

Étude de cas d'une démarche Six Sigma

GUIDE DE MISE EN PLACE D'UNE DEMARCHE SIX SIGMA

APPLICATION PRATIQUE ET
THEORIQUE

Lilian CHAVANON
Florie GENOUD

Xueyun CHENG
Ons GHLISS

Dyah Okty MOERPRATIWI

Contenu

Avant-Propos.....	2
Introduction du guide.....	3
Le guide	3
Le Six Sigma.....	3
D : Define (Définir)	7
Étude pratique :.....	7
Étude théorique : Principe et outils de la méthode 'Define'	9
M : Mesure.....	14
Méthode de mesure de mesure.....	14
Nouvelles mesures	15
A : Analyze (Analyser).....	19
Le cas des plans d'expérience	19
I : Improve (Améliorer).....	24
Validation des plans d'expériences	24
Mise en marche d'une nouvelle production.....	24
C : Check (Contrôler)	28
Étude pratique	28
Explication technique :.....	31
Conclusion.....	34
Bibliographie générale	35
Table des illustrations	37

Avant-Propos

Le présent guide a été réalisé dans le cadre de l'Unité d'Enseignement Ingénierie de Projet (QPO11) à l'Université de Technologie de Compiègne (UTC). Notre groupe de cinq étudiants en Master 2 a envisagé de réaliser un projet pour améliorer des processus avec Six Sigma.

Nous désirons vous présenter avec plus de détails les cinq étudiants ayant réalisés ce projet. Leurs spécificités de culture et de formations peuvent vous donner une meilleure compréhension des motivations de chacun.

- **Lilian Chavanon**, France.

Après 15 ans de management en Supply Chain, Lilian a choisi de reprendre ses études au sein de l'UTC afin de développer ses compétences en management des risques et Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement.

- **Xueyun Cheng**, Chine.

Elève ingénieur spécialisé en Génie des Systèmes Mécaniques à l'UTC, Xueyun a choisi de prendre la formation de master Qualité en parallèle afin d'avoir une double compétence.

- **Florie Genoud**, France.

Après un DUT en Qualité Logistique Industrielle et Organisation et une année d'étude à l'étranger, Florie a voulu confirmer ses compétences en qualité en effectuant un master Qualité et Performance dans les Organisations plutôt orienté sur un côté service.

- **Ons Ghliiss**, Tunisie. Ingénieur en Génie électrique, spécialité électronique

Après un stage à l'UTC, Ons a choisi de suivre le master Qualité et performance dans les organisations à l'UTC afin d'acquérir une double compétence. Dans le but est de compléter sa formation initiale d'ingénieur axée sur la technique par une formation qui lui permettra d'acquérir des compétences en Qualité mais aussi des compétences managériales.

- **Dyah Okty Moerpratiwi**, Indonésie.

Diplômée en Indonésie en génie civil, Okty reprend ses études en master après une année travail en tant que le contrôleur de projets. Elle va obtenir un double diplôme en France et en Indonésie afin d'avoir une double compétence en technique de génie civil et en management de qualité.

Comme vous avez pu le constater, les cinq étudiants porteurs de ce projet ont fait de leur multiculturalité une force. Au cours de la rédaction de ce guide, les discussions ont été fortes afin de comparer les pratiques dans les différents pays

Nous tenons à remercier particulièrement monsieur Jean-Pierre Caliste pour sa disponibilité et son engagement auprès de nous tout au long du projet. De plus, nous accordons toute notre gratitude monsieur Gilbert Farges, l'initiateur de ce projet, et donc, du présent guide.

Pour conclure, nous tenions à vous rappeler que ce guide est issu de travaux universitaires. Les étudiants qui l'ont écrit sont en cours d'apprentissage dans le domaine de la qualité. Des imperfections et des erreurs peuvent s'y être glissées malgré notre vigilance. Nous vous prions de ne pas nous en tenir rigueur et de nous en informer afin que nous puissions rétablir des informations vraies.

Introduction du guide

Le guide

- **Quel est le but de ce guide ?**

Le but du guide est de vous prouver que le Six Sigma n'est pas une méthode à craindre. Au premier abord, cette méthode peut paraître complexe. Pourtant, ce n'est qu'une série d'outils simples, que vous utilisez déjà peut-être au sein de votre entreprise, et qui pourront vous faire gagner de l'argent et du temps.

- **Quel est le principe du guide ?**

Le guide a pour principe de simuler une production et sa variabilité, qui est l'essence du Six Sigma. Pour cela, nous avons utilisé une catapulte en guise de machine de production et des lancers simulant le produit fini. Les lancers symbolisent le produit fini et notre cible est le meilleur produit à atteindre.

- **Que vais-je trouver dans ce guide ?**

Dans ce guide, nous vous présenterons une étude de cas sur une démarche Six Sigma. Au cours de la démarche, nous serons amenés à vous donner des informations sur des outils basiques de la démarche, mais également des ressources utiles pour chaque parties, notamment des lectures pour approfondir certains points.

- **Contexte de réalisation du guide**

Le présent guide a été rédigé dans le cadre d'un projet universitaire afin de donner aux TPE et PME une approche simplifiée du Six Sigma à travers une étude de cas simple. Du fait de sa nature universitaire, ce guide est donc certainement imparfait. Cependant, nous avons fait de notre mieux pour vous présenter des résultats

- **L'outil d'autodiagnostic**

En marge de ce guide, nous vous proposons également un outil d'autodiagnostic. Cet outil vous permettra de voir si vous possédez les compétences nécessaires pour établir un Six Sigma.

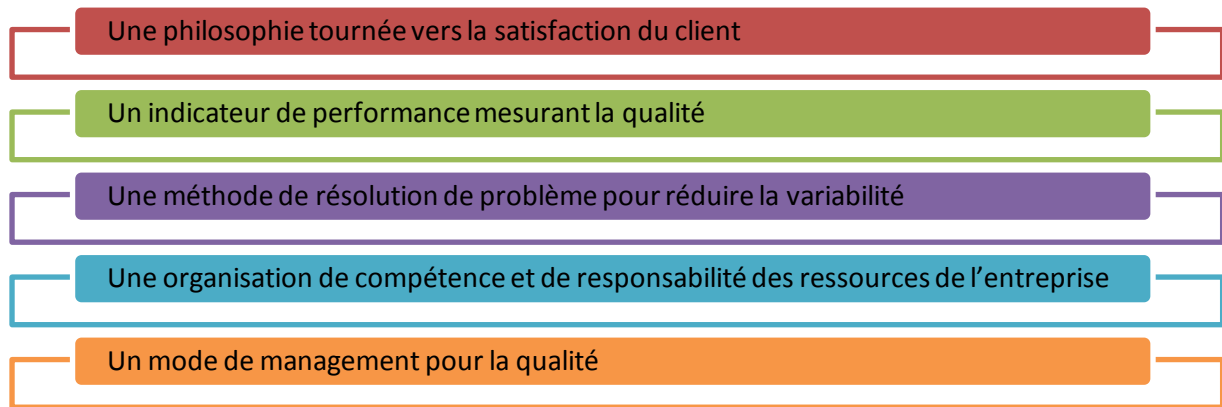
Le Six Sigma

- **Qu'est-ce que le Six Sigma ?**

**En s'intéressant à la qualité, les coûts diminuent
En s'intéressant aux coûts, la qualité diminue**

Le Six Sigma est une méthode d'amélioration de la qualité qui permet de réduire la variation des processus. Cette méthode est un indicateur de performance dont le but ultime est de ne réaliser que 3,4 pièces mauvaises parmi un million.

La démarche est une approche globale qui peut se décliner de différentes manières :



- **Pourquoi faire du Six Sigma ?**

Le Six Sigma permet de concilier assez facilement plusieurs objectifs, dont le principal est l'amélioration la performance globale de l'entreprise. A traves cette amélioration, l'entreprise verra :

- une augmentation ainsi qu'une fidélisation des clients grâce au progrès de la qualité
- une réduction des dépenses grâce à une minimisation du nombre de rebuts, de retouches et de gaspillages au cours de la production
- une optimisation de l'efficience des moyens de production
- une augmentation significative du chiffre d'affaires de par la réduction des coûts et l'amélioration de la qualité

- **Quelle est la démarche DMAIC ?**

DMAIC est une abréviation qui présente les cinq étapes de la démarche de réduction de la variation des processus. Cette approche est une ligne de conduite pour effectuer une démarche Six Sigma.

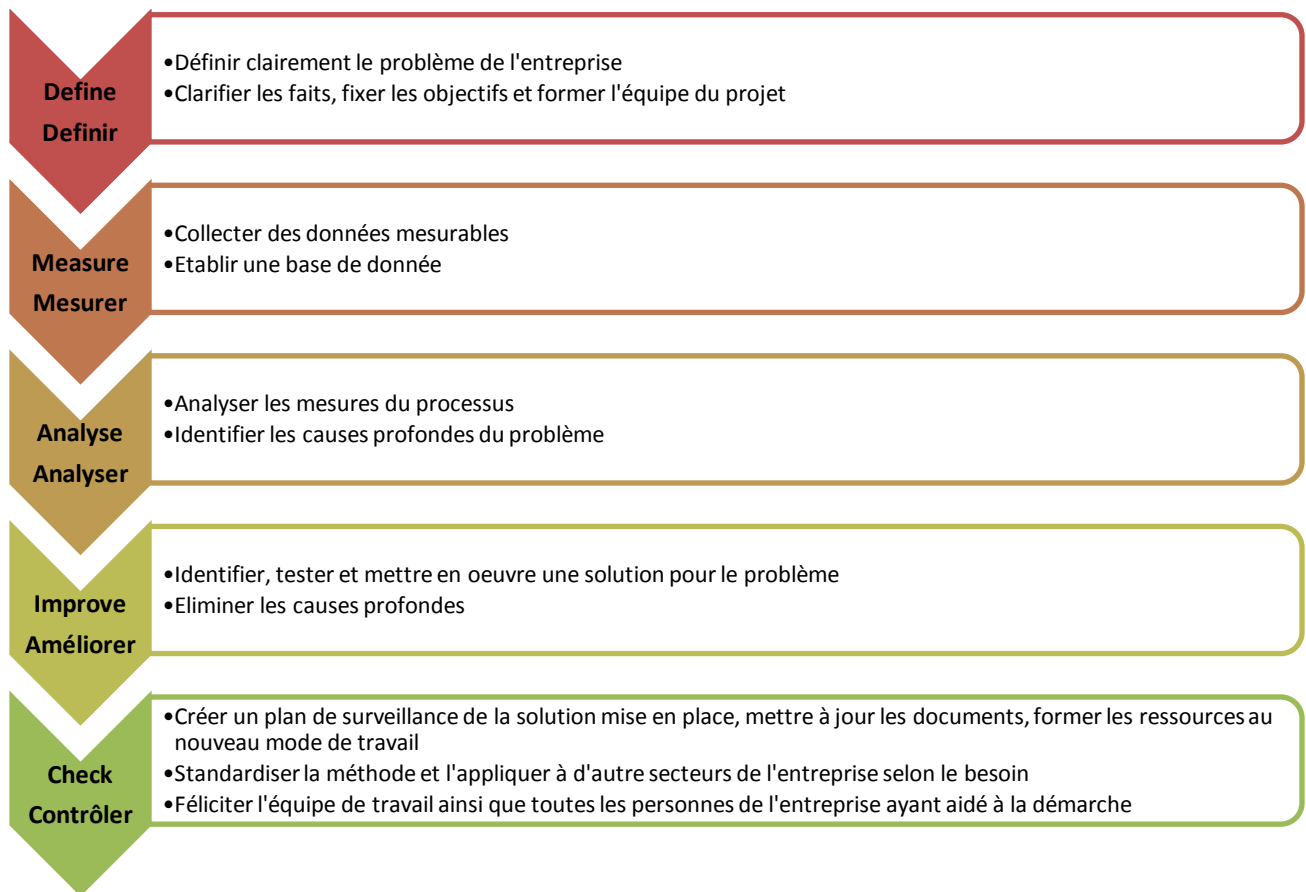


Figure 1 : Méthode DMAIC

- **Y-a-t-il des documents de références ?**

Pour le Six Sigma, il existe des normes et fascicules disponibles :

- *Norme ISO 13053-1* : Six Sigma – Méthode quantitative dans l'amélioration de processus – Partie 1 : Méthodologie DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve, Check)

→ Présentation des points essentiels du Six Sigma (philosophie du Six Sigma, intégration du personnel au projet Six Sigma, sélection des projets de Six Sigma, présentation de la démarche DMAIC)

- *Norme ISO 13053-2* : Six Sigma – Méthode quantitative dans l'amélioration de processus – Partie 2 : Outils et technique

→ Présentation de chaque étape du Six Sigma ainsi que les outils disponibles pour effectuer chacune des étapes.

