Bouguenais
Technologies clés : 1, 9, 12, 43, 45

IDforCAR
Pôle de compétitivité
02 28 44 36 50
Technocampus Composites, Chemin du Chaffault - ZI Le Chaffault 44340 Bouguenais
Technologies clés : 10, 12, 20, 45

Atos - Bull
Entreprise
02 41 73 70 00
http://www.bull.com/fr/contactez-nous-0
357 av. PATTON 49000 Angers
Technologies clés : 3, 6, 21

EMC2
Pôle de compétitivité
02 28 44 36 00
Chemin du Chaffault • 44340 BOUGUENAIS
Technologies clés : 1, 9, 10, 12

Atlanpole Biotherapies
Pôle de compétitivité
02 40 25 13 13
http://www.atlanpolebiotherapies.com/Atlanpole-Biotherapies/Contact-Atlanpole-Biotherapies
ATLANPOLE Siège, Site de la Chantrerie - 95, Route de Gachet - BP 90702 - 44307 Nantes Cedex 3
Technologies clés : 15, 29

École Centrale de Nantes
Académique
02 40 37 16 21
1 Rue de la Noë - BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3
Technologies clés : 1, 9

EFS - Atlantic Bio GMP
Établissement Français du Sang
Académique
02 40 44 28 80
abg.nantes@efs.sante.fr
EFS-Atlantic Bio GMP
Centre Bio Ouest Laënnec
2 rue Aronnax 44800 Saint-Herblain
Technologies clés : 29, 36

IRCCyN
Institut de Recherche en Communication et CYbernétique de Nantes
Académique
http://www.irccyn.ec-nantes.fr/fr/l-irccyn/plan-d-acces
1, rue de la Noë
BP 92101
44321 NANTES Cedex 3
Technologies clés : 9, 10, 12

Qowisio
Entreprise
02 41 45 69 04
Bâtiment Linéo, 4 rue Fulton, 49912 Angers cedex 9
Technologies clés : 2, 5

Thales Communications & Security
Entreprise
02 41 64 57 00
https://www.thalesgroup.com/fr/content/contactez-nous
110 Avenue du Maréchal Leclerc
49300 Cholet
Technologies clés : 3, 5, 7, 11, 13, 20, 45

Agrauxine (Lesaffre)
Entreprise
02 41 77 80 77
contact@agrauxine.fr
2 Rue Henri Becquerel 49070 Beaucouzé
Technologies clés : 27

Association Construire en Chanvre
Association
construire-en-chanvre@bbox.fr
http://www.construire-en-chanvre.fr/?q=nous-contacter
20 rue Paul Ligneul 72 000 Le Mans
Technologies clés : 39

Baudet
Entreprise
02 51 66 27 85
contact@baudet-sa.com
Rue Saint-Fiacre 85640 Mouchamps
Technologies clés : 1

Bouyer Leroux
Entreprise
02 41 63 76 16
info@bouyer-leroux.fr
L'Etablère 49 280 La Séguinière
Technologies clés : 39

CLARTE
Association
02 43 59 46 20
contact@clarte.asso.fr
38 Rue des Docteurs Calmette et Guérin 53000 Laval
Technologies clés : 14

Clean Cells
Entreprise
02 51 09 27 57
contact@clean-cells.com
Rue Marie Curie, Parc d'Activités Vendée Sud Loire 1, 85600 BOUFFERE
Technologies clés : 26

E4V
Entreprise
01 45 50 35 22
contact@e4v.eu
http://www.e4v.eu/contact
9, avenue Georges Auric, 72000 Le Mans
Technologies clés : 23

Eolane
Entreprise
02 41 19 90 54
http://www.eolane.com/contact/information-request/
La Fresnay 49123 - Le Fresne sur loire
Technologies clés : 13

GdR Hydrogène, Systèmes et Piles à Combustible
Académique
Groupement de Recherche
02 40 37 39 36
Olivier.Joubert@cnrs-imn.fr
IMN, UMR 6502, CNRS-Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, BP 32229, 44322 Nantes, CEDEX 3
Technologies clés : 25

HYDROCEAN
Start-Up
02 40 20 60 84
contact@hydrocean.fr
8 Boulevard Albert Einstein - CS 32327 - 44323 Nantes Cedex 3
Technologies clés : 4

IMN
Institut des Matériaux de Nantes
Académique
Recherche
contact@cnrs-imn.fr
2 rue de la Houssinière, BP32229, 44322 Nantes cdx3
Technologies clés : 23

In-Cell-Art
Entreprise
02 40 71 67 17
info@incellart.com
Immeuble Bio-Ouest Halle 13, 21 rue de la Noue Bras de Fer, 44200 Nantes
Technologies clés : 26

Institut d'informatique appliquée
Académique
02 43 91 47 47
infos@iia-laval.fr
5 Boulevard de l'Industrie, 53940 Saint-Berthevin
Technologies clés : 14

Institut du Thorax
Académique
02 28 08 01 10
U1087@univ-nantes.fr
Inserm UMR 1087 / CNRS UMR 6291 - IRS -Université de Nantes - 8 quai Moncousu - BP 70721 - 44007 NANTES Cedex 1
Technologies clés : 29

Miti
Entreprise
02 40 35 80 46
miti2@wanadoo.fr
58 BOULEVARD GUSTAVE ROCH
44200 NANTES
Technologies clés : 28

Neoditech
Entreprise
02 40 46 15 71
info@neoditech.com
Z.A. DES ROITELIERES (ROUTE DE LA CHAPELLE-HEULIN AXE NANTES CHOLET) 44330 LE PALLET
Technologies clés : 10

Oniris
Académique
02 40 68 77 77
http://www.oniris-nantes.fr/liens-utiles/contact/?no_cache=1
ONIRIS Site de la Chantrerie
CS 40706 44307 Nantes cedex 3
Technologies clés : 28

Rollix
Entreprise
info@rollix.com
1 Rue Saint Eloi
85530 - LA BRUFFIERE
Technologies clés : 43

Salon Laval-Virtual
Association
02 43 49 75 57
contact@laval-virtual.org
6 rue Léonard de Vinci CS 20119
53001 LAVAL CEDEX
Technologies clés : 14

Séché Energie
Entreprise
02 43 59 60 00
Les Hêtres 53811 Changé
Technologies clés : 44

Séché Environnement
Entreprise
02 43 59 60 00
Les Hêtres 53811 Changé
Technologies clés : 37

SPBI Bénéteau
Entreprise
02 51 31 78 10
Parc d'Activités de l'Eraudière, BP 45, 85170 DOMPIERRE SUR YON
Technologies clés : 1

STX
Entreprise
02 51 10 91 00
france@stxeurope.com
Avenue Bourdelle - CS90180 - 44613 Saint-Nazaire Cedex
Technologies clés : 43

Systovi
Entreprise
02 40 92 44 20
contact@systovi.com
5 rue du Chêne Lassé – CP 1008 – 44 806 Saint-Herblain Cedex
Technologies clés : 42

UTCG
unité de thérapie cellulaire et génique (UTCG)
Académique
02 40 08 31 18
gwenaelle.boue@univ-nantes.fr
CHU de Nantes
9 quai moncousu
44093 NANTES CEDEX
Technologies clés : 29

Végépolys
Pôle de compétitivité
02 41 72 17 37
http://www.vegepolys.eu/vegepolys/contact/
26, rue Jean Dixmeras - 49066 Angers Cedex 1
Technologies clés : 27

Atlanpôle
Incubateur
02 40 25 13 99
six-brouillet@atlanpole.fr
Château de la Chantrerie
BP 90702
44307 Nantes cedex 3
Technologies clés :

BPI Pays de la Loire
BPI
02 51 72 94 00
http://contact.bpifrance.fr/#
53, chaussée de la Madeleine CS 42304 44023 Nantes Cedex 1
Technologies clés :

Atlantic
Entreprise
02 51 44 34 34
jfoucault@groupe-atlantic.com
Rue Monge, 85000 La Roche-sur-Yon
Technologies clés : 40

DIRECCTE Pays de la Loire
DIRECCTE
02 54 46 79 00
pasdyl-polec@direccte.gouv.fr
http://www.pays-de-la-loire.direccte.gouv.fr/Pays-de-la-Loire
Pôle C immeuble Skyline 22 Mail Pablo Picasso BP 24209
Technologies clés :

Picardie

IAR
Industrie & Agro-Ressources
Pôle de compétitivité
03 23 23 25 25
http://www.iar-pole.com/contact
50 – 52 Boulevard Brossolette
BP 05 02 930 LAON Cedex
Technologies clés : 8, 24, 26, 39