- *Fascicule FD X 06-090* : Six Sigma, une démarche utilisant les outils statistiques – Outils statistiques

→ Présentation de chacun des outils du Six Sigma selon trois axes (en quoi cela consiste ? À quoi l'outil sert-il ? Comment fait-on ?)

- *Fascicule FD X 06-091* : Démarche Lean, Six Sigma, Lean Six Sigma – Exigence des compétences des chefs de projets d'amélioration et des animateurs d'atelier

→ Présentation de la classification des types de projet, des rôles et des responsabilités des responsables de projets au sein d'un projet, les niveaux de compétences nécessaires pour la mise en place des projets

Il n'est cependant pas nécessaire d'avoir toutes ces normes et fascicules pour comprendre la démarche Six Sigma. De nombreux ouvrages reprennent cette méthode en l'expliquant.

D : Define (Définir)

L'étape D de la démarche DMAIC est une phase d'une importance cruciale car elle permet de bien cerner et comprendre la problématique. Pour cela une base de données de la production obtenue par l'entreprise est indispensable comme point de départ pour pouvoir identifier la problématique.

Pour ce guide, nous avons simulé la réalisation d'une production en catapultant un objet sur une table. Le but étant de placer l'objet dans la cible. La cible symbolise le produit parfait, alors que la catapulte symbolise le processus de production. De la sorte, nous sommes capables d'obtenir une base d'étude pour notre guide.

La réalisation de ces expériences nécessite la détermination des conditions de travail.

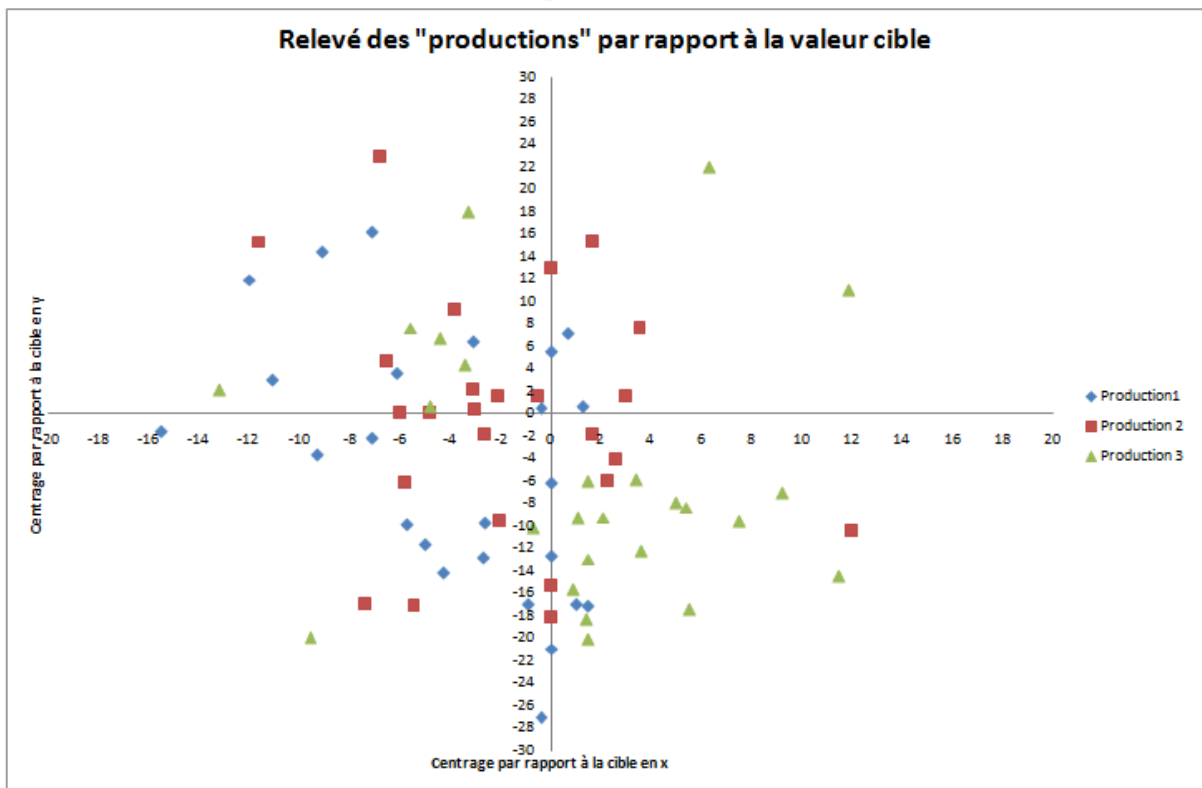
Étude pratique

État des lieux de la production

Pour la réalisation des tests de production, il fallait fixer un nombre de paramètres :

- Objectif : Lancement d'un objet sur une cible à 50cm de la catapulte
- Nombre de lanceurs : 3 personnes
- Nombre de lancers : 25 lancers par personne (ce nombre élevé de lancers permet de voir l'influence de la répétitive sur les résultats obtenus)
- Tolérance : ± 7 cm.

Production et calcul des capacités :



D'après ce relevé, on constate une grande dispersion des résultats par rapport à l'objectif pour une même série de lancers mais aussi pour les différentes séries et donc cela signifie que le processus de lancers n'est pas fiable.

- *Calcul et analyse de la capacité*

Afin d'observer si notre processus de production est capable ou non de manière chiffrée, nous avons calculé la capacité. Il s'agit du niveau de performance d'un processus par rapport aux limites admissibles (C_p). Une autre capacité peut être calculée, le C_{pk} qui permet de déterminer si le processus est centré par rapport aux limites de spécifications.

Ces calculs ont donnés les résultats suivants :

- $C_p = 0,088274279$
- $C_{pk} = 0,092264592$

Nous remarquons très bien que $C_p < 1,33$ ce qui est très insuffisant. Dans le cas de cette étude, cela signifie que le processus n'est pas capable.

État des lieux de la mesure

Le moyen de mesurer notre production ne nous semble pas très performant. Mais, entre le « sembler » et le « être », il y a une grande différence. C'est pourquoi nous désirons mettre en place une étude de R&R (Reproductibilité et Répétabilité).

Pour notre étude, nous avons privilégié l'utilisation d'une feuille de calcul disponible sur internet. L'utilisation d'outil déjà maîtrisé est un plus dans notre développement. Nous voudrions souligner l'importance de ce genre d'outil qui permet une meilleure compréhension ainsi qu'une meilleure capacité d'exécution.

Grâce à cette feuille de calcul¹, nous avons pu constater que notre capacité processus était loin d'être bonne. En effet, nous avons un C_{pc} (capacité du processus de contrôle) de 0 pour les mesures en X et en Y.

Dans ce cas, nous allons devoir agir sur le moyen de mesure afin de ne pas perturber la dispersion de notre production avec la dispersion de notre moyen de mesure.

Étude de la problématique

Afin de réduire cette dispersion et améliorer le processus il est indispensable de bien étudier la problématique afin de dégager les causes en tenant en compte des différents facteurs. Pour cela, nous avons réalisé un QQQCP afin de mieux cadrer le problème avant de se lancer dans la recherche des solutions.

¹ Pillet M. *Outils Excel* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://web.qlio.univ-savoie.fr/pillet/Outils%20Excel.htm>. [Consulté le 17/12/2013]



À l'aide du QQQCP, nous avons bien identifié notre problématique ainsi que les différentes parties prenantes.

Étude théorique : Principe et outils de la méthode 'Define'

Principe de la méthode 'Define'

L'étape **Define** repose sur trois phases essentielles :

- Récolter les données nécessaires pour évaluer le processus de production en analysant les retours client, le marché ainsi qu'en revoyant les exigences des clients.
- Identifier la problématique, analyser les risques du projet ainsi que l'organisation du travail par la rédaction de la charte du projet et les différents d'outils de planification et gestion du temps.
- Caractériser les différentes activités du processus.

La phase Define a comme finalité d'identifier le but du projet. Cela réside essentiellement dans le fait de bien identifier la problématique. Dans le cas contraire, nous pouvons avoir une mauvaise compréhension du problème observé en production et par conséquent une mauvaise identification des défaillances, des causes et des solutions. Ce qui constituerait une dérive pour tout le reste de la démarche.

Outils et techniques utilisés

- **Calcul de la capacité : Cp et Cpk**

- Cp : *Indice de capacité*

Il présente l'aptitude d'un processus à respecter des spécifications, à atteindre en permanence le niveau de la qualité souhaité. Il donne également le rapport entre la dispersion du processus (sa variabilité) et la plage entre les tolérances.

$$Cp = \frac{(Ts - Ti)}{6 \times \sigma}$$

Avec **Ts** = Tolérance supérieur, **Ti** = Tolérance inférieur

Capabilité	Interprétation
$Cp > 1,33$	Capabilité idéale, à maintenir
$1,33 > Cp > 1$	Capabilité trop juste : une dérive peut apparaître
$1 > Cp > 0,67$	Capabilité insuffisante : Augmentation des contrôles et mise en place d'une démarche d'amélioration
$0,67 > Cp$	Capabilité très insuffisante : Analyse immédiate des causes, révision des tolérances, actions correctives

Figure 3 : Tableau d'interprétation des capabilités (Cp)

- *Cpk* :

Il présente le centrage de la production par rapport aux limites de la tolérance. Un Cpk élevé indique non seulement que la production est répétable, mais qu'elle est également bien centrée dans l'intervalle de tolérance (et qu'il y aura peu de risque de voir des pièces produites en dehors des tolérances).

$$Cpk = \frac{\text{Min}[(Ts - \text{moy}); (\text{moy} - Ti)]}{3 \times \sigma}$$

Avec **Ts** = Tolérance supérieur, **Ti** = Tolérance inférieur, moy = moyenne des résultats

Capabilité	Interprétation
$Cpk > 1,33$	Capabilité idéale : procédé centré, à maintenir
$1,33 > Cpk$	Capabilité trop juste : une dérive peut apparaître, mettre en place une démarche d'amélioration pour comprendre la dérive et la stopper

Figure 4 : Tableau d'interprétation des capabilités (Cpk)

- **Étude du moyen de mesure : R&R**

La méthode R&R permet de définir si le moyen de contrôle est capable à travers deux points :

- L'étude de la répétabilité de l'équipement, c'est-à-dire que si une personne prend deux mesures avec la même pièce, elle trouvera le même résultat.

- L'étude de la reproductibilité, c'est-à-dire que deux mesureurs trouvent le même résultat sur la même pièce.

Nous allons vous présenter les calculs théoriques nécessaires pour l'application de cette méthode.

- *Répétabilité*

Elle donne la variation liée à l'équipement. Elle est calculée à partir de la moyenne de la moyenne des étendues divisée par le coefficient d_2 . Ce coefficient correspond aux nombres de mesure par échantillon.

$$\sigma_{\text{Répétabilité}} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

- *Reproductibilité*

Elle présente l'incidence qu'à un opérateur sur la répétabilité de la mesure qu'il effectue. Le calcul de cette reproductibilité passe par plusieurs étapes.

1. Calcul de l'écart-type moyen par opérateur

$$\sigma_{\text{MoyOp}} = \frac{R_{\bar{x}}}{d_2^*}$$

Après avoir calculé cet écart-type moyen par opérateur,

2. Observation de l'influence de l'opérateur

$$\frac{R_{\bar{x}}}{d_2^*} = \frac{\sigma_{\text{Répétabilité}}}{\sqrt{r \cdot n}}$$

3. Calcul de la reproductibilité

Ici, deux cas peuvent se produire :

- L'écart-type des moyennes selon les opérateurs est inférieur ou égal à l'autre partie de l'équation. Cela signifie que l'influence est nulle.

$$\sigma_{\text{reproductibilité}} = 0$$

- L'écart-type des moyennes est supérieure à l'autre partie de l'équation. Cela signifie qu'il y a une incidence de l'opérateur sur la reproductibilité. Dans ce cas, nous pouvons utiliser la formule suivante :

$$\sigma_{\text{reproductibilité}} = \sqrt{\left(\frac{R_{\bar{x}}}{d_2^*}\right)^2 - \frac{\sigma_{\text{Répétabilité}}^2}{r \times n}}$$

- *La capacité du moyen de mesure*

Une fois que les calculs de la répétabilité et de la reproductibilité ont été faits, il ne nous reste plus qu'à calculer le R&R.

$$\sigma_{\text{R\&R}} = \sqrt{(\sigma_{\text{Répétabilité}})^2 + (\sigma_{\text{reproductibilité}})^2}$$

Nous avons alors la dispersion globale de l'instrument de mesure.

- *Quelle est la définition d'une bonne capacité du moyen de mesure ?*

Avant d'observer la capacité d'un moyen de mesure, il faut faire un dernier calcul.

$$\%R\&R = 100 \times \frac{6 \times \sigma_{GRR}}{Tolérance}$$

$\%R\&R \leq 10\%$	L'équipement est conforme .
$10\% < \%R\&R \leq 30\%$	L'équipement est éventuellement acceptable . Selon, son coût, sa disponibilité, ses limites techniques, l'équipement est acceptable. Une démarche d'amélioration doit être entreprise.
$30\% < \%R\&R$	L'équipement n'est pas conforme . Il y a clairement ici un problème de mesure que ce soit au niveau des instructions de mesure, de l'environnement entourant l'équipement ou encore le manque de formation sur l'équipement. Dans tous les cas, si une amélioration n'est pas entreprise, il faudra penser à changer le moyen de mesure.

Figure 5 : Conformité des moyens de mesures à la suite d'une étude R&R

- **Définition d'une problématique : QQQQCP**

Cette méthode permet d'analyser les problèmes d'une activité sur toutes les dimensions. Il est ainsi plus facile de décrire la situation en adoptant une attitude interrogative systématique.

Le QQQQCP repose sur des questions élémentaires très pratiques pour mettre de l'ordre dans les idées.

- **Qui ?** : Quelles sont les personnes impliquées dans le problème ? (qu'elles soient émettrices ou réceptrice, interne ou externe)
- **Quoi ?** : Quel est le problème ? Quels sont les faits, les chiffres, les résultats qui le prouve ?
- **Où ?** : Où se pose le problème ? À quel endroit ? Dans quel lieu ?
- **Quand ?** : Quand apparaît le problème ? À quel moment ?
- **Comment ?** : Comment peut-on mesurer le problème ? Comment pourra-t-on mesurer ses solutions ?
- **Pourquoi ?** : Pourquoi doit-on résoudre le problème ? Quels sont les enjeux que nous devons avoir ?

De plus, chacune de ses questions peut être complétée par un **Combien ?** afin de pouvoir les chiffrer avec beaucoup de précision.

Le QQQQCP est un outil efficace qui permet une visualisation immédiate de la problématique.

Pour conclure, nous tenions à rappeler que l'étape Define, de définition de problème peut utiliser d'autres outils, peut-être plus pertinent pour votre entreprise, par exemple :

- La charte de projet pour définir les tenants et aboutissants du projet Six Sigma mené dans l'entreprise

- La matrice KANO pour observer les désirs des clients
- Les outils de planification tels que le PERT et le GANTT qui permettent de tenir les délais dans les projets.
- Des calculs financiers pour estimer les pertes de la non qualité et les gains attendus par la mise en place d'une démarche Six Sigma.
- La cartographie du processus, afin de cibler les processus dont le problème provient, voire les processus transverses.

M : Mesure

Méthode de mesure de mesure

Un choix nécessaire

Comme nous l'avons constaté lors de la partie de définition, notre moyen de mesure demeure assez aléatoire. L'étude R&R nous l'a prouvé, avec un Cpc inférieur à 4, nous ne pouvons pas continuer avec notre système de mesure actuel

Ainsi, nous avons décidé de changer la méthode de mesure afin de la rendre plus efficace. Après réflexion, deux méthodes sont apparues pour que le point de chute du lancer soit plus facilement identifiable par le mesureur.

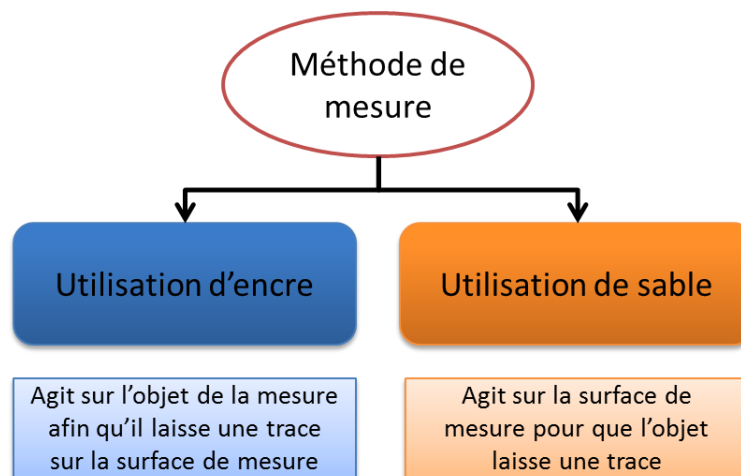


Figure 6 : Choix de la méthode de mesure

La méthode choisie est l'utilisation de sable qui est plus simple à mettre en place dans un environnement comme le nôtre.

Validation de la nouvelle méthode de mesure : Cas pratique

Nous avons donc par la suite fait une nouvelle étude R&R afin de voir si cette amélioration du moyen de mesure était pertinente.

Pour cette étude R&R, nous avons disposé du sable sur la cible de mesure, puis demandé à nos opérateurs de mesure de positionner les points de retombé des lancers. Nous avons effectué notre étude sur dix lancers.

Lancé	Opérateur 1				Opérateur 2			
	Mesure 1		Mesure 2		Mesure 1		Mesure 2	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	-4,4	0	-4,4	0	-4,5	0	-4,3	0
2	-3,3	-6,9	-3,3	-6,9	-3,4	-6,8	-3,3	-6,8
3	-0,7	-14,2	-0,7	-14,3	-0,8	-14,2	-0,8	-14,2
4	-5,5	7,9	-5,6	7,9	-5,6	7,9	-5,7	7,7
5	-0,5	-14,3	-0,5	-14,3	-0,5	-14,4	-0,5	-14,3

6	-0,5	4,4	-0,5	4,4	-0,5	4,5	-0,5	4,5
7	-1,8	12,3	-1,7	12,3	-1,8	12,3	-1,7	12,3
8	-8,8	14,1	-8,8	14,1	-8,8	14,1	-8,9	14,1
9	3,5	-4,8	3,5	-4,9	3,5	-4,9	3,5	-4,9
10	0,6	5,9	0,6	5,9	0,6	5,9	0,6	5,9

Figure 7 : Mesure pour étude R&R

À la suite de ces mesures, nous avons étudié la capabilité du processus de contrôle (Cpc). Celui-ci est égal à 24,92 pour les mesures en X et à 45,77 pour les mesures en Y².

Comme notre Cpc est supérieur à 4, nous pouvons en conclure que notre moyen de mesure est capable. À présent, nous sommes certains que notre problème de variabilité dépendra uniquement du processus et non plus du moyen de mesure de ce processus.

Nouvelles mesures

Cas pratique

Dans le cadre de cette étude, de nouvelles mesures ont été faites. L'objectif ici est de trouver quelle est la meilleure configuration de lancer pour obtenir la meilleure performance par rapport à la cible.

Trois facteurs, qui semblent influencer sur le processus de catapultage, ont été trouvés. Dans le tableau ci-après, vous les retrouverez, ainsi que leurs différents niveaux d'opérabilité.

Facteur	Niveau 1	Niveau 2
Catapulte	Pied fixé au sol	Pied maintenu manuellement
Angle de lancé	Bas	Moyen
Position du personnage lors du lancé	De face	Allongé

Figure 8 : Facteurs et niveaux des plans d'expérience

La décision a été prise de faire varier les essais selon les valeurs suivantes. Du fait du caractère très aléatoire des lancers, nous avons préféré faire 4 lancers différents. Dans un plan d'expérience fait en entreprise seul un essai est nécessaire pour chacune des combinaisons.

ESSAIS	CATAPULTE	ANGLE	POSITION	LANCER 1		LANCER 2		LANCER 3		LANCER 4		MOYENNE	
				X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	1	1	1	-4	7	-7,9	11	-3,4	7	-0,9	6,1	-4	7,775
2	1	1	2	7,4	12	-7,4	6,9	-18	-3,5	-6,3	-13	-6,15	0,6
3	1	2	1	3,1	-36,6	-6,6	-25,4	-0,5	-28,8	2,8	-36,6	-0,3	-31,85
4	1	2	2	-3	-4,2	-2,8	-8,5	6,7	-7,3	-6	-17,2	-1,3	-9,3
5	2	1	1	-1	-4,8	-1,3	-10,3	4,7	1,7	4,4	-0,4	1,775	-3,45
6	2	1	2	-4	-32,3	-5,1	0,2	-18	-16,7	11,7	-1,2	-3,97	-12,5
7	2	2	1	2,4	-23,3	-0,5	-22,3	3,6	-31,9	-3	-13,2	0,625	-22,675
8	2	2	2	-8	-11,7	-5,2	-25,8	-0,4	-4,4	-0,2	-21	-3,47	-15,725

Figure 9 : Mesure de plans d'expérience

La réalisation des essais donne le graphique suivant.