INERIS
Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
Établissement public
03 44 55 66 77
http://www.ineris.fr/ineris_formulaire/general
Parc Technologique ALATA - B.P. n° 2-60550 Verneuil-en-Halatte
Technologies clés : 25, 36, 37

UTC
Université de Technologique Compiègne
Académique
03 44 23 44 23
valerie.moreau@utc.fr
rue du docteur Schweitzer, CS 60319, 60203 COMPIEGNE CEDEX
Technologies clés : 7, 10

BioMécanique et BioIngénierie (BMBI) - UTC
Académique
03 44 23 45 06
mircea-dan.istrate@utc.fr
BMBI UMR CNRS 7338 BioMécanique et BioIngénierie
Université de Technologie de Compiègne (UTC) – Compiègne France
Centre de Recherches de Royallieu
Rue Personne de Roberval - 60200 Compiègne
Technologies clés : 12, 31

Laboratoire HEUDIASYSC - UTC
Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes
Académique
03 44 23 46 45
ali.charara@hds.utc.fr
Laboratoire Heudiasyc
UMR CNRS 7253
Département Génie Informatique
UTC - B.P. 20529
60205 Compiègne Cedex
Technologies clés : 12, 45

CETIM
Institut Carnot
03 44 67 36 82
http://www.cetim.fr/fr/Le-Cetim/Contactez-nous
52 Avenue Félix Louat, 60300 Senlis
Technologies clés : 1, 44

CODEM - le Batlab
Entreprise
03 22 34 27 05
contact@codempicardie.com
Picardie Technopole - 41 Ave Paul Claudel 80480 Dury
Technologies clés : 39

CVG
Centre de Valorisation des glucides
CRITT
03 22 33 75 00
cvg@cvgpn.com
http://www.cvgpn.com/contact.html
33 avenue Paul Claudel 80480 Dury
Technologies clés : 8

Laboratoire ROBERVAL - UTC
Mécanique Acoustique et Matériaux
Académique
03 44 23 45 50
http://roberval.utc.fr/spip.php?page=auteur&id_auteur=1&lang=fr
Université de Technologie de Compiègne
Centre de Recherches de Royallieu
CS 60319
60203 Compiègne Cedex
Technologies clés : 45

LG2A
Laboratoire de Glycochimie, des Antimicrobiens et des Agroressources
Académique
03 22 82 75 60
carole.darguesse@u-picardie.fr
https://www.u-picardie.fr/labo/LG/Contact.html
Laboratoire de Glycochimie, des Antimicrobiens et des Agroressources
FRE 3517 CNRS
33 rue Saint-Leu
80000 Amiens
Technologies clés : 23

LRCS (Amiens)
Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides
Académique
03 22 82 75 72
carine.lenfant@u-picardie.fr
UMR CNRS 7314, Université de Picardie Jules Verne - 33 Rue Saint Leu 80039 Amiens Cedex
Technologies clés : 23

Novhisol
Entreprise
03 60 12 40 90
novhisol@novhisol.com
240 rue Eolis, 80880 St QUENTIN-LA-MOTTE
Technologies clés : 39

Novitact
Start-up
03 44 37 05 96
contact@novitact.com
http://www.novitact.com/fr/contact
Bureau principal
Parc Tertiaire et Scientifique
249 rue Irène Joliot Curie
Lacroix Saint Ouen - 60610
Technologies clés : 5

PIVERT
Picardie Innovations Végétales, Enseignements et Recherches Technologiques
ITE
03 44 90 79 42
contact@sas-pivert.com
Parc Technologique des Rives de l'Oise , Rue Les Rives de l'Oise CS 50149 – VENETTE - F-60201 COMPIEGNE
Technologies clés : 8

Thermorenov
Association
http://www.renovationdemaison.net/contacter-entreprise-renovation-maison/contacter-renovateur-maison.html
64 avenue Jean Jaurès 60400 NOYON
Technologies clés : 38

BPI Picardie
BPI
03 22 53 11 80
http://contact.bpifrance.fr/#
18, rue Cormont CS 70302 80003 Amiens Cedex 1
Technologies clés :

DIRECCTE Picardie
DIRECCTE
03 22 22 41 36
picard-polec@direccte.gouv.fr
http://www.picardie.direccte.gouv.fr/accueil-33
Pôle C 40 rue de la Vallée
Technologies clés :

Easyli
Entreprise
05 86 16 10 00
contact@easylibatteries.com
8 rue des frères Montgolfier - 86100 Châtellerault
Technologies clés : 23

Poitou-Charentes

Eco-habitat
Cluster
05 45 24 88 35
contact@cluster-ecohabitat.fr
http://www.cluster-ecohabitat.fr/site/qui-sommes-nous/nous-contacter/
Cluster Eco-Habitat Poitou-Charentes
3, rue Raoul Follereau 86000 POITIERS
Technologies clés : 42

ENJMIN
École nationale du jeu et des médias interactifs numériques du Cnam
Académique
05 45 68 06 78
contact@cnam-enjmin.fr
138 rue de Bordeaux 16000 ANGOULÊME
Technologies clés : 47

iCanopée
Entreprise
05 49 49 64 73
contact@icanopee.fr
15, avenue René Cassin 86961 Futuroscope - Chasseneuil
Technologies clés : 33

Leroy Somer
Entreprise
05 45 64 45 64
http://www.emersonindustrial.com/fr-FR/Leroy-Somer-Group/Contact/Pages/contact-us.aspx
bd Marcellin Leroy, 16000 ANGOULEME
Technologies clés : 43

Magelis
Cluster
05 45 38 00 00
3 rue de la charente 16000 Angoulême
Technologies clés : 47

S'Tile
Entreprise
05 79 79 60 10
contact@silicontile.com
Pôle des Eco-Industries de Poitou-Charentes - 3 rue Raoul Follereau - 86000 Poitiers
Technologies clés : 42

Tipee
Technological & Innovative Platform for Environmental Efficiency
05 16 49 67 84
contact@tipee-project.com
Université de La Rochelle - Pôle Sciences et Technologie - LaSIE - Avenue Michel Crépeau - 17042 La Rochelle Cedex 1
Technologies clés : 38

BPI Poitou-Charentes
BPI
05 49 49 08 40
http://contact.bpifrance.fr/#
CS 70362 70, rue Jean-Jaurès 86009 Poitiers Cédex
Technologies clés :

DIRECCTE Poitou-Charentes
DIRECCTE
05 49 50 20 77
poitou-polec@direccte.gouv.fr
http://www.poitou-charentes.direccte.gouv.fr/accueil-21
Pôle C 47 rue de la Cathédrale
Technologies clés :

Provence-Alpes-Côte-d'Azur

SCS
Solutions Communicantes et Sécurisées
Pôle de compétitivité
04 89 86 69 30
contact@pole-scs.org
Business Pôle, 1047 route des Dolines, Allée Pierre Ziller, Bâtiment B, entrée B, 1er étage 06560 Valbonne – Sophia Antipolis
Technologies clés : 2, 3, 4, 6, 13, 20, 22, 34

Capenergies
Pôle de compétitivité
04 84 30 05 70
contact@capenergies.fr
Bâtiment Henri Poincaré Domaine Petit Arbois , Avenue Louis Philibert - CS 30658 , 13547 Aix en Provence Cedex 4
Technologies clés : 25, 40, 42, 43

Eurobiomed
Pôle de compétitivité
04 91 13 74 65
http://www.eurobiomed.org/contact/
8, rue Sainte Barbe 13001 Marseille
Technologies clés : 18, 26, 29

Inserm (u476)
Académique
04 91 29 40 90
secretariat.unite476@medecine.univ-mrs.fr
27, Bd jean Moulin
Faculté de Médecine La Timone
13385 MARSEILLE Cedex 05 13009
Technologies clés : 18

Saint Gobain - Cree
Centre de Recherches et d"Études Européen
Entreprise
R&D
04 32 50 09 00
http://www.saint-gobain-recherche.fr/fr/contact#
550 Rue Alphonse Jauffret, 84300 Cavaillon
Technologies clés : 23, 42

CEA Cadarache
Académique
04 42 25 70 00
CEA Cadarache, 13115 Saint-Paul-lès-Durance
Technologies clés : 4, 44

IHU POLMIT
Institut Hospitalo-Universitaire en maladies infectieuse - Marseille IHU
04 91 38 55 17
Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes (URMITE) - UMR 6236 - Faculté de médecine - 27 Bd Jean Moulin - 13385 MARSEILLE Cedex 05
Technologies clés : 18, 26

NawaTechnologies
Entreprise
04 42 61 68 03
Contact@nawatechnologies.com
9, rue des Genêts - Lot des Lampis 13510 Eguilles
Technologies clés : 1, 23

Pegase
Pôle de compétitivité
04 42 12 68 68
http://www.pole-pegase.com/contact-9.html
Pôle Pégase / Domaine du petit Arbois - Avenue Louis Philibert 13545 Aix en Provence cedex 4
Technologies clés : 20, 45

Sunpartner
Entreprise
04 42 39 86 44
http://sunpartnertechnologies.fr/contact-us/
Chateau de Galice, 1940 route de Loqui 13090 Aix-en-Provence
Technologies clés : 40, 42

BioMeT INRA
Plateau de Biologie Métabolomique de Marseille Timone
Académique
jean-charles.martin@univmed.fr
27 bd Jean Moulin, Fac de pharmacie, 13685 Marseille
Technologies clés : 18

Théorie et simulation numérique
Académique
04 91 17 28 00
direction@cinam.univ-mrs.fr
CINaM
Campus de Luminy
Case 913
13288 Marseille Cedex 9
Technologies clés : 4

Powersys
Entreprise
04 42 61 02 29
http://www.powersys-solutions.com/contact/
Les Jardins de l'Entreprise BP 35 | 13610 Le Puy-Sainte-Réparade
Technologies clés : 4

ADF
Entreprise
04 42 77 48 50
http://www.groupeadf.com/francais/contact.html
La Bastide Blanche – Bât.G - 13746 Vitrolles Cedex
Technologies clés : 44

Aloe Energy
Entreprise
04 42 01 65 80
contact@aloe-energy.com
ZI Athélia I – bâtiment C – 420 rue des Mattes 13 705 La Ciotat cedex
Technologies clés : 42

Areva Stockage d'Energie
Entreprise
04 42 90 81 50
Domaine du Petit Arbois Bâtiment Jules Verne Avenue Louis Philibert CS 10656 13547 Aix-en-Provence Cedex 4
Technologies clés : 25

Bardot
Entreprise
04 42 73 31 00
http://www.bardotgroup.com/fr/contact
ZI Athelia 4 - 297 avenue du Mistral 13600 La Ciotat
Technologies clés : 15

Boralex
Entreprise
04 91 01 64 40
info@boralex.com,
25, rue de la République
13 002 Marseille
Technologies clés : 43

Capsum
Entreprise
04 91 21 02 90
http://www.capsum.net/contact/
Heliopolis Bâtiment C – 3 allée des Maraichers – 13013 Marseille
Technologies clés : 18

CEA Ibeb
Institut de biologie environnementale et biotechnologie
Académique
04 42 25 70 88
thierry.heulin@cea.fr
CEA Cadarache, 13115 Saint-Paul-lès-Durance
Technologies clés : 8

CMR Group - France
Entreprise
04 91 11 37 00
cmr-fr@cmr-group.com
Technopole de Chateau Gombert
7 rue John Maynard Keynes BP 85
13381 Marseille Cedex 13 FRANCE
Technologies clés : 44

C'Nano PACA
centre de compétences en nanosciences et nanotechnologies
Réseau
06 20 45 92 52
contact@cnano-paca.org
Campus de Luminy – Case 913 - 13288 Marseille cedex 9
Technologies clés : 46

CORAC
Commission Régionale Des Associations de Chantier
Association
06 50 35 03 72
corac.paca@gmail.com
7 avenue Pierre de Coubertin 06150 CANNES-LA-BOCCA
Technologies clés : 45

Cybernetix
Entreprise
04 91 21 77 00
http://www.cybernetix.fr/contactez-nous/31
Technopôle de Château-Gombert, 306 rue Albert Einstein, B.P 94, 13382 Marseille Cedex 13
Technologies clés : 12

DualSun
Entreprise
04 13 41 53 70
contact@dualsun.fr
Pôle de l'Etoile – Technopôle de Château-Gombert, 38, rue Frédéric Joliot-Curie, 13451 Marseille Cedex 13
Technologies clés : 42

Ecologicsense
Entreprise
04 42 29 46 90
https://sites.google.com/site/ecologicsense/contactez-nous
ZI Rousset - 605 Avenue Olivier Perroy - 13790 Rousset
Technologies clés : 36

EMC3
Entreprise
04 94 14 49 20
contact@emc3-fr.com
Centre d'Affaires Grand Var – Bâtiment C - 83130 La Garde
Technologies clés : 15

Enovacom
Entreprise
04 86 67 00 00
http://www.enovacom.fr/contact.html
521, avenue du Prado - BP 80 186 – 13268 Marseille Cedex 8
Technologies clés : 33

Eole-RES
Entreprise
01 53 93 66 20
info@eoleres.com
330 rue du Mourelet - ZI de Courtine - F-84000 AVIGNON
Technologies clés : 43

Eurecom
Académique
04 93 00 81 00
Campus SophiaTech, 450 Route des Chappes, CS 50193 - 06904 Biot Sophia Antipolis cedex
Technologies clés : 6

ICR
Institut de Chimie Radicalaire
Académique
04 91 39 65 00
http://icr-amu.cnrs.fr/spip.php?page=auteur&id_auteur=1&lang=fr
52 Avenue Escadrille Normandie Niemen, 13013 Marseille
Technologies clés : 23

Ideol
Entreprise
04 86 20 80 50
http://ideol-offshore.com/fr/formulaire/nous-contacter
Espace Mistral – Bât B, 375 avenue du Mistral 13600 La Ciotat
Technologies clés : 43

Immunopôle de Marseille
Académique
com@marseille-immunopole.org
Parc de Luminy
13288 Marseille
Technologies clés : 15

Innate Pharma
Entreprise
04 30 30 30 30
info@innate-pharma.fr
117, Avenue de Luminy - BP 30191 - 13 009 Marseille
Technologies clés : 15

Insidesecure
Entreprise
04 42 90 59 05
http://www.insidesecure.com/Contact-us
Arteparc Bachasson – Bâtiment A - Rue de la carrière de Bachasson - 13590 MEYREUIL
Technologies clés : 34

Ipsogen
Entreprise
0491 29 30 90
info@qiagenmarseille.com
Luminy Biotech Entreprises, Case 923, 163 avenue de Luminy, 13288 Marseille - Cedex 9
Technologies clés : 18

MADIREL
Académique
Recherche
04 13 55 18 19
renaud.denoyel@univ-amu.fr
Campus Scientifique de St. Jérôme F-13397 Marseille Cedex 20
Technologies clés : 23

Neurelec
Entreprise
04 93 95 18 18
http://pro.neurelec.com/fr/inscription
2720 Chemin de Saint-Bernard Porte, 06224 Vallauris
Technologies clés : 31

Optimum Tracker
Entreprise
04 13 41 97 05
contact@optimum-tracker.com
ARTEPARC de Meyreuil, Bât A, Route de la Côte d'Azur, 13590 MEYREUIL
Technologies clés : 42

Optitec
Pôle de compétitivité
04 91 05 59 69
contact@pole-optitec.com
C/o LAM, Technopôle de Château Gombert, 38, rue F. Joliot Curie, 13388 Marseille cedex 13
Technologies clés : 2

Pellenc ST
Entreprise
04 90 09 47 90
contact@pellencst.com
http://www.pellencst.com/contactfr/
125, rue François Gernelle – BP 124 84124 Pertuis Cedex 4
Technologies clés : 2

Plateforme Mallabar
Métabolomique Appliquée à L'étude de LA Biodiversité mARine
Académique
Réseau
04 91 04 16 29
thierry.perez@imbe.fr
Aix-Marseille Université - Campus Étoile Faculté des Sciences St-Jérôme Case 421 Av Escadrille Normandie Niémen 13 397 Marseille cedex 20
Technologies clés : 18

Pôle Mer Méditerranée
Pôle de compétitivité
04 94 03 89 03
contact@polemermediterranee.com
http://www.polemermediterranee.com/Informations/Contact
229 Chemin de la Farlède, 83507 La Seyne-sur-Mer
Technologies clés : 43

Primi
Cluster
04 91 05 81 04
http://www.primi.pro/menu-utilisateur/contact
PÔLE MEDIA BELLE DE MAI 37 rue Guibal 13003 Marseille
Technologies clés : 47

Risques
Pôle de compétitivité
04 42 12 30 50
Domaine du Petit Arbois - Bâtiment « Henri POINCARE » - 1er étage / Avenue Louis Philibert - 13857 AIX EN PROVENCE Cedex 3
Technologies clés : 2

Siniat
Entreprise
04 32 44 44 44
http://www.siniat.fr/contact/
500 rue Marcel Demonque - 84915 Avignon
Technologies clés : 38

Supersonic Imagine
Entreprise
04 42 99 24 32
contactsFR@supersonicimagine.com
Les Jardins de la Duranne - Bât E & F - 510 Rue René Descartes 13857 Aix-en-Provence
Technologies clés : 14