² Cette mesure a été calculée grâce à une feuille de calcul R&R Charbonneau disponible gratuitement en ligne à l'adresse suivante : <http://web.glio.univ-savoie.fr/pillet/Outils%20Excel.htm>

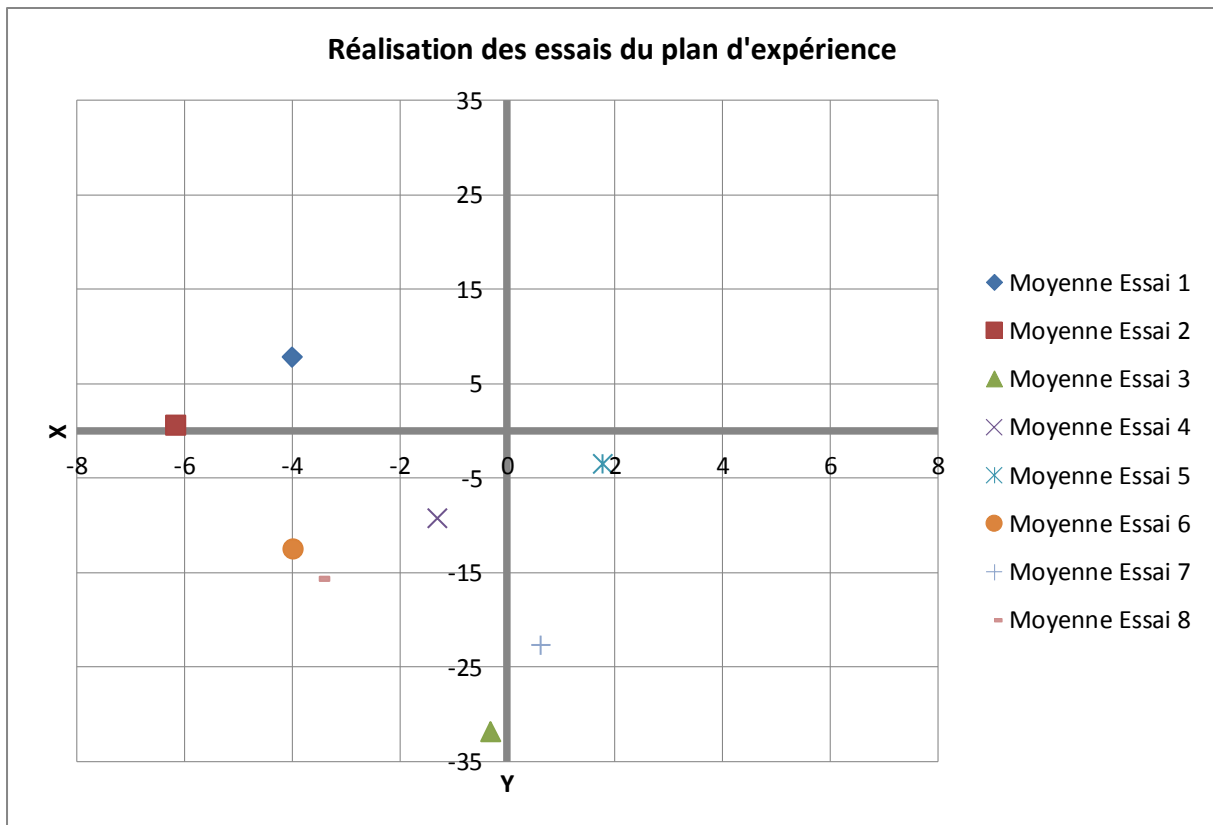


Figure 10 : Moyenne des essais des plans d'expérience

Nous analyserons dans la prochaine partie du guide les résultats que nous avons trouvés.

Explication techniques

Pour ces nouvelles mesures, nous avons utilisé le système des plans d'expérience.

- **Qu'est-ce qu'un plan d'expérience ?**

Il permet d'organiser, et ainsi d'optimiser, les essais pour les études industrielles.

Il existe trois critères principaux motivant le choix de plan d'expérience :

- une acquisition de connaissance : chacun des essais effectués lors des plans d'expérience donne une certaine
- une minimisation du nombre d'essais : les essais sont optimiser afin d'essayer de garantir la meilleure solution possible le plus facilement possible
- une précision maximale : les essais sont effectués afin d'offrir une réponse la plus pertinente possible.

- **Comment le construire ?**

TOUT PLAN SE CONSTRUIT A PARTIR DE L'EXPERIENCE QUE L'ON A

S'il n'y a qu'un commandement à retenir pour les plans d'expérience, c'est celui-là. Si l'on ne sait rien du processus étudié, il ne sera pas possible de construire un quelconque plan.

Vous pouvez trouver deux types d'expérience dans votre entreprise :

- L'expérience relative aux facteurs et à leur variation proche.

En d'autres mots, si vous ne savez pas comment régler la machine et/ou quels types de réglage influent sur votre produit, il est nécessaire de vous informer sur ces points.

- L'expérience sur la manière dont les facteurs vont se combiner entre eux.

Il s'agit ici d'observer de d'avoir conscience des facteurs pouvant influencer les uns envers les autres.

De ce fait, il ne faut pas hésiter à se tourner du côté des « Experts ». Ce sont les personnes qui travaillent sur les machines depuis quelques temps et qui sont capable de trouver quels sont les facteurs nécessaires pour l'étude. Ces « Experts » sont le cœur de la compétence métier.

METHODE DE CONSTRUCTION D'UN PLAN D'EXPERIENCE

1. Identification des facteurs
2. Identification des interactions possibles entre les facteurs
3. Création du plan d'essais selon les informations récoltées précédemment
4. Réalisation des essais

Dans notre cas, au vu du faible nombre de facteur, nous avons décidé de créer un plan complet. C'est-à-dire que toutes les variations possibles des facteurs ont été étudiées.

- **Particularité de notre étude**

Dans notre étude, nous sommes restés sur un cas extrêmement basique qui faisait varier 4 facteurs à 2 niveaux. Il faut savoir que la réalité est souvent plus complexe. De nombreux autres éléments sont étudiables, rendant les plans d'expérience plus difficiles.

- *Interaction*

Il arrive fréquemment que l'on constate des interactions entre les facteurs, c'est-à-dire que le système ne réagit pas de manière identique à la variation d'un facteur selon la configuration d'un autre facteur.

Prenons un **exemple simple** pour expliquer ce qu'est l'interaction. Nous voulons observer les changements de température dans une pièce selon si la fenêtre est ouverte, si la porte est ouverte ou bien si les deux son ouvert. La pièce a toujours la même température au début de l'expérience, soit 20 degrés. Nous voulons voir en combien de temps la pièce atteint la température de 17 degrés.

Dans un premier temps, nous ouvrons uniquement la porte. Au bout de 20 minutes, la température désirée est atteinte.

Dans un second temps, nous ouvrons uniquement la fenêtre. Au bout de 15 minutes, la pièce atteint la température désirée.

Dans un dernier temps, nous ouvrons à la fois la fenêtre et la porte. Au bout de 5 minutes, la température de la pièce atteint la température que nous désirions avoir. Le courant d'air entre la porte et la fenêtre a fait diminuer la température bien plus vite qu'avec uniquement la porte ouverte ou uniquement la fenêtre ouverte. Ici, nous avons une interaction entre la porte et la fenêtre qui

créer un courant d'air. Cette interaction « courant d'air » doit être prise en compte dans la rédaction des plans d'expérience afin d'éviter les erreurs.

Le phénomène des interactions est notamment pris en compte par les plans fractionnaires dont nous parlerons dans la prochaine partie.

- Plans fractionnaires

Dans les cas concrets, il arrive très fréquemment que le nombre d'essais soit très grand. Dans ce cas-là, surtout si les essais sont coûteux et/ou nécessite un temps de mise en œuvre important, il est conseillé de faire un plan fractionnaire. Il s'agit ici de ne faire qu'une partie des essais.

Par exemple pour notre étude de cas, seul quatre des huit essais auraient été effectués. La table suivante, tiré des travaux de Genichi Taguchi, permet de modéliser ce plan fractionnaire.

ESSAIS	CATAPULTE	ANGLE	POSITION	LANCER 1		LANCER 2		LANCER 3		LANCER 4		MOYENNE	
				X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	1	1	1	-4	7	-7,9	11	-3,4	7	-0,9	6,1	-4	7,775
2	1	2	2	-3	-4,2	-2,8	-8,5	6,7	-7,3	-6	-17,2	-1,3	-9,3
3	2	1	2	-4	-32,3	-5,1	0,2	-18	-16,7	11,7	-1,2	-3,97	-12,5
4	2	2	1	2,4	-23,3	-0,5	-22,3	3,6	-31,9	-3	-13,2	0,625	-22,675

Figure 11 : Tableau des plans fractionnaires

Dans le tableau suivant, nous présentons les avantages et les inconvénients des plans fractionnaires.

Avantage des plans fractionnaires	Inconvénient des plans fractionnaires
- Moins coûteux qu'un plan complet	- Risque de passer à côté de la meilleure solution
- Moins long à mettre en place qu'un plan complet	

L'utilisation de plan fractionnaire reste à l'appréciation de l'entreprise et surtout de ses ressources, qu'elles soient humaines, matérielles ou financières.

A : Analyze (Analyser)

Dans cette troisième partie, nous allons vous proposer l'analyse des plans d'expériences effectués précédemment. Cette partie sera également légèrement différente des autres car elle mêlera l'étude de cas et les explications techniques pour plus de clarté.

Le cas des plans d'expérience

Les plans d'expériences effectués, il faut à présent en analyser les résultats afin de trouver la meilleure combinaison de facteurs donnant les lancés dans la cible.

Étude des effets du plan d'expérience

Les **effets** dans un plan d'expérience sont représentés par un tableau. Chaque case du tableau est remplie par la moyenne des effets selon le facteur et le niveau.

- **Étude des effets en X**

Niveau / Facteur	Catapulte	Angle	Position
1	-2,9375	-3,0875	-0,475
2	-1,2625	-1,1125	-3,725

Moyenne des essais 1,3,5,7 où la position est au niveau 1

Figure 12 : Tableau d'étude des effets en X

La figure ci-dessous présente la version graphique des effets.