Wiko
Entreprise
04 88 08 95 15
1, rue Capitaine Dessemond, 13007 Marseille
Technologies clés : 13

BELLE DE MAI
Incubateur
04 95 04 67 30
celine.souliers@belledemai.org
Pôle Medias
37 rue Guibal
13003 Marseille
Technologies clés :

BPI Provence-Alpes-Côte-d'Azur
BPI
04 91 17 44 00
http://contact.bpifrance.fr/#
141, avenue du Prado BP 265 13269 Marseille Cedex 08
Technologies clés :

IDMED
Start-up
04 91 11 87 84
info@idmed.fr
Hôtel Technoptic 2 rue Marc Donadille 13013 Marseille
Technologies clés :

Impulse
Incubateur
04 91 10 01 45
m.defous@incubateur-impulse.com
MDI Technopole de Château Gombert Rue Frédéric Joliot Curie
13452 Marseille Cedex 02
Technologies clés :

PACA Est
Incubateur
04 89 86 69 10
masson@incubateurpacaest.org
c/o CAEI
Immeuble Prémium Bât. A 2ème étage
1 boulevard Maurice Slama
06200 Nice
Technologies clés :

PASS
Parfums Arômes Senteurs Saveurs
Pôle de compétitivité
04 92 42 34 84
contact@pole-pass.fr
http://www.pole-pass.fr/contact/contact.html
48, avenue Riou Blanquet - B.P. 21017 - 06131 Grasse Cedex
Technologies clés : 8

SATT Sud-Est
SATT
04 91 91 91 20
http://www.sattse.com/contact/par-email-2/
8 rue Sainte Barbe, CS 10422
13205 Marseille Cedex 01
Technologies clés :

Terralia
Pôle de compétitivité
04 32 40 37 60
http://www.pole-terralia.com/fr/contact.html
Cité de l'Alimentation - Technopole Agroparc - Rue Pierre Bayle BP 11548 - 84 916 AVIGNON cedex 9
Technologies clés : 27, 28

Giorano Industrie
Entreprise
04 42 84 58 00
contact@giordano.fr
http://www.giordano.fr/demande-de-documentation
529 Avenue de la Fleuride, 13400 Aubagne
Technologies clés : 40

DIRECCTE Provence-Alpes-Côte d'Azur
DIRECCTE
04 86 67 32 00
paca-polec@direccte.gouv.fr
http://www.paca.direccte.gouv.fr/accueil-15
Pôle C Hôtel des Finances du Prado 23/25, rue Borde CS 10009
Technologies clés :

RÉUNION

Cofely Endel - Réunion
Entreprise
R&D
02 62 91 93 83
service.communication@cofelyendel-gdfsuez.com
105 all de Montaignac ZA Les Sables, 97427 ETANG SALÉ
Technologies clés : 15

TECHNOPOLE DE LA REUNION
Incubateur
02 62 90 71 90
innovation@technopole-reunion.com
Parc Technor - 1 rue Emile Hugot
Bâtiment B
97490 Sainte Clotilde
Technologies clés :

RHÔNE-ALPES

CEA LETI
Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information
Institut Carnot
04 38 78 44 00
CEA Grenoble, 17, rue des Martyrs, 38054 GRENOBLE Cedex 09
Technologies clés : 2, 5, 7, 10, 12, 14, 18, 33, 36, 45, 46

Energies du Futur
Institut Carnot
04 76 82 62 93
Institut Carnot Energies du futur, Domaine Universitaire-BP 46 38402, Saint Martin d'Hères Cedex
Technologies clés : 2, 9, 22, 23, 24, 25, 26, 41, 42

Minalogic
Pôle de compétitivité
04 38 78 19 47
contact_at_minalogic.com
Maison Minatec, 3 Parvis Louis Néel, 38054 Grenoble Cedex 9
Technologies clés : 2, 4, 5, 7, 12, 22, 45, 46

Axelera
Pôle de compétitivité
04 78 77 83 64
info@axelera.org
La Cité des Entreprises 66 avenue Jean Mermoz 69351 LYON Cedex 08
Technologies clés : 8, 15, 16, 26, 35, 37, 41

ONERA
L'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
Institut Carnot
04 79 20 21 22
Chef Lieu, 73500 Avrieux, France
Technologies clés : 1, 4, 7, 10, 12, 20, 45

CEA LITEN
Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles
04 38 78 32 70
http://www-liten.cea.fr/fr/liten/contact.php
17 rue des martyrs 38054 Grenoble cedex 9
Technologies clés : 8, 16, 24, 25, 41, 42

Tenerrdis
Pôle de compétitivité
04 76 51 85 34
http://www.tenerrdis.fr/fr/contact.html
Polytec 19, rue des Berges 38024 Grenoble Cedex
Technologies clés : 23, 24, 25, 40, 41, 42

Electropôle - Schneider Electric
Entreprise
04 76 57 60 60
http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/fr/finance/agenda/contact/contact-actionnaires.page
31 RUE MENDES FRANCE 38EQI ELECTROPOLE
38320 EYBENS
Technologies clés : 7, 25, 35, 42, 46

Imaginove
Pôle de compétitivité
04 37 56 89 01
contact@imaginove.fr
26 rue Emile Decorps, 69100 Villeurbanne
Technologies clés : 4, 11, 12, 14, 47

Logiciel et Systèmes Intelligents
Institut Carnot
04 76 00 78 30
contact@carnot-lsi.com
Centre des Technologies du Logiciel (CTL) ZI de Mayencin, Allée de Palestine 38610 Gières
Technologies clés : 7, 19, 20, 45

LUTB
LUTB Transport & Mobility Systems
Pôle de compétitivité
04 72 40 57 00
Chambre de Commerce et d'Industrie de LYON, Place de la Bourse 69289 LYON CEDEX 02
Technologies clés : 10, 12, 20, 45

Solvay
Entreprise
04 72 89 67 89
http://www.solvay.fr/fr/contact/contact-form-communication.html
85 Avenue des Frères Perret, 69190 Saint-Fons
Technologies clés : 8, 9, 16, 23

Biomérieux
Entreprise
04 78 87 20 00
5, rue des Aqueducs 69290 Craponne

Technologies clés : 15, 18, 18

Cityzen Sciences
Start-up
04 11 91 60 80
contact@cityzensciences.fr
208 rue Garibaldi 69003 LYON-France
Technologies clés : 1, 2, 5

I@L
Ingénierie at Lyon
Institut Carnot
04 72 29 15 69
66 Boulevard Niels Bohr, 69100 Villeurbanne
Technologies clés : 10, 12, 16

IRT NanoElec
IRT
contact@irtnanoelec.fr
17 rue des Martyrs 38054 Grenoble cedex 9
Technologies clés : 7, 45, 46

LyonBiopôle
Pôle de compétitivité
04 72 76 53 30
info@lyonbiopole.com
Bâtiment Domilyon - 321, avenue Jean Jaurès - 69007 Lyon
Technologies clés : 14, 15, 26

Schneider Electric
Entreprise
04 76 57 60 60
http://www.schneider-electric.fr/sites/france/fr/general/contact/contact.page
51 RUE DES BERGES 38ACG - POLYTEC
38000 GRENOBLE
Technologies clés : 2, 11, 40

Supergrid
ITE
contact@supergrid-institute.com
http://www.supergrid-institute.com/fr/nous-contacter
130 rue Léon Blum, BP 1321
69611 Villeurbanne CEDEX
Technologies clés : 22, 42, 43

SYROBO
Association
04 37 23 67 61
1 rue du Dr Fleury-Pierre Papillon, 69100 Villeurbanne
Technologies clés : 10, 12, 21

Plastipolis
Pôle de compétitivité
04 74 12 19 23
http://www.plastipolis.fr/pole/contactez-nous/
Maison des Entreprises - 180, rue Pierre et Marie Curie BP 10029 – Bellignat 01115 Oyonnax CEDEX
Technologies clés : 1, 8

Total
Entreprise
04 78 02 03 55
http://www.total.com/fr/formulaire-de-contact
Chemin Canal
69360 Solaize
Technologies clés : 15, 24, 41

Adocia
Entreprise
04 72 61 06 10
115 avenue Lacassagne, 69003 Lyon
Technologies clés : 1, 31

Akeo+
Entreprise
04 74 35 60 72
info@akeoplus.com
769 RUE DE LA OUTARDE 01500 CHATEAU GAILLARD
Technologies clés : 10, 12

BIOMAE
Start-up
04 37 43 13 79
contact@biomae.fr
Hébergement IRSTEA - Centre de Lyon – Villeurbanne - 5, rue de la Doua 69 100 Villeurbanne
Technologies clés : 35, 36