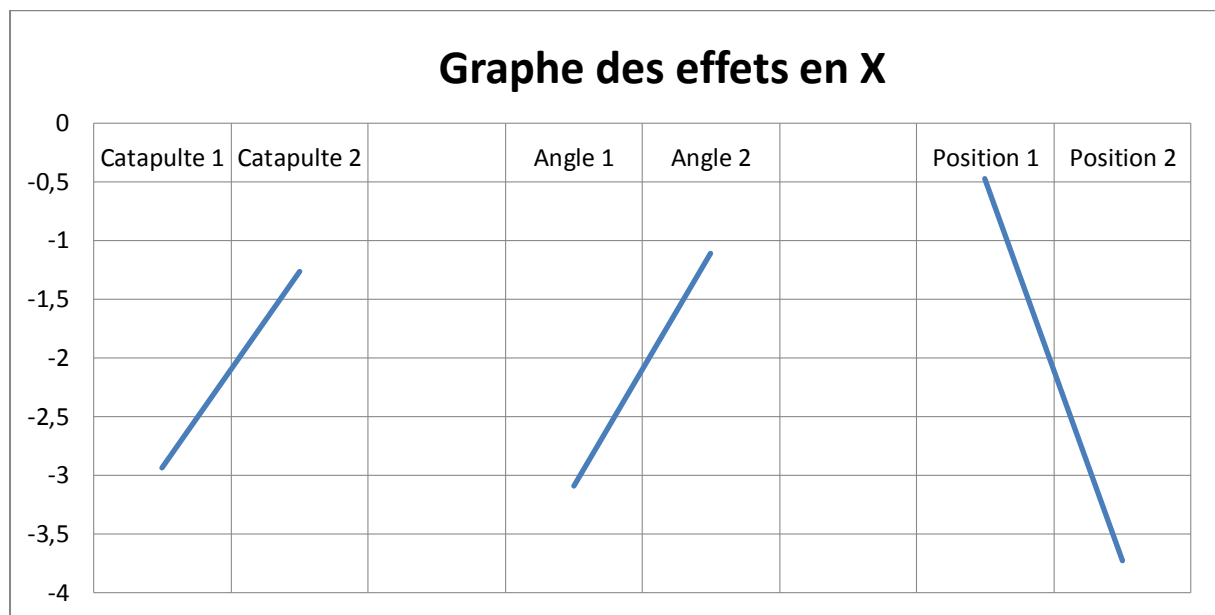


Figure 13 : Graphique des effets en X

Ici, les pentes observées sont toutes fortes. Nous pouvons donc dire que tous les facteurs ont des effets sur la variabilité en X.

Une pente faible, voire nulle, indiquerait une absence totale d'effet ou bien un effet négligeable dans notre processus.

- **Étude des effets en Y**

Niveau/Facteur	Catapulte	Angle	Position
1	-8,194	-1,89	-12,55
2	-13,59	-19,9	-9,2313

Figure 14 : Tableau des effets en Y

La figure ci-dessous présente la version graphique des effets.

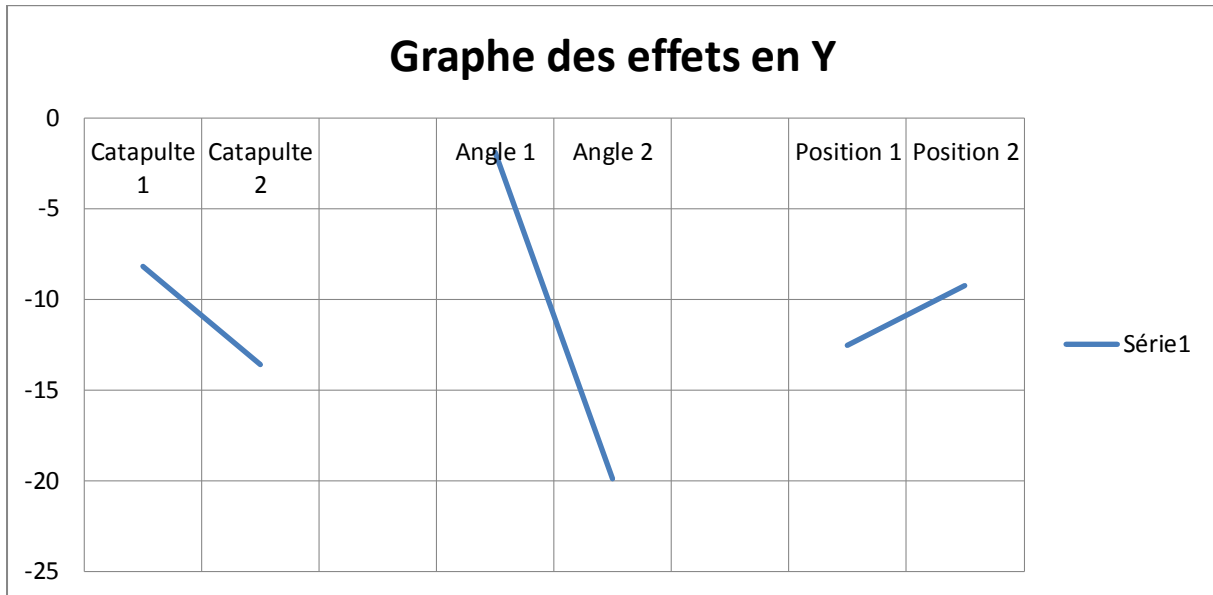


Figure 15 : Graphique des effets en Y

Ici, nous pouvons constater que le facteur qui a le plus grand effet sur la variation en Y est l'angle. Les deux autres facteurs, la position ainsi que la fixation de la catapulte, ont des pentes faibles. On peut donc penser qu'ils ont un effet moindre sur la variation.

Méthode de calcul des effets

Le calcul des effets se fait à l'aide des résultats trouvés lors des plans d'expérience.

Il s'agit de calculer la moyenne des effets d'un paramètre lorsque ce paramètre est à un niveau donné, puis de reporter ce résultat dans un tableau.

Étude des interactions dans le plan d'expérience

L'étude des **interactions** sert à observer si des facteurs ont une influence sur d'autres. En d'autre terme, nous cherchons à voir si la position d'un facteur spécifique change les résultats d'un autre facteur.

- Étude des interactions en X

Interaction Catapulte / Angle			Interaction Catapulte / Position			Interaction Angle / Position		
	C = 1	C = 2		C = 1	C = 2		A = 1	A = 2
A = 1	-5,075	-1,1	P = 1	-2,15	1,2	P = 1	-1,1125	0,1625
A = 2	-0,8	-1,425	P = 2	-3,725	-3,725	P = 2	-5,0625	-2,3875

Moyenne des essais 1 et 2 où la catapulte est au niveau 1 et l'angle au niveau 1

Figure 16 : Tableau d'étude des interactions en X

Ci-dessous vous pourrez observer ces résultats graphiquement.

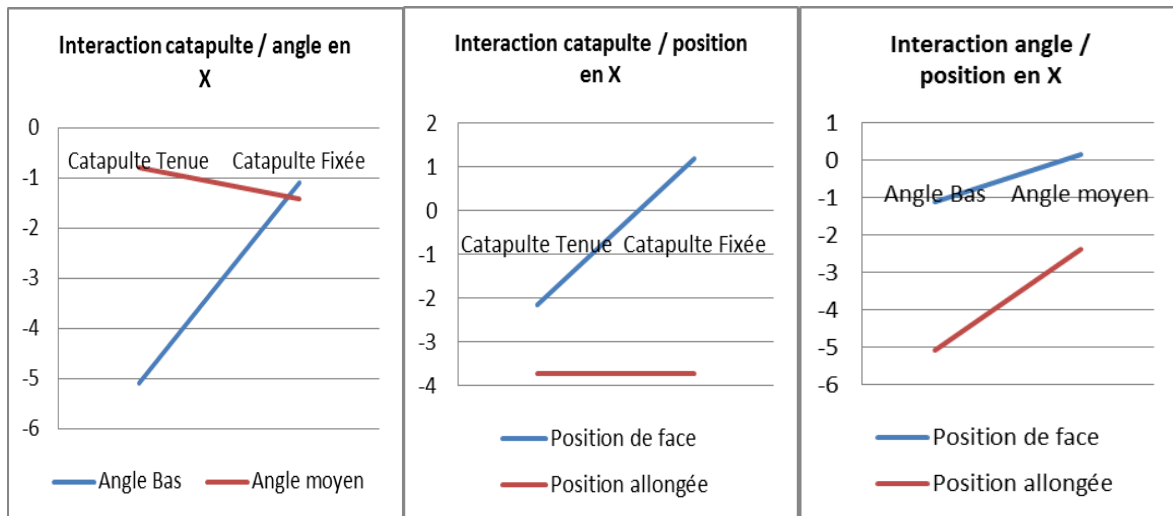


Figure 17 : Graphique des interactions en X

Nous pouvons voir ici qu'il y a deux interactions non nulles qui sont les interactions entre la catapulte et l'angle, ainsi qu'entre la catapulte et la position.

Sur le graphe Interaction catapulte/position en X, nous pouvons clairement noter que l'effet position allongé est faible, quel que soit la fixation de la catapulte. Il est par contre important lorsque la position est de face.

L'interaction angle / position est quasiment nulle du fait du parallélisme des deux droites observées.

Point le plus proche de la cible

Ici, nous pouvons dire que la configuration des facteurs pour que le point soit le plus proche de la cible en X est la suivante :

- Catapulte : Fixée
- Angle : Bas
- Position : De face

- **Étude des interactions en Y**

Voyons à présent si le meilleur résultat trouvé pour la variabilité en X vaut également pour la variabilité en Y.

Interaction Catapulte / Angle		
	C = 1	C = 2
A = 1	4,1875	-7,975
A = 2	-20,575	-19,2

Interaction Catapulte / Position		
	C = 1	C = 2
P = 1	-12,038	-13,06
P = 2	-4,35	-14,11

Interaction Angle / Position		
	A = 1	A = 2
P = 1	2,1625	-27,263
P = 2	-5,95	-12,513

Figure 18 : Tableau des interactions en Y

Les figures ci-dessous représentent les résultats des interactions graphiquement.

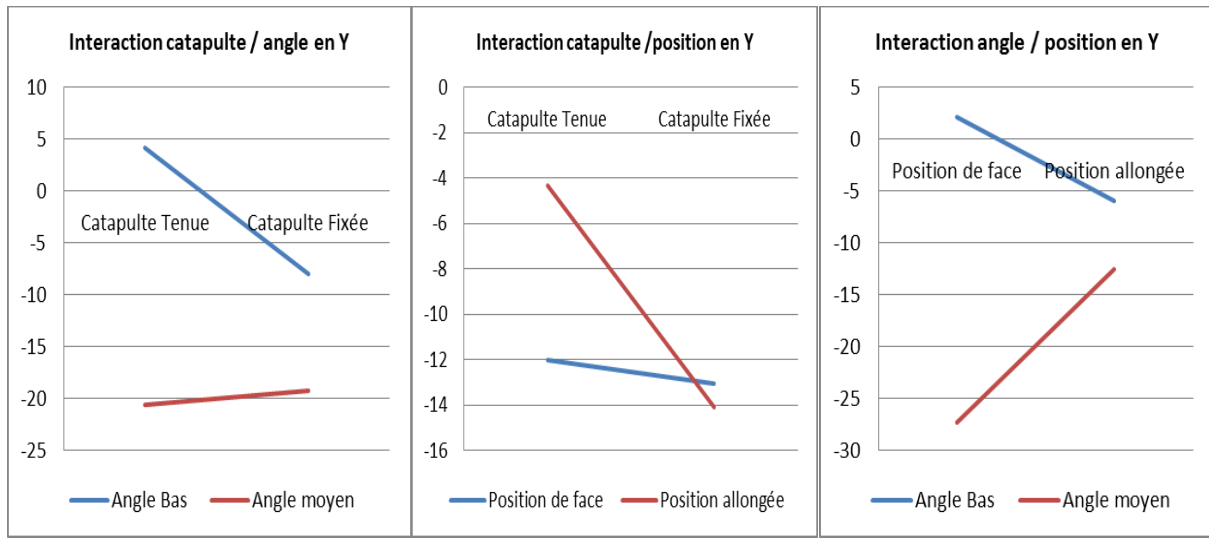


Figure 19 : Graphique des interactions en Y

Ici, nous pouvons constater que toutes les interactions sont non nulles. C'est-à-dire que les facteurs peuvent être très importants selon le niveau.

Point le plus proche de la cible

Ici, nous pouvons dire que la configuration des facteurs pour que le point soit le plus proche de la cible en Y est la suivante :

- Catapulte : Tenue
- Angle : Bas
- Position : De face

Méthode de calcul des interactions

Le calcul des interactions se fait à l'aide des résultats trouvés lors des plans d'expérience. Une interaction prend en compte deux paramètres à un niveau qui peut être différents.

Le calcul se fait en prenant la moyenne des essais lorsque le paramètre A est au niveau voulu et le paramètre B est au niveau voulu.

Meilleure solution

Nous avons essayé de déterminer à l'aide des valeurs analysées quel était le meilleur modèle. Les meilleurs modèles trouvés en X et en Y sont différents.

Pour chacun des modèles, voyons les moyennes que les essais ont donnés :

Essais 1 : catapulte tenue, angle bas et position de face

→ Moyenne en X : -4 → Moyenne en Y : 7,775

Essais 5 : catapulte fixée, angle bas, position de face :

→ Moyenne en X : 1,775 → Moyenne en Y : -3,45

Nous pouvons constater que la moyenne de l'essai 5 est dans les tolérances que nous nous sommes fixés. Nous prendrons donc cette configuration de paramètres en priorité.

Pour la suite de notre étude, nous essayerons de valider les paramètres suivants.

- Catapulte : Fixée
- Angle : Bas
- Position : De face

Afin de valider ou non ce modèle, nous referons quelques essais dans la partie suivante, Improve – Amélioration.

I : Improve (Améliorer)

Dans cette nouvelle partie, nous entrons vraiment dans la phase d'amélioration du processus. Avec les plans d'expériences déjà réalisés nous sommes sur le point de trouver la meilleure configuration possible pour nos lancers. Une fois cette configuration définie, nous pourrions mettre une nouvelle production en marche afin de constater les effets de notre amélioration.

Validation des plans d'expériences

La première partie de notre phase d'amélioration nous allons voir si les modèles trouvés par les plans d'expérience dans la partie précédente sont validés.

Pour cela, nous allons faire une série de 4 essais avec les configurations suivantes :

- Catapulte : Fixée
- Angle : Bas
- Position : De face

Cette configuration nous a donné les mesures du prochain tableau.

	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4
X	-1,5	2,8	-2,5	4,1
Y	3,9	4,3	-3,9	-0,5

À travers ces mesures, nous constatons qu'elles sont toutes dans l'intervalle de tolérance. Nous pouvons donc valider le modèle de production.

Dans la prochaine partie de cette phase, nous allons relancer une production et en observer ses spécificités.

Mise en marche d'une nouvelle production

La production

Suite à la validation de notre plan d'expérience, nous avons effectué une nouvelle production. Nous avons fait 75 lancers dont les valeurs sont données dans le tableau suivant :

Mesure	X	Y	Mesure	X	Y	Mesure	X	Y	Mesure	X	Y
n°1	1,5	1,5	n°21	-2,1	-3,6	n°41	2,8	-1,2	n°61	0,9	0,9
n°2	2,1	-3,5	n°22	1,9	-2,8	n°42	1,6	3,2	n°62	-1,1	-1,6
n°3	-1,1	-1,3	n°23	2	1	n°43	-2,3	-1,9	n°63	2,3	-2,1
n°4	1,8	-1,3	n°24	3	2,5	n°44	-3	4,1	n°64	1,4	-0,7
n°5	4,2	-1,2	n°25	1,5	1,5	n°45	-2,5	-2,1	n°65	-1,9	2,3
n°6	0,9	-2,1	n°26	4	-2	n°46	-1,7	3,8	n°66	2,8	2,1
n°7	1,6	1,9	n°27	-2	1,2	n°47	-2,7	1,4	n°67	0	3,5
n°8	3,6	1	n°28	-3,1	0,5	n°48	3,1	-0,5	n°68	0,2	0,5
n°9	3,1	1,5	n°29	-0,9	-3,1	n°49	0,8	-2,3	n°69	0,4	-2,1
n°10	-2,4	-5,4	n°30	-4,2	0,9	n°50	0,2	2,9	n°70	3,9	2,3
n°11	-1,5	-2,5	n°31	3,1	-2,8	n°51	-3,4	3,5	n°71	2,7	1,6

n°12	3,5	0,8	n°32	3,8	-1,7	n°52	1,5	-3,1	n°72	1,9	2,8
n°13	2	-1,5	n°33	-4	-2,6	n°53	0,8	0,9	n°73	-2	1
n°14	0,8	1,5	n°34	1,5	1,9	n°54	-0,5	-2,8	n°74	-1,9	3
n°15	-3,5	-4,5	n°35	0,8	0	n°55	0,6	-1,7	n°75	0	-1
n°16	2,9	2,1	n°36	-0,5	0,9	n°56	-2,8	-2,6			
n°17	-4,2	-3,6	n°37	0,6	-1,6	n°57	0,9	1,9			
n°18	2,3	-1,5	n°38	-2,8	-2,1	n°58	-2,4	0			
n°19	1,5	4,6	n°39	0,9	-0,7	n°59	3,1	1,9			
n°20	0,4	-2	n°40	1,9	2,3	n°60	-0,5	0			

Figure 20 : Résultat de la nouvelle production

Les capacités

À la suite de cette production, nous avons voulu vérifier la capacité de notre processus.

- **Capabilité en X**

Nous allons tout d'abord observer la capacité du procédé (C_p) sur le court terme avant d'observer l'indicateur de dérèglement du procédé (C_{pk}) sur le court terme également. Ses observations sont réalisées sur le court terme à cause du faible nombre de valeurs que nous avons.

Capabilité du procédé (C_p)

Écart-type court terme : 1,1490

Intervalle de tolérance : 7

$$C_p = \frac{\text{Intervalle de tolérance}}{6 \times \text{écart - type court terme}} = \frac{7}{6 \times 1,1490} = 1,0153$$

Dérèglement du procédé (C_{pk})

Écart-type court terme : 1,1490

Moyenne : 0,3747

Limite inférieure de tolérance (LIT) : -7

Limite supérieure de tolérance (LST) : 7

$$C_{pk} = \min\left(\frac{\text{Moyenne} - \text{LIT}}{3 \times \text{écart - type}}; \frac{\text{LST} - \text{moyenne}}{3 \times \text{écart - type}}\right) = \min(2,1993 ; 2,5377) = 2,1993$$

Conclusion

Nous pouvons constater que notre C_p est inférieur au seuil normalement requis pour dire que le procédé est capable. En d'autres termes, le fait que notre C_p soit inférieur à 1,33 signifie que la dispersion du procédé est plus grande que les intervalles de tolérances.

Par contre, notre C_{pk} est totalement dans les seuils requis. En effet, notre C_{pk} est supérieur à 1,33. Ce qui signifie que notre procédé est centré.

- **Capabilité en Y**

Afin de vérifier la capabilité de notre procédé en Y, nous allons calculer la capabilité du procédé (Cp) sur le court terme avant d'observer l'indicateur de dérèglement du procédé (Cpk) sur le court terme également. Ses observations sont réalisées sur le court terme à cause du faible nombre de valeurs que nous avons.

Capabilité du procédé (Cp)

Écart-type court terme : 1,1140

Intervalle de tolérance : 7

$$Cp = \frac{\text{Intervalle de tolérance}}{6 \times \text{écart - type court terme}} = \frac{7}{6 \times 1,1140} = 1,0472$$

Dérèglement du procédé (Cpk)

Écart-type court terme : 1,1140

Moyenne : -0,1053

Limite inférieure de tolérance (LIT) : -7

Limite supérieure de tolérance (LST) : 7

$$Cpk = \min\left(\frac{\text{Moyenne} - \text{LIT}}{3 \times \text{écart - type}}; \frac{\text{LST} - \text{moyenne}}{3 \times \text{écart - type}}\right) = \min(2,0629; 2,6387) = 2,0629$$

Conclusion

Au niveau du Cp, nous pouvons dire que le procédé n'est pas capable. Effectivement, il est inférieur à 1,33. Ce qui signifie que la dispersion du procédé est plus grande que les intervalles de tolérance données.

Nous pouvons également constater que notre Cpk est totalement capable. En effet, il est au-dessus du seuil admissible de 1,33. En d'autres termes, nous pouvons affirmer que notre procédé est bien centré.

Qu'est-ce que cela signifie ?

Malgré toutes les améliorations effectuées, nous avons constaté que notre Cp n'était pas capable. Cela est certainement dû au fait que notre catapulte reste un jouet pour enfant et que la précision n'est pas forcément sa meilleure qualité.

En soit ces résultats ne sont pas un drame. Un Cp inférieur à 1,33 dénote une forte dispersion. Ce genre de cas peut arriver en fréquemment. La dispersion est trop forte pour être maîtrisable dans le processus. Dans ces cas-là, il convient d'agir de manière différente pour essayer de pallier au problème qu'une dispersion trop grande pose.

- **Changer les machines**

Il est possible que la dispersion soit due à une machine peu performante du fait de son âge. Il pourrait être prudent de faire examiner les machines afin de connaître leur exact potentiel. De plus, il faut veiller à observer ce qui se fait sur le marché afin de trouver une machine plus performante évitant les dispersions.

- **Améliorer le procédé de fabrication**

Afin de diminuer la dispersion du procédé, il faut éventuellement penser à changer la manière dont la fabrication se fait. En effet, en changeant certains paramètres de la fabrication, voire certains matériaux de fabrication, il peut en résulter une amélioration du procédé de fabrication et peut-être une amélioration de la variabilité dans la fabrication.

- **Augmenter les contrôles**

Si les améliorations précédentes ne peuvent pas être effectuées, il faudra penser à renforcer les contrôles. En effet, bien qu'une pièce soit hors tolérance, cela ne signifie pas forcément que le processus soit hors contrôle. En appliquant un système de contrôle plus fréquent, nous pourrions plus facilement trouver les pièces qui ont été produites hors tolérances.

Dans la prochaine partie, vous pourrez observer les résultats des actions que nous avons menées sur notre processus pour essayer de faire en sorte que la dispersion nous cause le moins de problèmes possibles.

C : Check (Contrôler)

Étude pratique

Une fois que les améliorations de notre production ont été mises en place, nous devons contrôler notre procédé. Ceci s'effectue par la mise en place des outils de contrôle. Nous avons choisi de mettre en place une carte de contrôle.

Deux cartes seront réalisées : une carte de contrôle des moyennes des valeurs puis une carte de contrôle des étendues. Chacune de ses cartes sera réalisée pour les valeurs en X et pour les valeurs en Y.

Cartes de contrôle en X

	Prod 1	Prod 2	Prod 3	Prod 4	Prod 5	Prod 6	Prod 7	Prod 8
Mesure1	5	4,6	2,1	3,4	-5,7	0,7	6,9	-5,5
Mesure 2	3,7	-1,9	6,3	2,3	-6,5	-5,2	-3,5	3
Mesure 3	-2	6,7	-4,7	-5,5	-5	-5	1,8	2,2
Mesure 4	6,2	4,4	-2,8	-3,5	3,5	3,8	0,3	4,7
Mesure 5	-2,5	-5,8	-1,3	-2,8	-1,2	-9,1	3,7	-6,1
Moyenne	2,08	0,85	-0,08	-1,22	-2,98	-2,96	1,84	-0,34
Etendue	8,7	12,5	11	8,9	10	12,9	10,4	10,8

Figure 21 : Tableau des mesures des cartes de contrôles en X

- La carte des moyennes

Il faut tout d'abord calculer les limites supérieures et inférieures de cette carte afin de pouvoir situer notre courbe et juger la pertinence du procédé.