CETIAT
Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques
CTI
04 72 44 49 00
http://www.cetiat.fr/fr/contact/formulaire.cfm
Domaine Scientifique de la Doua, 25 avenue des Arts BP 52042, 69603 VILLEURBANNE cedex
Technologies clés : 25, 40

CITIA
Cité de l'Image en Mouvement
Association
info@citia.org
http://www.citia.org/contact
c/o Conservatoire d'art et d'histoire
18 avenue du Trésum, BP 399
74013 ANNECY Cedex, France
Technologies clés : 11, 47

Ethera
Start-up
04 38 12 29 90
info@ethera-labs.com
7, Parvis Louis Néel CS20050 F-38040 Grenoble Cedex 9
Technologies clés : 2, 36

i-Care
Cluster
04 72 72 70 60
contact@i-carecluster.org
321 Avenue Jean Jaurès, 69007 Lyon
Technologies clés : 2, 9

IDEEL
ITE
http://www.ideel-factory.fr/fr/contact.html
Rond-Point de l'échangeur, Les Levées, 69360 Solaize
Technologies clés : 8, 41

INES
Institut national de l'énergie solaire
Académique
04 79 79 20 00
info@ines-solaire.org
Technopôle Savoie technolac,
50 Avenue du Lac Léman,
73370 Le Bourget-du-Lac
Technologies clés : 40, 42

MINATEC
Académique
04 38 78 19 19
communication@minatec.org
3 parvis Louis Néel 38054 F-Grenoble cedex 9
Technologies clés : 18, 46

PEP
Centre technique de la plasturgie et des composites
CTI
04 74 81 92 60
info@poleplasturgie.com
2, rue Pierre et Marie Curie BP 1204
BELLIGNAT - 01117 OYONNAX CEDEX
Technologies clés : 1, 9

Schneider Electric Electropole
Entreprise
R&D
04 76 57 60 60
http://www.schneider-electric.fr/sites/france/fr/general/contact/contact.page
31 RUE MENDES FRANCE 38EQI
ELECTROPOLE - 38320 EYBENS
Technologies clés : 22, 35

Somfy
Entreprise
04 50 96 70 00
50 avenue du Nouveau Monde, 74307 Cluses Cedex
Technologies clés : 2, 40

Tornier
Entreprise
04 76 61 35 00
http://www.tornier.com/index.php?option=com_content&task=view&id=661
161, rue Lavoisier. 38330 Montbonnot Saint Martin. France
Technologies clés : 1, 31

Total - Sunpower
Entreprise
01 41 35 40 00
12, Allée du Levant 69890 La Tour-de-Salvagny
Technologies clés : 40, 42

Trixell
Entreprise
04 76 57 41 00
460 Rue du Pommarin, 38430 Moirans
Technologies clés : 14, 46

Tronics Microsystems
Entreprise
04 76 97 29 50
info@tronicsgroup.com
98 rue du Pré de l'Horme 38926 CROLLES Cedex
Technologies clés : 2, 46

Université Joseph Fourier - Master EEATS
Académique
04 76 51 46 00
phitem.master.eeats@ujf-grenoble.fr
https://www.ujf-grenoble.fr/contact
621 Avenue Centrale, 38041 Saint-Martin-d'Hères
Technologies clés : 46

Docea Power
Groupe Intel corporation
Entreprise
04 27 85 82 62
info@doceapower.com
166B, rue du Rocher de Lorzier 38430 Moirans
Technologies clés : 4

LMA
Laboratoire des Matériaux avancés, Université de Lyon, CNRS
Académique
04 72 43 26 76
n.gibelin@lma.in2p3.fr
Bâtiment Virgo
7, Avenue Pierre de Coubertin
69622 - VILLEURBANNE Cedex
69100 VILLEURBANNE
Technologies clés : 1

Mathym
Entreprise
04 72 72 89 63
morgann.donney@mathym.com
L'Espace Européen, Bât G - 15 chemin du Saquin 69130 Ecully
Technologies clés : 1

Nanoceram
Entreprise
04 76 52 19 25
http://www.nanoceram.net/index.php/contactez-nous
6 Rue de la Métallurgie, 38420 Domène
Technologies clés : 1

Siléane
Entreprise
04 77 79 03 71
http://www.sileane.com/contact
23 rue Descartes 42000 Saint Etienne
Technologies clés : 12

CETIM
Institut Carnot
04 77 79 40 42
http://www.cetim.fr/fr/Le-Cetim/Contactez-nous
7, rue de la Presse - CS 50802
42952 Saint-Étienne Cedex 1
Technologies clés : 9

2G Métrologie
Entreprise
04 76 09 19 05
2gmetrologie@wanadoo.fr
5 allée docteur Calmette 38130 ECHIROLLES
Technologies clés : 36

3D-Oxides
Entreprise
04-50-42-65-43
info@3d-oxides.com
70 rue Gustave Eiffel , Technoparc, 01630 Saint Genis Pouilly
Technologies clés : 1

4D View Solutions
Entreprise
09 67 40 48 78
contact4dv@4dviews,com
12, rue Ampère - 38000 Grenoble
Technologies clés : 47

Aldes
Entreprise
04 78 77 15 15
http://www.aldes.fr/contacts/index/create
AXPIR TEMPERATION ACTA ISONE
20 BOULEVARD IRENE JOLIOT CURIE
69200 VENISSIEUX
Technologies clés : 40

Artelia
Entreprise
04 72 12 39 40
artelia@arteliagroup.com
2, avenue Lacassagne 69425 Lyon Cedex 03
Technologies clés : 22

Association Jessica France
Cap'tronic
Association
04 38 78 38 17
CEA Grenoble, 17, rue des Martyrs, 38054 GRENOBLE Cedex 9
Technologies clés : 2

Association PTM
Pôle des technologies médicales
Association d'industriels
04 77 91 16 65
ptm@pole-medical.com
3 rue de la Productique, 42000 Saint-Etienne
Technologies clés : 31

Asteralis
Entreprise
04 37 20 13 70
contact@asteralis.fr
556, chemin de l'Islon 38670 - CHASSE-SUR-RHÔNE
Technologies clés : 44

Awabot
Entreprise
04 37 23 67 60
contact@awabot.com
1 rue Docteur Fleury Papillon 69100 Villeurbanne
Technologies clés : 12

Bastide Bondoux
Entreprise
04 78 16 07 16
http://www.bastide-bondoux.fr/contact.php
La Cité de l'Environnement 355 allée Jacques Monod 69800 SAINT-PRIEST
Technologies clés : 40

Bayer CropSciences - Centre de recherche de Lyon
Entreprise
R&D
https://www.bayer.fr/contact
Bayer SAS
Bayer CropScience
Centre de Recherche de La Dargoire
14, impasse Pierre Baizet
CS 99163
69263 Lyon Cedex 09
Technologies clés : 27

Be Spoon
Entreprise
04 57 12 96 35
contact@bespoon.com
17 rue du lac Saint André, Savoie Technolac, BP402, 73372 Le Bourget du Lac
Technologies clés : 12

Bioaster
IRT
04 69 84 26 00
contact@bioaster.org
Bâtiment Domilyon - 321 avenue Jean-Jaurès 69007 Lyon
Technologies clés : 18

Biotop
Entreprise
04 75 60 09 31
info@biotop.fr
Passage des 4 saisons - Livron-sur-Drôme 26250
Technologies clés : 27

Cap'Tronic
Association
04 38 78 38 17
http://www.captronic.fr/Contactez-nous.html
CEA Grenoble - 17, rue des Martyrs
38054 GRENOBLE Cedex 9
Technologies clés : 7

CEA-UJF Inac
Institut nanoscience et cryogénie
Académique
04 38 78 31 64
jerome.planes@cea.fr
17, rue des Martyrs
38054 GRENOBLE
Technologies clés : 8

Cegid
Entreprise
http://www.cegid.fr/demande-de-contact-corporate/0-1-r1-1500.aspx
52 quai Paul Sédallian 69279 LYON CEDEX 09
Technologies clés : 4

Centre d'immunologie Pierre Fabre
Entreprise
R&D
04 50 35 35 55
http://www.cipf.com/fr/contacter-le-cipf
5, avenue Napoléon III - BP 60497 - 74164 St Julien-en-Genevois Cedex
Technologies clés : 15

CETHIL
Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon
Académique
04 72 43 64 27
jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
Bâtiment Sadi-Carnot
9, rue de la Physique
INSA de LYON
Campus La Doua - LyonTech
69621 Villeurbanne Cedex
Technologies clés : 41

Chanvribloc
Entreprise
04 76 30 93 00
http://chanvribloc.com/nous-contacter/
ZI des Marais 38350 LA MURE
Technologies clés : 39