Les limites supérieures de contrôle des moyennes : $LSC = 0 + 0,58 \times 10,65 = 6,177$

Les limites inférieures de contrôle des moyennes : $LIC = 0 - 0,58 \times 10,65 = -6,177$

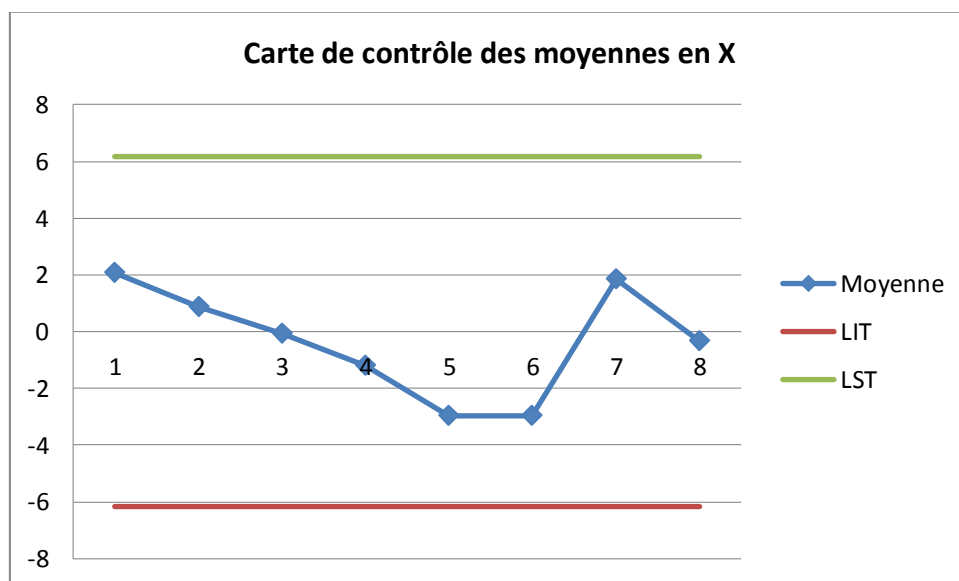


Figure 22 : Carte de contrôle des moyennes en X

Notre procédé est actuellement dans les tolérances, ce qui signifie que les moyennes mesurées sont conformes aux spécifications du client.

- **La carte des étendues :**

De même que pour la carte des moyennes, on calcul les limites mais cette fois c'est uniquement la limite supérieure. Les courbes au-dessous de la limite inférieure ne sont pas pertinente car elles ne peuvent pas être négatives.

Les limites supérieures de contrôle des étendues : $LSC = 2,11 \times 10,65 = 22,47$

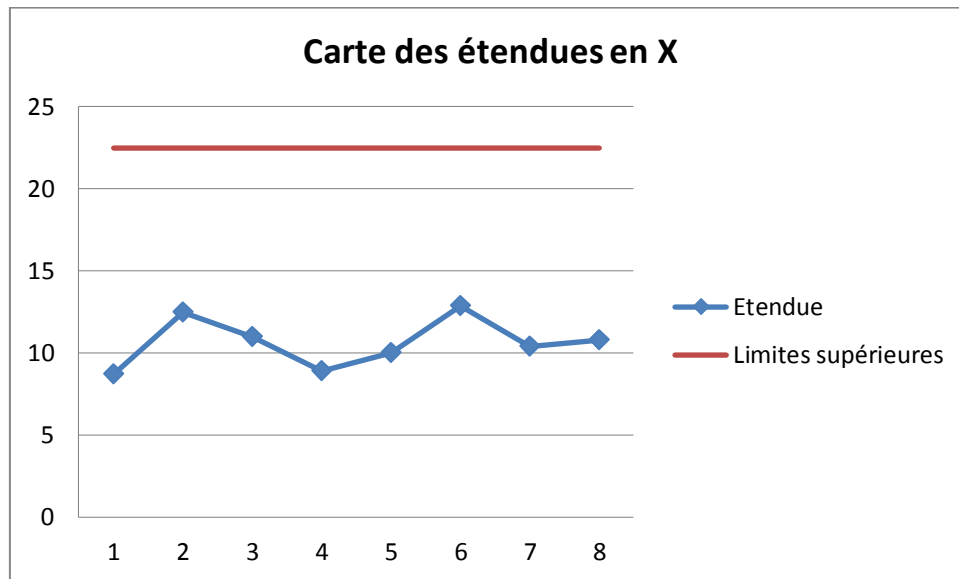


Figure 23 : Carte des étendues en X

Carte de contrôle suivant Y

	Prod 1	Prod 2	Prod 3	Prod 4	Prod 5	Prod 6	Prod 7	Prod 8	Prod 9
Mesure 1	1,6	5,1	9,6	1,7	0,4	6,8	-0,2	1,4	-3,5
Mesure 2	2,7	6,4	-3,8	2,5	6,3	-1,7	-4,2	1,8	-4,2
Mesure 3	-5,3	3,1	-4,5	-5,7	7,3	3,3	6,7	4,3	-4,5
Mesure 4	6,1	-2,6	4,7	6,2	4,2	-5,1	5,1	-5	6
Mesure4	0,3	0,3	2	0,5	1,6	-2,1	5,3	-2	2,2
Moyenne	1,08	2,46	1,6	1,04	3,96	0,24	2,54	0,1	-0,8
Étendue	11,4	9	14,1	11,9	6,9	11,9	10,9	9,3	10,5

Figure 24 : Tableau des mesures des cartes de contrôle en Y

- **La carte des moyennes :**

Les limites supérieures de contrôle des moyennes : $LSC = 0 + 0,58 \times 10,65 = 6,17$

Les limites inférieures de contrôle des moyennes : $LIC = 0 - 0,58 \times 10,65 = -6,17$

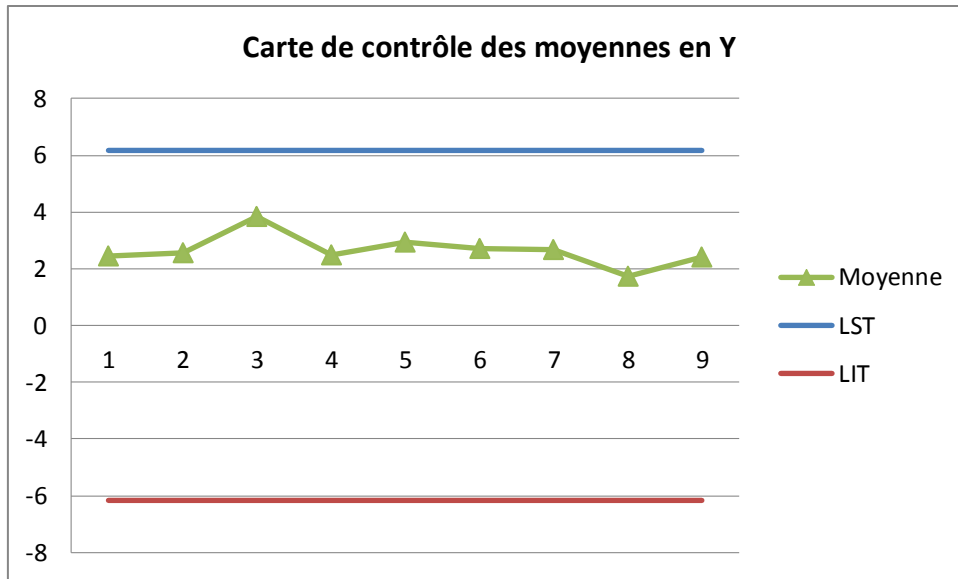


Figure 25 : Carte de contrôle des moyennes en X

- **La carte des étendues :**

Les limites supérieures de contrôle des étendues : $LSC = 2,11 \times 10,65 = 22,47$

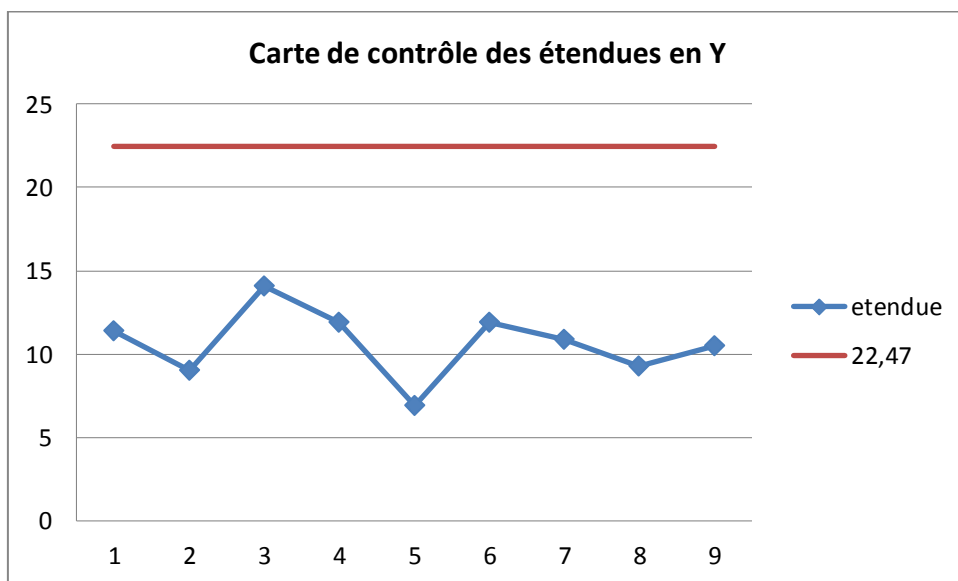


Figure 26 : Carte de contrôle des étendues en Y

Analyses des résultats et pilotage du procédé :

- **Analyse carte de contrôle en X :**

Tous les points obtenus pour les cartes de contrôle des moyennes en X sont à l'intérieur des limites de contrôle. Nous pouvons donc dire que notre procédé est sous contrôle.

Pour la carte de contrôle des étendues, nous constatons que tous les points sont répartis sous la limite supérieure. De plus, l'absence des fluctuations importantes nous permettent de conclure que notre procédé est sous contrôle.

- **Analyse carte de contrôle en Y:**

Pour la carte du contrôle des moyennes, nous constatons qu'il y a une absence de centrage par rapport à la cible : tous les points sont au-dessus de la cible. Nous pouvons donc voir que nous avons une tendance à avoir des points au-dessus de la moyenne. Nous allons régler le procédé afin de le recentrer sur la cible.

Nous remarquons que pour la carte des étendues tous les points sont situés au-dessous de la limite supérieure. De surcroît, l'absence de fluctuations peut nous permettre de conclure que la dispersion de notre processus est bonne.

Explication technique :

Pour la réalisation de la phase contrôle de DMAIC, nous nous sommes basés sur les cartes de contrôle. Dans la suite de cette partie, nous allons vous donner quelques éléments théoriques et techniques afin de pouvoir les appliquer. Nous vous conseillons également de vous reporter aux ouvrages conseillés à la fin de ce guide pour plus d'informations.

Qu'est-ce que c'est une carte de contrôle?