CIAT
Compagnie Industrielle d'Applications Thermiques
Groupe d'industriels
04 79 42 42 42
info@ciat.com
700 avenue Jean Falconnier - BP 14 - 01350 Culoz
Technologies clés : 40

Clipsol
Groupe Engie
Entreprise
http://www.clipsol.com/nous-contacter.html
PAE Les Combaruches 73100 Aix-les-Bains
Technologies clés : 40, 42

Coboteam
Cluster
06 51 07 73 80
fh@thesame-innovation.com
20, avenue du Parmelan, 74041, Annecy Cede
Technologies clés : 12

Cobs
Charpentes et Ouvrage Bois de Savoie
04 79 54 16 02
info@cobs.fr
Chemin d'Orly 74310 ALBENS
Technologies clés : 39

Colas Environnement
Entreprise
http://www.colas-environnement.com/colas-environnement-depollution-dardilly-contact-15
Bureau de Lyon - Agence Pollution Service
8 chemin du Jubin - 69570 Dardilly
Technologies clés : 37

Corys Tess
Entreprise
04 76 28 82 00
coryscom@corys.fr
44 rue des Berges 38024 Grenoble Cedex 01
Rhône-Alpes
Technologies clés : 4

CPE Lyon
École d'ingénieurs en Chimie, Physique et Electronique
Académique
04 72 43 17 00
http://www.cpe.fr/-Contactez-nous-.html
Domaine Scientifique de la Doua
Bâtiment Hubert Curien
43, boulevard du 11 Novembre 1918
BP 82077 - 69616 Villeurbanne Cedex
Technologies clés : 11

CTP
Centre Technique du Papier
CTI
04 76 15 40 15
http://www.webctp.com/fr/centre-technique-du-papier-contact.cfm
Domaine Universitaire - CS 90251 - 38044 GRENOBLE - Cedex 9
Technologies clés : 24

Cytoo
Entreprise
04 38 88 47 05
Minatec - BHT - Bât. 52 - 7 parvis Louis Néel 38040 Grenoble cedex 9
Technologies clés : 18

Digisens
Entreprise
04 79 65 89 16
info@digisens3d.com
19, Rue Lac Saint André
73370 Le Bourget-du-Lac
Technologies clés : 4

EC2 Modélisation
Entreprise
04 37 48 84 08
contact@ec2-modelisation.fr
Campus LyonTech la Doua - 66, bd Niels Bohr - CS 52132 - 69603 Villeurbanne Cedex
Technologies clés : 4

ECA
Environnement et Chimie Appliquée
Entreprise
04 78 77 97 64
contact@eca-europe.com
118, avenue du Général Frère - 69008 Lyon
Technologies clés : 15

ECM Technologies
Entreprise
04 76 49 65 60
http://www.ecm-furnaces.com/new-furnace
46 rue Jean Vaujany - Technisud 38029 Grenoble - France
Technologies clés : 42

EDF ENR PWT
EDF PhotoWatt
Entreprise
R&D
04 74 93 80 20
http://www.photowatt.com/panneaux-solaires/vente-panneau-photovoltaique/fabricant-panneaux-solaires.html
33 Rue Saint-Honoré, 38300 Bourgoin-Jallieu
Technologies clés : 42

Electricfil
EFI Automotive
Entreprise
04 72 01 34 34
7 Allée des Grandes Combes - Beynost, 01700 Miribel
Technologies clés : 2

Elicityl
Entreprise
04 76 40 71 61
http://www.elicityl-oligotech.com/?fond=contact
746 avenue Ambroise Croizat - F-38920 Crolles
Technologies clés : 27

EliFrance
Entreprise
04 77 46 38 00
443 Rue René Cassin, 42350 La Talaudière
Technologies clés : 42

Emasolar
Entreprise
04 78 86 97 75
info@emasolar.com
ZA Les Grands Chênes, Rue de Chapoly, 69290 Saint-Genis-les-Ollières
Technologies clés : 42

Enerbee
Entreprise
contact@enerbee.fr
7 parvis Louis Néel - CS 20050 - 38040 Grenoble Cedex 9
Technologies clés : 46

Energy Pool
filiale de Schneider Energy
Entreprise
04 88 13 16 60
http://www.energy-pool.eu/contact/
Savoie Technolac 20 Rue Lac Majeur, Bâtiment C - Parc Ouragan BP324 - 73377 Le Bourget du Lac Cedex
Technologies clés : 22

Enexco
Entreprise
04 30 78 63 30
contact@enexco.fr
18, quai Général Sarrail 69006 LYON
Technologies clés : 36

Engie - Cylergie
Entreprise
R&D
04 72 86 09 80
http://www.engie.com/contact/
bât L L Oree d Ecully chem Forestière, 69130 ECULLY
Technologies clés : 22, 41

Erytech Pharma
Entreprise
04 78 74 44 38
http://erytech.com/contacts/
Batiment Adénine- 60, avenue Rockefeller – 69008 LYON
Technologies clés : 15

ESFR
Académique
04 76 88 20 00
http://www.esrf.eu/about/ask-an-expert/askExpertForm
ESRF, 71 avenue des Martyrs, 38000 Grenoble
Technologies clés : 14

Exagan
Entreprise
04 38 78 33 07
http://www.exagan.com/en/contacts/
c/o Minatec Entreprises - BHT - 7 parvis Louis Néel - 38040 Grenoble Cedex 9
Technologies clés : 46

Exceltec
Entreprise
06 98 05 34 46
exceltec@exceltec.eu
Espace mi-plaine, 20 Avenue des Frères Mongolfier F-69680 Chassieu FRANCE
Technologies clés : 9

Fondation Nanosciences
réseau thématique de recherche avancée
Réseau
04 56 52 96 28
feriel.kouiten@fondation-nanosciences.fr
23 rue des Martyrs - 38000 Grenoble
Technologies clés : 46

G2Elab
Académique
04 76 82 62 99
direction@listes.g2elab.grenoble-inp.fr
ENSE3 bat D, 11, rue des Mathématiques BP 46, 38402 St Martin d'Hères Cedex
Technologies clés : 22

Genel
Entreprise
06 28 25 25 29
http://www.genel.fr/get-in-touch/contact/
c/o GATE1, 31 Rue Gustave Eiffel 38000 Grenoble, France
Technologies clés : 46

GMProd
Entreprise
04 37 23 33 33
contact@gm-prod.eu
Bâtiment A, 4 rue Edouard Aynard, 69100 Villeurbanne
Technologies clés : 9

Grenoble INP
Académique
04 76 57 45 00
46 avenue Félix Viallet 38031 Grenoble Cedex 1
Technologies clés : 46

GREThe
Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques
Académique
04-79-25-48-03
http://www.greth.fr/public/contact.php
Bâtiment PASSERELLE 7 - 30 Allée d'Aiguebelette - Savoie Technolac - 73375 LE BOURGET DU LAC - CEDEX
Technologies clés : 41

Hevatech
Entreprise
04 26 51 52 78
http://www.hevatech.fr/nous-contacter.html
145 Chemin de la Roche du Guide - Espace Combelière Sud - 26780 Malataverne
Technologies clés : 41

Hydreca
Entreprise
04 72 53 11 53
http://www.hydreka.com/fr/formulaire-de-contact
34 route de Saint Romain 69450 Saint Cyr Au Mont D'or
Technologies clés : 35

INSA Lyon
Académique
04 72 43 83 83
http://www.insa-lyon.fr/fr/contact
20, avenue Albert Einstein , 69621 Villeurbanne Cedex
Technologies clés : 14

Institut des Neurosciences
Académique
04 56 52 05 00
Bâtiment Edmond J. Safra, Université Joseph Fourier - Site Santé, Chemin Fortuné Ferrini, 38706 La Tronche
Technologies clés : 14

ISKN
Entreprise
contact@iskn.co
52 Cours Jean Jaurès 38000 Grenoble
Technologies clés : 47

Isorg
Entreprise
04 38 78 10 11
http://www.isorg.fr/contactez-nous_6.htm
MINATEC - Bâtiment de Haute Technologie (Bat. 52), 7 parvis Louis Néel BP 50 - 38040 Grenoble Cedex 09
Technologies clés : 46

LBTI
Laboratoire de Biologie Tissulaire et d'ingénierie Thérapeutique
Académique
04 72 72 26 36
bernard.verrier@ibcp.fr
7 Passage du Vercors - 69367 Lyon
Technologies clés : 29

LEPMI
Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie des Matériaux et des Interfaces
Académique
04 76 82 66 98
1130 rue de la piscine 38402 Saint-Martin d'Hères cedex
Technologies clés : 23

MabDesign
Structure d'interface
09 55 91 30 26
Bâtiment Domilyon - 321, avenue Jean Jaurès, F. 69007 – Lyon
Technologies clés : 15