La carte de contrôle par les mesures est un outil statistique d'enregistrement et de visualisation graphique des résultats de contrôles réalisés sur des échantillons. Cet outil visuel et simple permet de vérifier si les variations produites par un processus sont hors contrôle ou sous contrôle en comparant l'étendue des variations produites par le processus et l'intervalle de tolérance établie. Elles sont très utiles pour les opérateurs qui sont très friand d'observer visuellement et directement leurs résultats.

Avant la réalisation d'une carte de contrôle, il faut bien savoir et maîtriser la notion de limites naturelles et connaître leurs importances pour le pilotage du procédé.

Définition des limites naturelles et des limites de tolérances :

- **Les limites naturelles**

Ce sont les limites que le processus atteint lors de sa dispersion

- **Les limites de tolérances**

Ce sont les limites fournies par le client. Ce sont des spécifications techniques.

- **Quelle différence ?**

Les limites de tolérances sont imposées. Elles ne tiennent en générale pas compte des limites naturelles du procédé qui peuvent être plus ou moins grandes que celle-ci.

Comment mettre en place une carte de contrôle ?

❖ Étape 1 : Observation du procédé

Le but de ce procédé est de pouvoir observer et identifier la variabilité naturelle du procédé. Vous devez être capable de décerner quelles sont les variables qui doivent subir des contrôles. La tendance naturelle serait de contrôler toutes les variables. Pourtant, ce n'est pas possible.

Dans cette première étape, nous vous incitons à définir deux ou trois variables pour lesquelles le contrôle est un acte essentiel. Cette définition peut passer par du retour d'expérience, un brainstorming, ou, plus simplement une volonté client de voir cette tolérance spécifique respectée.

❖ **Étape 2 : Calcul des cartes de contrôles**

Il s'agit dans cette étape de calculer les limites de tolérance. Pour établir les cartes de contrôle, il vous faudra faire deux choses : le calcul de l'étendue, afin d'observer le comportement de la dispersion et le calcul de la moyenne, afin d'observer le centrage du procédé.

- **Calcul de l'étendue moyenne**

Elle se calcule sur les échantillons en exploitant les valeurs recueillies durant la phase d'observation.

$$\text{Valeur moyenne des étendues : } R = (R1 + R2 + R3 + \dots + Rn)/n$$

Avec n = nombre de sous-groupes
 R_i = étendue du sous-groupe

- **Calcul des limites de contrôle**

Calcul des limites pour la carte des moyennes :

- La limite supérieure de contrôle : $LSC(moy) = Cible + A_2 \times R$
- La limite inférieure de contrôle : $LIC(moy) = Cible - A_2 \times R$

Calcul des limites pour la carte des étendues :

- La limite supérieure de contrôle : $LSC = D_4 \times R$
- La limite inférieure de contrôle : $LIC = D_3 \times R$

Il faut prendre en compte les éléments suivant dans les calculs :

- La cible est la valeur par rapport à laquelle il faut se centrer. Elle est souvent fixée au milieu de l'intervalle de tolérance.
- Les coefficients A_2, D_3, D_4 sont obtenus suivant le tableau des coefficients pour le calcul des cartes.

❖ **Étape 3 : Détection des variations de réglage et détermination des actions d'amélioration**

Dans cette partie, il s'agit de détecter les variations qui dépassent les variations normales et la déduction des actions correctives déterminés selon les règles de pilotage des cartes de contrôle. Dans le tableau suivant, nous vous donnerons les quatre principales règles de pilotage dans le tableau suivant.

	Description	Carte des moyennes	Carte des étendues
Règle n°1	Point hors limite : Le dernier point contrôlé est hors limite	Régler le procédé	Limite supérieure Détérioration de la capabilité ou erreur de mesure Limite inférieure

				Amélioration de la capacité ou système de mesure bloqué
Règle n°2	Tendance supérieure ou inférieure : 6 points consécutifs sont supérieurs ou inférieurs à la cible		Régler le procédé	Tendance supérieure Détérioration de la capacité Tendance inférieure Amélioration de la capacité (trouver la cause pour la maintenir)
Règle n°3	Tendance croissante ou décroissante : 6 points consécutifs sont en augmentation ou en diminution régulière		Régler le procédé	Série croissante Détérioration de la capacité court terme Série décroissante Amélioration de la capacité (trouver la cause pour la maintenir)
Règle n°4	Point proche des limites : Un point se trouve au bord des limites supérieures ou inférieures		Confirmer la dérive en prélevant une nouvelle pièce et régler au besoin	Limite supérieure A surveiller

Figure 27 : Tableau de pilotage des cartes de contrôle

A chaque fois qu'il y a une détérioration de la capacité, il faut agir. Il faut tout d'abord identifier le problème pour pouvoir intervenir dessus et par la suite reprendre une production normale.

❖ **Étape 4 : Amélioration du procédé**

La dernière étape consiste à la mise en œuvre des actions d'améliorations déterminées dans l'étape 3 afin de résoudre les problèmes détectés dans la phase 2.

Pour conclure, les cartes de contrôle restent l'une des méthodes les plus fiables pour le suivi des procédés de production. Il ne faut pas oublier que les cartes de contrôles ne sont qu'un outil parmi d'autre de la phase de contrôle.

Vous pourrez par exemple utiliser des outils tel que :

- Les capacités pour observer l'évolution de l'amélioration
- La rédaction de procédure pour pérenniser l'amélioration crée
- Les retours d'expérience et les enquêtes de satisfaction pour comprendre le réel impact de l'amélioration
- L'évaluation des gains pour chiffrer ce que l'amélioration a apporté à l'entreprise
- La formation pour que les opérateurs prennent en main les nouvelles bonnes pratiques créées par l'amélioration.

Conclusion

Présenter un cas concret pendant toute une démarche Six Sigma était un parti pris. Généralement, les ouvrages sur le Six Sigma se contentent de présenter la théorie puis quelques exemples pour faire comprendre au lecteur en quoi le Six Sigma était important pour lui, pour son entreprise. Ici, nous avons fait l'inverse en vous présentant notre étude de cas puis en y incorporant une partie plus théorique. Nous avons fait le *Quoi* avant le *Comment*, et ainsi vous montrer qu'il est simple de mettre en place une méthode Six Sigma.

Le développement d'un Six Sigma au sein de votre entreprise n'est pas seulement l'action d'appliquer une méthode basique d'amélioration de la qualité, mais c'est également de rentrer dans un état d'esprit de la qualité. Chacun des outils présentés dans ce guide et dans tous les autres ouvrages sur le Six Sigma que vous pouvez avoir lu sont des bases d'amélioration. Ils sont réutilisables dans presque n'importe quels champs de votre entreprise. De plus, ils vous apportent une méthode de travail que vous n'aviez peut-être pas précédemment.

Dans cet ouvrage, nous avons désiré aller au plus simple, en quelque sorte vulgariser le Six Sigma pour vous montrer qu'il est très facile de l'appliquer en entreprise. Nous espérons sincèrement, à travers la simplicité de ce guide, vous avoir donné envie d'appliquer le Six Sigma à votre entreprise.

Bibliographie générale

Ci-après, vous retrouverez un certain nombre de ressources, livres ou articles en ligne, qui vous permettront d'obtenir des connaissances supplémentaires, parfois nécessaires, sur les informations données dans cette étude.

❖ Généralités

AFNOR. *Démarches Lean, Six Sigma, Lean Six Sigma - Exigences des compétences des chefs de projets d'amélioration et des animateurs d'ateliers*. FD X 06-091. 2011. 23p.

AFNOR. *Six Sigma – Méthode quantitatives dans l'amélioration de processus – Partie 1 : Méthodologie DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve and Control)*. ISO 13053-1. 2011. 41p.

AFNOR. *Six Sigma – Méthode quantitatives dans l'amélioration de processus – Partie 2 : Outils et techniques*. ISO 13053-2. 2011. 56p.

AFNOR. *Six Sigma, une démarche d'amélioration utilisant les outils statistiques – Outils statistiques*. FD X 06-090. 2008. 56p.

Pillet M., Duret D. *La qualité en production – de l'ISO 9001 au Six Sigma*. Paris : Eyrolles, 2009. 406 pages.

- Ouvrage générique de la qualité en production reprenant les bases de la qualité et ayant grandement servi à l'élaboration de ce guide.

Pillet M. *Six Sigma – Comment l'appliquer ?*. Paris : Eyrolles, 2013. 448 pages.

- Ouvrage pédagogique présentant le Six Sigma et les applications au sein de l'entreprise.

❖ Définir

Noyé, D. *Résoudre un problème – Démarche et outils*. Insep consulting, 2006. 47 pages.

❖ Étude R&R

Pillet M. *Outils Excel* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://web.glio.univ-savoie.fr/pillet/Outils%20Excel.htm>. [Consulté le 17/12/2013]

Fichier Excel libre de droit pour la mise en place d'une méthode R&R. Ces fichiers ont été créés par le docteur Maurice Pillet, spécialiste de la qualité en production. Le fichier sur le R&R Charbonneau est facilement utilisable par tous et très utile.

❖ Plans d'expérience

Goupy J. *Introduction aux plans d'expérience*. Paris : Dunod, Technique et Ingénierie, 2013. 412 pages.

Introduction détaillée aux plans d'expériences

Pillet M. *Les plans d'expériences pour la méthode Taguchi*. Paris : Edition d'Organisation, 1997. 330 pages.

Présentation détaillées des plans d'expériences suivant la méthode de Genichi Taguchi.

❖ Les cartes de contrôles

Qualité Online. *Les cartes de contrôle* [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://www.qualiteonline.com/rubriques/rub_3/dossier-38-les-cartes-de-contrôles.html. [Consulté le 18/12/2013].

Présentation des cartes de contrôle et de leur domaine d'application.

Table des illustrations

Figure 1 : Méthode DMAIC.....	5
Figure 2 : Relevé des premières productions	7
Figure 3 : Tableau d'interprétation des capabilités (Cp).....	10
Figure 4 : Tableau d'interprétation des capabilités (Cpk).....	10
Figure 5 : Conformité des moyens de mesures à la suite d'une étude R&R	12
Figure 6 : Choix de la méthode de mesure	14
Figure 7 : Mesure pour étude R&R.....	15
Figure 8 : Facteurs et niveaux des plans d'expérience	15
Figure 9 : Mesure de plans d'expérience.....	15
Figure 10 : Moyenne des essais des plans d'expérience.....	16
Figure 11 : Tableau des plans fractionnaires	18
Figure 12 : Tableau d'étude des effets en X	19
Figure 13 : Graphique des effets en X	19
Figure 14 : Tableau des effets en Y.....	20
Figure 15 : Graphique des effets en Y.....	20
Figure 16 : Tableau d'étude des interactions en X.....	21
Figure 17 : Graphique des interactions en X.....	21
Figure 18 : Tableau des interactions en Y	22
Figure 19 : Graphique des interactions en Y.....	22
Figure 20 : Résultat de la nouvelle production.....	25
Figure 21 : Tableau des mesures des cartes de contrôles en X	28
Figure 22 : Carte de contrôle des moyennes en X.....	28
Figure 23 : Carte des étendues en X.....	29
Figure 24 : Tableau des mesures des cartes de contrôle en Y	29
Figure 25 : Carte de contrôle des moyennes en X.....	30
Figure 26 : Carte de contrôle des étendues en Y.....	30
Figure 27 : Tableau de pilotage des cartes de contrôle	33