McPhy Energy
Entreprise
04 75 71 15 05
contact@mcphy.com
Z.A. Quartier Riétière - 26190 La Motte-Fanjas
Technologies clés : 25

MediCréa
Entreprise
04 72 01 87 87
http://www.medicrea.com/nous-contacter/service-commercial/
24 Port Grand Lyon, 01700 Neyron
Technologies clés : 9

Metabolys
Entreprise
04 78 77 86 65
baverel@metabolys.com
12 rue Guillaume Paradin , Faculte de Medecine Rth, 69372 Lyon CEDEX 07
Technologies clés : 18

MicrooLed
Entreprise
04 38 88 47 29
info@microoled.net
BHT BATIMENT 52, 7 PARVIS LOUIS NEEL - BP 50 - 38000 GRENOBLE
Technologies clés : 46

NEEL
Académique
04 76 88 10 21
neel.contact@neel.cnrs.fr
CNRS/UJF UPR2940 - 25 rue des Martyrs BP 166 - 38042 Grenoble cedex 9
Technologies clés : 46

Noraker
Entreprise
04 78 93 30 92
contact@noraker.com
13 Av. Albert Einstein 69100 Villeurbanne
Technologies clés : 1

Novamotion
Entreprise
04 50 62 16 19
info@novamotion.com
32, Rue de Sansy - 74600 Seynod - France
Rhône-Alpes
Technologies clés : 47

One Ortho
Entreprise
infos@oneortho-medical.com
Oneortho Batiment des hautes technologies, 20 rue du professeur Benoît Lauras 42 000 Saint Etienne
Technologies clés : 9

Optic Rhône Alpes
Cluster
04 28 07 01 75
contact@pole-ora.com
Bâtiment des Hautes Technologies 20, rue Pr. Benoit Lauras - 42 000 SAINT-ETIENNE
Technologies clés : 46

Plastic Omnium
Entreprise
01 40 87 64 00
19 AVENUE JULES CARTERET 69007 LYON
Technologies clés : 1

Pôle EcoConception
Cluster
04 77 43 04 85
diarra.kane@eco-conception.fr
57 cours Fauriel 42024 Saint-Etienne Cedex 2
Technologies clés : 39

Pôle Innovation Constructive
Cluster
04 74 95 24 00
http://www.pole-innovations-constructives.com/11-contact.htm
c/o Chambre de Commerce et d'Industrie Nord Isère - 5 rue Condorcet 38090 VILLEFONTAINE
Technologies clés : 39

Prelem
Entreprise
Bureau d'étude / Certification
04 78 68 94 77
contact@prelem.com
170 boulevard Stalingrad 69451 Lyon cedex 06
Technologies clés : 40

Primo 1D
Entreprise
04 38 78 05 01
http://primo1d.com/contact/
c/o MINATEC Entreprises – BHT - 7, parvis Louis Néel F- 38040 Grenoble Cedex 9
Technologies clés : 46

PV Alliance
issue d'EDF et CEA
Start-up
04 74 93 44 45
http://www.pvalliance.com/fr/contact/
33, Rue Saint Honoré - ZI Champfleuri 38300 Bourgoin-Jallieu
Technologies clés : 46

Recupyl
Start-up
04 76 77 43 97
contactinfo@recupyl.com
Rue de la métallurgie 38420 Domène
Technologies clés : 16

Réseau RECORD
Réseau coopératif de recherche sur les déchets
Académique
04 72 43 81 88
contact@record-net.org
Campus LyonTech La Doua, 66, boulevard Niels Bohr CEI 1 - CS 52132 - 69603 VILLEURBANNE Cedex
Technologies clés : 37

Resolution Spectra Systems
Entreprise
04 58 00 12 49
13, chemin du vieux chêne, F-38240 MEYLAN
Technologies clés : 2

RMN Biomédical et Neurosciences
Académique
04 76 76 54 85

JFLeBas@chu-grenoble.fr
CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE - BP 217 X - AVENUE DES MAQUIS DU GRESIVAUDAN - 38043 GRENOBLE CEDEX 9
Technologies clés : 14

Seb
Entreprise
04 72 18 18 18
LES 4 M - 4 CHEMIN DU PETIT BOIS - BP 172 - 69130 ECULLY
Technologies clés : 5

Sensus France
Entreprise
04 72 01 85 50
info.fr@sensus.com
Zac du Champ Perrier 41 Porte du Grand Lyon 01700 NEYRON
Technologies clés : 35

Sentryo
Start-up
09 70 46 96 94
contact@sentryo.net
16 CHE DU SIROUX 69260 CHARBONNIERES LES BAINS
Technologies clés : 13

Serpol
Entreprise
04 72 89 73 75
info@serpol.fr
2 chemin du génie BP80 - 69633 Vénissieux
Technologies clés : 37

Smart Electric Lyon
Académique
projet de l'Université de Lyon
0 969 369 542
http://www.smart-electric-lyon.fr/#contacter
196, avenue Thiers 69461 LYON CEDEX 06
Technologies clés : 22

Smart me up
Start-up
04 79 33 78 50
contact@smartmeup.org
15, Chemin des Prés - 38240 Meylan
Technologies clés : 11

Soitec
Entreprise
04 76 92 75 00
Parc Technologique des Fontaines, Chemin des Franques 38190 Bernin
Technologies clés : 46

Soloréa
Entreprise
04 81 92 60 71
info@solorea.com
2 Place Gailleton, 69002, Lyon
Technologies clés : 42

Sopra Steria
Entreprise
04 50 33 30 30
contact-corp@soprasteria.com
PAE Les Glaisins, 3 rue du Pré Faucon, 74942 Annecy Le Vieux
Technologies clés : 4

Sysoco
Entreprise
04 72 14 53 10
contact-mk@sysoco.fr
http://www.sysoco.fr/KERNEL/?NODE_ID=B3EF0E34-7813-4C4E-8A3A-5378F3D81815&DB=CLT3&U=DC5AB262-634F-422B-9D27-B7BC29A08D03
36 Rue Vaucanson - CS20815 - 69153 DECINES Cedex
Technologies clés : 13

Techtera
Pôle de compétitivité
04 20 30 28 80
http://www.techtera.org/contact?menu=134
Villa Créatis - 2 rue des Mûriers - CP 601 - 69 258 Lyon cedex 09
Technologies clés : 1

TheCosmocompany
Start-up
Spin-off ENS Lyon/CNRS
04 37 66 71 57
http://www.thecosmocompany.com/#!moreinformation/cqyk
5 passage du Vercors, 69007 Lyon
Technologies clés : 4

Tiempo
Entreprise
04 76 61 10 00
web-contact@tiempo-secure.com
110 rue Blaise Pascal - Bâtiment Viseo – Inovallée 38330 Montbonnot Saint Martin
Technologies clés : 46

Vesta System
Entreprise
04 58 00 52 25
info@vesta-system.com
22 avenue Doyen Weil 38000 Grenoble
Technologies clés : 46

WH2
Entreprise
04 78 62 21 28
http://www.wh2.fr/index.php/component/content/article/2-non-categorise/8-contact
2 rue Président CARNOT - 69002 LYON
Technologies clés : 25

Yseop
Entreprise
04 78 47 07 49
http://yseop.com/FR/contact
62 rue de Bonnel -69003 Lyon
Technologies clés : 11

CTTN/IREN
Institut de Recherche sur l'Entretien et le nettoyage
CTI
http://www.cttn-iren.com/nettoyage-industriel/contact-cttn.php
Avenue Guy de Collongue
B.P. 41
69131 Ecully Cedex
Technologies clés :

BPI BPI
04 72 60 57 60
http://contact.bpifrance.fr/#
Immeuble Le 6e Sens 186, avenue Thiers 69465 Lyon Cedex 06
Technologies clés :

Calym
Consortium pour l'Accélération de l'Innovation et de son Transfert dans le Domaine du Lymphome
Institut Carnot
04 72 24 41 71
http://www.calym.org/-Contact-.html
LYSARC - Centre Hospitalier Lyon-Sud, Secteur Sainte Eugénie, pavillon 6E
69495 PIERRE-BENITE Cedex
Technologies clés : 15, 18, 26, 29

CTDEC
Centre technique du décolletage
CTI
infos@cetim-ctdec.com
Cetim-Ctdec
750 avenue de Colomby
BP 65
74301 CLUSES CEDEX
Technologies clés :

Gate 1
Incubateur
04 76 61 38 00
gilles.talbotier@gate1.fr
Hôtel d'entreprises Petite Halle
31 rue Gustave Eiffel
38000 Grenoble
Rhône-Alpes
Technologies clés :

Ici&Là
Start-Up
06 72 67 89 09
ebrehier@iel-innovation.fr
195 ter rue Marcel Mérieux / 69007 Lyon
Technologies clés :

Incubateur Pulsalys
Incubateur
04 26 23 56 60
cedric.nieutin@pulsalys.fr
47 boulevard du 11 novembre 1918
CS 90170
69625 Villeurbanne cedex
Technologies clés :

Mont-Blanc Industries
Pôle de compétitivité
04 50 18 73 84
http://www.montblancindustries.com/contact/
750 avenue de Colomby BP 50141
74 303 Cluses CEDEX
Technologies clés : 1

Pulsalys
SATT
04 26 23 56 60
http://www.pulsalys.fr/contact/#more-379
47 Boulevard du 11 Novembre 1918
CS 90170
69625 VILLEURBANNE Cedex
Technologies clés :

SATT GIFT Grenoble ALPS
SATT
Technologies clés :

Alstom Hydro Power
Entreprise
04 76 39 30 00
http://www.alstom.com/fr/general-contact-us/
82 Avenue Léon Blum, 38100 Grenoble
Technologies clés : 41, 43, 44, 46

Sofath
Entreprise
04 75 57 30 30
contact@sofath.com
http://www.sofath.com/contact.php
50 rue Pierre Seghers
26800 PORTES LES VALENCES
Technologies clés : 40

Ecometis
Entreprise
04 81 91 92 41
contact@ecometis.com
http://www.ecometis.fr/contact/
La brevenne 69690 Bessenay
Technologies clés : 40

Perge
Entreprise
04 75 57 81 63
http://www.perge.fr/contact
380 Avenue du Président Salvador Allende, 26800 Portes-lès-Valence
Technologies clés : 40

Barriquand Technologies
Entreprise
04 77 44 22 20
info@barriquand.com
9 Rue Saint-Claude, 42300 Roanne
Technologies clés : 40

CRIS
Centre de Recherche et d'Innovation sur le Sport
Académique
04 72 43 26 12
cris@univ-lyon1.fr
U.F.R S.T.A.P.S – Université Claude Bernard Lyon 1
27, 29 Boulevard du 11 novembre 1918
69622 Villeurbann
Technologies clés :

DIRECCTE Rhône-Alpes
DIRECCTE
04 26 99 82 75
rhona-polec@direccte.gouv.fr
http://www.rhone-alpes.direccte.gouv.fr/accueil-18
Tour SWISS LIFE, 1 boulevard Vivier Merle
Technologies clés :

Saint Pierre et Miquelon

DIECCTE Saint Pierre et Miquelon
DIECCTE
05 08 41 16 30
concurrence@dcstep.gouv.fr
1 rue Ange Gautier BP 4302
Technologies clés :

GdR Robotique
Groupement de Recherche en Robotique
Association
philippe.bonnifait@hds.utc.fr
Technologies clés : 10, 12, 21

GIS Modélisation Urbaine
GIS
Réseau
http://www.urban-modelling.org/fr/liens-utiles/article/contact.html
Technologies clés : 4

AFIA
Association Française pour l'Intelligence Artificielle
Association
Yves.Demazeau@imag.fr
https://www.linkedin.com/groups/AFIA-Association-Fran%C3%A7aise-lIntelligence-Artificielle-3870691/about
Technologies clés : 11

Smart-Grids France
Association de pôles
celine.auger@capenergies.fr
http://smartgridsfrance.fr/#page
Technologies clés : 6

Actémium
groupe Vinci
Réseau d'entreprise
http://www.actemium.fr/fr/secteurs-dactivite/energie/contact/
Technologies clés : 22

Elicitra
RMT
Réseau
r.berthelot@arvalisinstitutduvegetal.fr
http://elicitra.org/index.php?rub=contacts_des_animateurs
Technologies clés : 27

France Bio Imaging
Infrastructure Nationale pour la biologie
Réseau
contact@france-bioimaging.org
Technologies clés : 14

France Life Imaging
Infrastructure Nationale pour la biologie
Réseau
franck.lethimonnier@cea.fr
Technologies clés : 14

LCQSA
Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air
GIS
Réseau
03 44 55 64 04
direction-lcsqa@ineris.fr
Technologies clés : 36

Ligue Scientifique Européenne pour les Probiotique
Réseau
Réseau européen
contact@probioleague.org
Technologies clés : 28

Lora
Association d'industriels
help@lora-alliance.org
LoRa Alliance
2400 Camino Ramon, Suite 375
San Ramon, CA 94583
Technologies clés : 13

Prebat
Plateforme de recherche et d'experimentation sur l'energie dans le batiment
Académique
http://www.prebat.net/?Contact
Technologies clés : 39

RFMF
Réseau Français de Métabolomique et Fluxomique
Association
Réseau
05 57 12 26 68
rfmf@bordeaux.inra.fr
Technologies clés : 18

SATT Lutech
SATT
01 78 94 68 51
http://www.sattlutech.com/restons-en-contact/
Technologies clés :

Défis CNRS MASTODONS
Académique
http://www.cnrs.fr/mi/spip.php?auteur3
Technologies clés : 3

Membres du Comité stratégique

- Président du Comité : Philippe VARIN, Président d'AREVA
- Vice-présidente : Claudie HAIGNERÉ, Conseiller spécial auprès du Directeur général de l'Agence spatiale européenne
- Olivier APPERT (président, Institut français du pétrole et des énergies nouvelles)
- Martine BRIDENNE (directrice, Institut pour la transition énergétique PSEE)
- Vincent CHARLET (directeur, La fabrique de l'industrie ; ancien directeur, ANRT-Futuris)
- Philippe CHODERLOS DE LACLOS (président-directeur général, CETIM)
- Martha CRAWFORD (directrice R&D, L'Oréal)
- Guillaume DE CREVOISIER (directeur des partenariats technologiques, Protex International)
- Patrice DESMARETS (Académie des technologies)
- Pascal FAURE, Directeur général des entreprises
- Jean-Marc GROGNET (directeur, Institut des technologies pour la santé, CEA DSV)
- Caroline LAURENT (directrice de la stratégie, Délégation générale de l'armement)
- Vincent MARCATTE, Vice-président, Orange Labs ; Président, pôle Images & réseaux)
- Agnès PAILLARD (vice-présidente, EADS France ; présidente, Aerospace Valley)
- Grégoire POSTEL-VINAY (chef de la mission stratégie, DGE)
- Cécile THARAUD (directrice Business Development, L'Oréal)
- Philippe VANNIER (président-directeur général, Bull)

Membres du Comité de pilotage

- Chef de projet : Philippe GUEDON
- Jean-Pierre COUTARD (Service de l'industrie, DGE)
- Elsa DEMANGEON (Service du tourisme, du commerce et des activités de service, DGE)
- Alain GRIOT (Commissariat général au développement durable, MEDDE)
- Philippe GUEDON (Bureau de la recherche-développement partenariale, DGE)
- Frédéric KAROLAK (Service de la compétitivité, de l'innovation et du développement des entreprises, DGE)
- Jean-Michel Le ROUX (Agence nationale de la recherche)
- Noël Le SCOUARNEC (Service de la compétitivité, de l'innovation et du développement des entreprises, DGE)
- Laure MENETRIER (Bureau de la recherche-développement partenariale, DGE)
- Eric PLESKA (Direction général de l'armement)
- Laure REINHART (Directrice des partenariats, Bpifrance)
- Grégoire POSTEL-VINAY (chef de la mission stratégie, DGE)
- Lisa TREGLIA (Direction générale de la recherche et de l'innovation, MENESR)
- Thierry TRIOMPHE (Service de l'économie numérique, DGE)

TECHNOLOGIES CLÉS 2020

Préparer l'industrie du futur

L'étude **Technologies clés 2020** a pour objectif d'identifier les technologies que les acteurs Français doivent maîtriser pour conquérir les marchés mondiaux à l'horizon 2020 et d'en analyser les opportunités en termes de développement économique et de création de valeur pour notre économie. Elle est destinée à offrir des perspectives de développement et des éléments d'aide à la décision en matière de recherche et développement aux chefs d'entreprise, aux acteurs de la recherche académique et aux décideurs publics.

Cette 5e édition présente 47 technologies clés considérées comme étant stratégiques, du fait de l'importance des marchés adressés et de l'expertise, existante ou potentielle, des acteurs publics et privés français. Elles adressent neuf domaines applicatifs correspondant à neuf grandes catégories de besoins économique et sociétaux.

Direction générale des entreprises
67 Rue Barbès, 94200 Ivry-sur-Seine

conception graphique
SG/SIRCOM/BAGE
crédits photographiques
©Fotolia
©Phovoir

entreprises.gouv.fr

DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES