

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE ET REVUE LITTÉRAIRE.....	5
1.1 Performance .....	5
1.1.1 Performance moyenne .....	5
1.1.2 Méfaits de la variabilité .....	6
1.2 Qu'est-ce que la méthodologie Six Sigma.....	6
1.2.1 Historique.....	8
1.2.2 Spécificités.....	9
1.2.2.1 Axée sur les résultats financiers.....	11
1.2.2.2 Axée sur la réduction de la variabilité .....	12
1.2.3 Évolution vers le Lean Six Sigma.....	13
1.2.4 Distinction entre l'entreprise manufacturière et de service .....	14
1.2.5 Structure hiérarchique typique.....	15
1.3 Critique envers la méthodologie Six Sigma.....	16
1.3.1 La science et les besoins de l'industrie .....	16
1.3.2 Les rôles, le savoir et les enjeux éducationnels .....	18
1.3.3 La démarche et les enjeux organisationnels.....	21
1.4 Synthèse des enjeux et orientation du travail.....	22
1.5 Méthodologie .....	24
CHAPITRE 2 ÉVALUATION DES OUTILS ET DES CONNAISSANCES REQUISES.....	27
2.1 Reconnaître .....	27
2.2 Définir .....	28
2.3 Mesurer .....	29
2.3.1 Analyse d'un système de mesure (R & R).....	29
2.3.2 Le théorème de la limite centrale (TCL).....	31
2.3.3 Test de normalités .....	32
2.3.4 Analyse d'aptitude d'un procédé .....	33
2.3.4.1 Le calcul du niveau sigma.....	33
2.3.5 Les indices d'aptitudes.....	35
2.4 Analyser .....	37
2.4.1 Le design d'expérience .....	37
2.4.1.1 Déterminer les facteurs à l'étude .....	38
2.4.1.2 Préparation de la matrice des essais.....	39
2.4.1.3 La collecte des données .....	42
2.4.1.4 L'analyse des données .....	43
2.4.2 Analyse de la variance (ANOVA) .....	43
2.4.2.1 Les conditions d'applications lié à l'analyse de la variance .....	45

2.4.3	La stratification .....	48
2.4.4	Analyse multi varié graphique .....	49
2.4.5	Analyse de la régression .....	52
2.4.6	Les tests d'hypothèses.....	52
2.4.7	L'échantillonnage .....	52
2.5	Améliorer .....	54
2.6	Contrôler .....	56
2.6.1	Les cartes de contrôle.....	56
2.7	Synthèse des outils statistiques .....	62
CHAPITRE 3 SÉLECTION D'OUTILS DE REMPLACEMENT .....		63
3.1	Type d'opérations et démarche d'analyse.....	65
3.2	Sélection, analyse et conception des outils .....	66
3.2.1	Les outils graphiques de base .....	66
3.2.1.1	Boîte à moustache .....	66
3.2.1.2	Graphique à barres .....	69
3.2.1.3	Le graphique secteur .....	70
3.2.1.4	Histogramme.....	71
3.2.1.5	Diagramme de Pareto.....	71
3.2.2	L'analyse d'un système de mesure (R et R) .....	72
3.2.3	Le théorème central limite (TCL).....	74
3.2.4	Test de normalités .....	74
3.2.5	Analyse d'aptitude d'un procédé .....	74
3.2.6	Les indices d'aptitudes.....	75
3.2.7	L'analyse de la variance (ANOVA) .....	82
3.2.8	Analyse multi varié graphique .....	84
3.2.9	Analyse de la régression .....	85
3.2.10	Les tests d'hypothèses.....	89
3.2.11	L'échantillonnage .....	90
3.2.12	Les cartes de contrôle.....	90
3.3	Synthèse de la sélection des outils .....	93
CHAPITRE 4 COMPARAISON DES COFFRES À OUTILS .....		95
4.1	Évaluation du coffre à outils simplifiés .....	95
4.1.1	Pondération des critères .....	95
4.1.2	Pondération des alternatives pour chaque critère.....	97
4.1.3	Équilibre de la préférence .....	98
4.1.4	Commentaires des experts .....	99
4.2	Sondage sur l'impression des étudiants .....	100
4.3	Évaluation des logiciels de soutien à la démarche.....	101
4.4	Comparaison des méthodologies par des études de cas.....	105
4.4.1	Étude de cas 1 : design d'expérience .....	105

4.4.1.1	Résolution classique du problème avec Statistica 8.0 .....	106
4.4.1.2	Résolution selon le coffre à outils simplifié .....	109
4.4.2	Étude de cas 2 : contrôle de procédé.....	112
4.4.2.1	Résolution classique du problème avec Statistica 8.0 .....	113
4.4.2.2	Résolution selon le coffre à outils simplifié .....	114
4.4.3	Étude de cas 3 : régression multiple .....	115
4.4.3.1	Résolution classique du problème avec Statistica 8.0 .....	116
4.4.3.2	Résolution selon le coffre à outils simplifié .....	118
4.4.4	Étude de cas 4 : ANAVAR .....	120
4.4.4.1	Résolution classique du problème avec Statistica 8.0 .....	121
4.4.4.2	Résolution selon le coffre à outils simplifié .....	122
4.5	Discussions sur les résultats et perspectives .....	123
CONCLUSION.....		126
ANNEXE I	QUESTIONNAIRE DE COMPARAISON DES COFFRES À OUTILS À L'INTENTION DES EXPERTS .....	128
ANNEXE II	QUESTIONNAIRE À L'INTENTION DES ÉTUDIANTS .....	131
ANNEXE III	GRILLE D'ÉVALUATION DES LOGICIELS DE SOUTIEN .....	133
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		135



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1      Anavar à un facteur .....	43
Tableau 2.2      Anavar à plusieurs facteurs .....	44
Tableau 3.1      Exemple de matrice des essais .....	78
Tableau 3.2      Exemple de matrice des effets .....	78
Tableau 3.3      Exemple de sommaire des sommes de carré des écarts .....	79
Tableau 3.4      Proportion des sommes de carré pour le modèle et l'erreur .....	81
Tableau 3.5      Confirmation de l'analyse visuelle par ANAVAR .....	82
Tableau 3.6      Jeu de données exemple ANAVAR.....	83
Tableau 3.7      Tableau ANAVAR.....	83
Tableau 3.8      Jeu de données exemple de régression.....	85
Tableau 3.9      Matrice de corrélation .....	86
Tableau 4.1      Évaluation des alternatives par les experts .....	97
Tableau 4.2      Résultat du sondage des étudiants.....	100
Tableau 4.3      Cas 1, matrice des essais avec Statistica.....	106
Tableau 4.4      Cas 1, matrice des effets avec Statistica .....	107
Tableau 4.5      Cas 1, matrice des essais méthode simplifiée .....	109
Tableau 4.6      Cas 1, proportion des sommes de carré .....	110
Tableau 4.7      Cas 2, données de base.....	112
Tableau 4.8      Cas 3, données de base.....	115
Tableau 4.9      Cas 3, coefficient de détermination .....	116
Tableau 4.10      Cas 3, coefficient des facteurs et intervalle de confiance .....	117

Tableau 4.11	Cas 4, données de base.....	120
Tableau 4.12	Analyse de la variance à un facteur .....	121

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Diagramme des causes de l'échec de la démarche Six Sigma.....23
Figure 1.2	Modèle d'évaluation AHP .....24
Figure 2.1	Étapes du design expérimental.....38
Figure 2.2	Facteurs pour un effet .....38
Figure 2.3	Probabilité normale des résidus .....46
Figure 2.4	Résidus et valeurs prédites.....47
Figure 2.5	Diagramme de stratification X-Y.....49
Figure 2.6	Charte multi variée.....51
Figure 2.7	Analyse à six graphiques .....57
Figure 2.8	Règles de contrôle de Shewart.....59
Figure 2.9	Diagramme conditionnelle pour un contrôle quantitatif.....60
Figure 2.10	Diagramme des outils de la formation Black Belt par objectifs .....62
Figure 3.1	Diagramme des types d'opérations .....65
Figure 3.2	Histogramme et boîte à moustaches d'un jeu de données .....67
Figure 3.3	Graphique de probabilité normale .....68
Figure 3.4	Histogramme et boîte à moustaches normale .....68
Figure 3.5	Exemple de graphique à barres .....69
Figure 3.6	Exemple de graphique secteur .....70
Figure 3.7	Prototype de graphique R et R simplifié.....73
Figure 3.8	Prototype contrôle quantitatif .....76
Figure 3.9	Diagramme d'éboullis des sommes de carré.....80

Figure 3.10	Graphique secteur de la répartition .....	81
Figure 3.11	Boîte à moustache multiple.....	84
Figure 3.12	Matrice de nuage de points .....	87
Figure 3.13	Graphique de corrélation.....	88
Figure 3.14	Prototype de carte de contrôle qualitatif .....	92
Figure 3.15	Diagramme des outils simplifiés par objectifs.....	93
Figure 4.1	Comparaison en paires des critères d'évaluation.....	96
Figure 4.2	Pondération des critères .....	96
Figure 4.3	Résultats de l'évaluation AHP .....	98
Figure 4.4	Équilibre de la préférence .....	98
Figure 4.5	Résultat normalisée de l'évaluation des logiciels .....	103
Figure 4.6	Cas 1, Diagramme de Pareto des effets .....	107
Figure 4.7	Cas 1, Analyse des résidus.....	108
Figure 4.8	Cas 1, Graphique des proportions des sommes de carré.....	110
Figure 4.9	Cas 1, Diagramme d'écoulement des sommes de carré .....	111
Figure 4.10	Cas 2, analyse de contrôle quantitative d'un procédé.....	113
Figure 4.11	Cas 2, analyse simplifiée du contrôle quantitatif.....	114
Figure 4.12	Cas 3, analyse des résidus.....	117
Figure 4.13	Cas 3, matrice de nuage de points.....	118
Figure 4.14	Cas 4, boîte à moustache multiple .....	122



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

LSS	Lean Six Sigma
SS	Six Sigma
BB	Black Belt
GB	Green Belt
MSC	Mindcore Service Conseil
TQM	Total Quality Management
DPU	Défauts par unité
DPMO	Défaut par million d'opportunités



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$\bar{x}$	moyenne échantillonnale
$s$	écart type échantillonnale
$s^2$	variance échantillonnale
$\mu$	moyenne d'une population
$\sigma$	écart type d'une population
$\alpha$	niveau de signification
$\beta$	niveau de risque



## INTRODUCTION

L'amélioration continue est un sujet d'actualité dans les entreprises. Que ce soit dans l'entreprise manufacturière ou de services, l'organisation est soucieuse de conserver ou d'accroître son avantage concurrentiel par l'entremise d'une organisation efficace. Depuis une centaine d'années, les principes du génie industriel n'ont pas cessé d'évoluer. Cette évolution a permis l'émergence de principes, techniques et philosophies pour devenir de plus en plus globale dans leurs approches. Aux deux pôles, nous avons le Taylorisme et aujourd'hui le Lean Six Sigma.

Avec l'arrivée de la production de masse, l'organisation du travail est devenue une discipline à part. Il était important de déterminer une cadence de travail pour suivre le rythme de la demande. Nous avons commencé par décortiquer le travail en tâches pour étudier les temps de production et déterminer des temps standards d'opérations. Par souci d'efficacité, tenter de réduire les mouvements inutiles pour utiliser les ressources humaines à leurs capacités complètes. Le Taylorisme a ouvert la porte à l'étude scientifique du travail. Cette philosophie s'applique essentiellement aux chaînes de montage et d'assemblage. D'ailleurs, Charles Chaplin en 1936 illustre bien ce principe de production dans son film « les temps modernes ».

Plus tard, nous avons voulu affiner ces méthodes en tentant d'augmenter la qualité du produit ou du service rendu aux clients tout en gardant les coûts de production à leur minimum. Cet objectif nécessite une approche plus globale, car ce n'est pas seulement la chaîne de montage qui doit être prise en compte dans l'étude. De plus, par la diversité des industries d'aujourd'hui, la qualité peut se mesurer de bien des façons différentes.

Le Lean Six Sigma (LSS) est une approche de gestion de projet d'amélioration continue très en vogue en ce moment. Elle cumule et combine une grande quantité du corpus des connaissances du génie industriel et de la gestion de projet. Elle fournit aux praticiens une

démarche holistique d'amélioration continue qui a pour but de réduire la variabilité associée aux processus de l'entreprise. Autrement dit, il ne s'agit plus aujourd'hui d'être seulement efficace sur notre chaîne de montage, mais bien aussi dans nos processus administratifs pour économiser des coûts à tous les paliers de l'entreprise et ce, peu importe le type d'entreprise.

Cette méthodologie est divisée, d'une part, en un volet organisationnel et un volet technique. Le volet organisationnel vise à instaurer les bonnes personnes aux bons endroits dans l'entreprise pour agir à titre d'agent de changement. Ils font la promotion des projets d'amélioration continue, les organisent et veillent à leurs bons déroulements. Tandis que le volet technique se définit par l'utilisation d'outils autant qualitatifs que quantitatifs pour mener à bien les projets d'amélioration continue. La démarche repose sur l'idée que nous pouvons améliorer ce que nous pouvons mesurer. Nous comprenons par cette idée de base que les outils quantitatifs contenus dans cette démarche prennent une place importante. Il s'agit essentiellement d'outils statistiques des plus simples aux plus complexes.

Détenir les connaissances de cette démarche dans toutes ses coutures est un atout majeur. Il suffit de regarder les offres d'emploi dans le domaine du génie industriel, de la logistique, de la gestion de la qualité ou encore en amélioration continue pour se rendre compte qu'elle fait l'objet d'une demande toujours grandissante.

L'acquisition de ces connaissances peut se faire par l'entremise de plusieurs organismes ou firmes de consultation, mais un seul est internationalement reconnu. L'American Society for Quality (ASQ) offre des certifications sur cette démarche. Il s'agit de cours intensif sur quatre semaines qui aboutissent à un examen pour l'obtention de la certification.

Le partenaire industriel associé à ce projet de recherche est aussi un spécialiste de la démarche LSS. Ils offrent eux aussi les formations qui visent à la préparation des examens de l'ASQ. Ils ont vu et vécu l'expérience de multiples entreprises vivant les succès et les échecs

de cette méthodologie. Bien que ces formations soient étalées sur plusieurs jours, le contenu peut se révéler trop dense pour une certaine partie de la clientèle, ce qui est constaté par notre partenaire industriel. Selon eux, le cas classique est qu'une personne ayant reçu la formation LSS retourne dans son bureau et se retrouve perdu devant la panoplie d'outils qui s'offrent à elle. De plus, cette personne est soumise à l'utilisation de logiciels de statistiques spécialisés qui offrent un très grand potentiel, mais qui ne sont pas sans peine.

Ces formations exigent une compréhension de concepts statistiques qui peut s'avérer un obstacle lors de la mise en application, car elles nécessitent parfois une connaissance accrue de la théorie générale des statistiques. Les clients soumis à ces formations ne sont pas toujours à l'aise avec les concepts montrés durant les formations. Ce qui engendre une démotivation face à l'utilisation des outils utiles à l'amélioration des processus et ainsi limiter grandement le potentiel de réussite de projets d'amélioration d'efficacité ou de qualité. Cette situation laisse une amertume autant pour le partenaire industriel que pour ses clients.

On observe une mauvaise rétention des connaissances lors de ces formations et nous déduisons alors que la démarche n'est pas utilisée à son plein potentiel. L'entreprise qui investit temps et argent pour former ses employés peut faire face à l'illusion qu'il s'agit d'une solution profitable et engendrer une perte de confiance envers la méthodologie.

Nous pensons qu'il serait plus profitable d'envisager un coffre à outils nécessitant une moins grande connaissance générale de la statistique de sorte que la rétention des connaissances soit plus grande. Le présent projet consiste à trouver un équilibre entre la science et le besoin de l'industrie. Le niveau de connaissances requis et l'utilité des outils. C'est à travers une synthèse du coffre à outils Six Sigma que nous trouverons comment les rendre plus simples. Nous proposerons un nouveau coffre à outils qui reposera sur des connaissances moins complexes en conservant au mieux le pouvoir de résolution de problèmes. Le but est de motiver davantage les intervenants à devenir des agents de changement. D'ailleurs, en

augmentant le bassin des agents de changements, l'entreprise favorise l'avancement d'une culture tournée vers l'amélioration continue (Québec, 2014).

Nous faisons l'hypothèse que le prototype du coffre à outils simplifié sera préférable pour permettre une meilleure intégration de la démarche à travers l'industrie tout en fournissant les résultats escomptés du coffre à outils classique.

Ce travail de recherche sera amorcé par une mise en contexte de la méthodologie Six Sigma (SS), son historique et ses critiques à travers une revue littéraire. Nous verrons ensuite le détail du coffre à outils classique basé sur le corpus de connaissance de la certification Black Belt (BB) de l'American Society for Quality (ASQ). Ceci nous permettra de faire le recensement des savoirs à acquérir et d'en comprendre la complexité. Cette base servira à la simplification du coffre à outils. Finalement, nous évaluerons la conception de cette simplification par la comparaison des deux coffres à outils.



## **CHAPITRE 1**

### **CONTEXTE ET REVUE LITTÉRAIRE**

L'amélioration continue devient de plus en plus la tâche de tout le monde. La part critique de l'innovation est l'investigation et alors la maîtrise de la pensée et des outils statistiques sera importante pour une grande quantité de professionnels. Les statistiques industrielles pourraient bien être au cœur de l'économie du savoir (De Mast et Does, 2010).

#### **1.1 Performance**

##### **1.1.1 Performance moyenne**

Les statistiques descriptives sont utilisées de manière intensive dans les entreprises. Il ne m'est jamais arrivé jusqu'à maintenant d'assister à une rencontre ayant comme sujet l'amélioration continue et qu'aucune valeur d'indicateur de performance ne soit présentée. La valeur la plus répandue est, évidemment, la moyenne. Mais la moyenne est aussi souvent mal utilisée, car elle doit être liée à la dispersion qui lui est associée. À l'extrême, si une entreprise mesure l'épaisseur de deux feuilles d'acier qu'elle produit : la première mesure 1.25 po et la seconde mesure 1.5 po. Il est vrai que la moyenne de ces deux mesures vaut mathématiquement 1.375 po, mais aucune feuille dans cet échantillon n'a réellement cette épaisseur. Un client désireux d'acheter cette dernière dimension ne l'obtiendra pas même si en moyenne c'est ce que l'entreprise produit. Nous voyons souvent des erreurs de gestion basée sur l'utilisation des moyennes. Celle qui a marqué l'industrie est certainement le flop de la compagnie Ford avec son modèle Edsel à la fin des années 50. Leur méthodologie a été d'interviewer 800 personnes et de faire la moyenne des caractéristiques voulues des consommateurs. Ils croyaient concevoir une voiture qui intéresserait tout le monde, mais finalement ça n'a intéressé personne (Stocken, 2011). Ce dernier exemple est certainement le

plus convaincant que l'illustration d'une moyenne n'est pas suffisante pour prendre des décisions. Il est important de comprendre la dispersion autour de celle-ci.

### **1.1.2 Méfaits de la variabilité**

C'est souvent ce qui peut coûter cher à une entreprise, car le client s'attend à un produit ou un service qui satisfait certains critères. La variabilité dans l'acheminement, la production, d'un bien ou d'un service vers le client peut faire en sorte que ses tolérances ne seront pas respectées. La variabilité dans la réponse des processus est reconnue comme le « démon » de l'entreprise et doit être surmontée ou du moins être prise en compte (Douglas, 2010). Nous comprenons alors qu'un client insatisfait demande plus d'attention. Dans le cas d'un service, il faudra peut-être lui rendre à nouveau ou du moins consacré du temps supplémentaire pour satisfaire les critères. Ce qui engendre des coûts pour l'entreprise et de la frustration pour le client. Dans le cas d'un produit dont les processus de fabrication sont variables, les produits finis ne seront pas tous de la même qualité. Encore une fois, un client désireux d'acheter un produit fait en série qui n'est pas identique à ses attentes ne sera pas satisfait. L'entreprise devra consacrer du temps supplémentaire pour travailler sur la pièce à nouveau. Deming disait souvent que s'il avait une chose à dire aux gestionnaires, il leur dirait de mettre l'accent sur la réduction de la variabilité (Douglas, 2010). En réduisant la variabilité, c'est immanquable, on accroît les profits.

## **1.2 Qu'est-ce que la méthodologie Six Sigma**

Nous entendons souvent que la méthodologie SS est une philosophie d'entreprise et ce n'est pas totalement faux. Il y a deux grands volets à cette méthodologie pour qu'elle soit efficace. Un volet technique qui vise la gestion de projets d'amélioration de la qualité. C'est dans cet espace que nous trouvons la séquence RDMAAC. Ainsi qu'un volet qui touche l'organisation de l'entreprise pour favoriser son amélioration continue. Dans ce dernier, nous

voulons une structure hiérarchique du personnel pour prendre en charge et supporter l'amélioration continue à tous les niveaux de l'entreprise. À travers cette structure, nous s'assurons que les initiatives d'améliorations soient supportées et encouragées par la direction et en adéquation avec les objectifs, les stratégies, les missions et la vision de l'entreprise. Voici une définition proposée par la littérature: « Définir la démarche Six Sigma en des termes simples n'est pas possible, car elle englobe une méthodologie de résolution de problème tout en optimisant la gestion du changement. Six Sigma accomplit ce but en utilisant une boîte à outils statistique et mathématique et définit une séquence d'application pour les utiliser et pour produire des résultats significatifs rapidement (Raisinghani et al., 2005) ».

Nous voyons clairement ces deux volets dans la définition ci-dessus, car l'optimisation de la gestion du changement passe par l'organisation de l'entreprise et la résolution de problème passe par le coffre à outils statistiques et la séquence d'utilisation RDMAAC. Pour que les outils et concepts statistiques soient utilisés efficacement, ils doivent faire partie d'un modèle de gestion basé sur l'amélioration continue (Douglas, 2010).

L'objectif fondamental de la méthodologie Six Sigma c'est l'implantation d'une stratégie de mesures qui met l'accent sur l'amélioration des processus et la réduction de la variabilité (Jiju, 2004), car la prémisse principale de cette démarche est que nous pouvons améliorer ce que nous pouvons mesurer. Autrement dit, l'entreprise doit se doter d'indicateurs de performance pour mesurer les variables qui sont susceptibles d'affecter la qualité de ce qu'il offre. Ces indicateurs doivent être liés avec ce que le client désire obtenir et doivent aussi être maintenus avec des seuils, des balises et des objectifs d'amélioration pour s'assurer que le client reste ou, encore mieux, soit davantage satisfait.

La variabilité est l'étendue autour d'une valeur cible d'un indicateur de performance. Le but de cette méthodologie est de réduire le plus possible cette étendue de sorte que notre produit ou service atteigne les valeurs cibles des indicateurs de performance le plus fréquemment

possible. De cette façon, les clients reçoivent de la qualité et par conséquent, moins de dépense est occasionnée par l'entreprise pour la livrer. Ultimement, Six Sigma signifie que l'entreprise vise à produire moins de 3.4 défauts par million d'opportunités. Un défaut est défini comme n'importe quoi qui mène à l'insatisfaction de la clientèle (Jiju, 2004).

### **1.2.1 Historique**

En 1922 Walter Shewhart a introduit les limites de contrôle de valeur trois sigmas pour la variation des biens produits. Ce qui correspond à 99.973% de pièces de qualité ou encore 2600 défauts par million d'opportunités (DPMO). Shewhart explique qu'une intervention sur le processus est nécessaire lors que nous dépassons cette limite. Cette limite de qualité était suffisante pour la plupart des organisations jusqu'au début des années 80. C'est avec l'arrivée des composantes électroniques miniatures que cette limite n'était plus acceptable. Ces composantes produites en énorme quantité étaient destinées à être introduites comme sous assemblage dans les télévisions, les radios, etc. De plus, l'ouverture des marchés mondiaux a permis aux Américains de comprendre que le Japon pouvait produire ces mêmes pièces avec un niveau de qualité supérieure à un moindre coût (Raisinghani et al., 2005). Autrement dit, le Japon devenait un fournisseur plus intéressant. Heureusement pour Motorola, ils ont réagi en revoyant le système de gestion de la qualité. Au départ, c'est eux qui ont fondé la méthodologie en lui attribuant un nom et en classifiant les outils par phase de projet DMAAC. Toutefois, ce travail aurait été impossible sans la contribution des auteurs qui ont pensé à ces outils. Un des pères de la science de la qualité, Joseph M. Juran, a qualifié cette méthodologie comme peu originale. Il n'y a rien de nouveau, c'est simplement enrobé de différentes couleurs. Le terme Six Sigma renvoie au calcul du niveau d'aptitude d'un procédé et j'en ai été l'inventeur en 1926 (Paton, 2002). En fait, ce qui a été de nouveau avec cette méthodologie ça a été d'y mettre un peu d'ordre. D'explicitier une séquence d'utilisation et une classification des outils dans des phases de projets d'améliorations. De plus, l'orientation que l'entreprise entière doit prendre vers l'amélioration continue en instaurant des rôles aux

employés sont des concepts qui ont été éclaircis. Par contre, la grande majorité des outils contenue dans la méthode est un rassemblement du corpus littéraire du domaine de la qualité depuis la Première Guerre mondiale. Quoi qu'il en soit, c'est en 1986 que Bob Galvin (président chez Motorola) a décidé d'accroître le niveau de qualité de ses produits en ayant comme objectif 99.9997% de non-défaut. Ce qui correspond à une probabilité de six longueurs d'écart type de chaque côté de la moyenne d'une fonction de densité gaussienne centrée réduite. Il a fondé dans l'entreprise un système de mesure des performances pour les différentes hiérarchies pour contrôler les objectifs. À ce moment, Dr. Mikel Harry faisait des recherches pour la compagnie pour redéfinir et propager dans l'entreprise l'amélioration continue (Harry, 2004). Ce dernier aura été l'architecte de la démarche sous la supervision de Bob Galvin. Les succès de Motorola ont attiré l'attention d'autres compagnies qui les enviaient et ainsi, la démarche s'est propagée durant les années 90 dans d'autres grandes compagnies qui ont connu des succès comme General Electric par exemple.

### 1.2.2 Spécificités

Depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale plusieurs gurus du domaine de la qualité ont mis des noms sur leur méthode de gestion de la qualité. Entre 1951 et 1956, Feigenbaum aurait été le premier à utiliser le terme « *total quality control* » (TQC). Sa définition inclut la gestion de la qualité dans le développement du produit, la maintenance et les efforts d'améliorations. Il pense que la qualité doit être prise en compte à partir du développement du produit jusqu'à la réception de ce même produit dans les mains du client (Angel, Frank et Barrie, 1998). Un peu plus tard, Ishikawa parle plutôt de « *company wide quality control* » (CWQC). Ce qui étend les concepts de gestion de la qualité à l'entreprise entière, car cet auteur croit que tous les départements doivent travailler ensemble pour réussir à satisfaire leur clientèle. Sa définition prend en charge le développement, le design, la production, le marketing ainsi que les services offerts aux clients (Ishikawa, 1990). D'autres gurus comme Deming et Juran qui ont fortement contribué à l'expansion des concepts avec leurs voyages au Japon avaient aussi leurs définitions. Toutes les définitions des grands penseurs sur le

sujet sont considérées comme des variantes du « total quality management » (TQM) (Angel, Frank et Barrie, 1998). En ce sens, il est difficile de comprendre de manière limpide ce qu'est le TQM. Une définition internationale universelle a été admise par ISO en 1994 : Le TQM est une stratégie globale de management à long terme dans laquelle tous les membres de l'organisme participent à l'intérêt de l'organisme lui-même, de ses membres, de ses clients et de la société considérée dans son ensemble (Organization, 1994).

Le TQM a formellement fait son entrée durant les années 80 un peu avant ou presque en même temps que SS, mais il repose sur des concepts et définitions différentes établies, et retravailler depuis au moins vingt ans auparavant. Toutefois, même si le TQM et le SS reposent sur des principes comparables SS se distingue de plusieurs façons :

- Dr Rick L. Edgeman explique qu'il peut sembler difficile de dire clairement que ceci est TQM et cela est Six Sigma. Par contre, la rigueur de la structure de la démarche dont laquelle est doté Six Sigma est un aspect important qui sépare les deux approches. De plus, une autre caractéristique est l'habileté de Six Sigma d'intégrer, de coordonner logiquement les outils, techniques et stratégies qui sont couramment utilisés de manière isolée dans le progrès de DMAAC (Jiju, 2009). Six Sigma n'est pas un remplacement de la méthode TQM, mais accent davantage sur la structure de la démarche (Pepper et Spedding, 2010).
- Dr Roger Hoerl pour sa part explique que Six Sigma emprunte beaucoup à TQM, mais corrige aussi plusieurs lacunes comme le manque d'orientation financière, le manque de ressources dédiées, une sélection de projets sans coordination et l'utilisation de n'importe qui est disponible pour faire les projets (Jiju, 2009). Selon un autre auteur, dans la même veine, Six Sigma égale TQM avec un plus grand accent sur le client, plus d'outils d'analyse, plus axée sur les résultats financiers et intégrant la gestion de projets (Mehrerdi, 2011).

- Amitiva Mitra, quant à elle, explique que normalement dans les projets Six Sigma il y a un chef d'équipe disons un Black Belt ou encore un Champion qui sert de lien avec le conseil d'administration ce qui n'était pas nécessairement le cas avec TQM. La chance de l'engagement des patrons, de la complétion et la bonne implantation des projets est améliorée avec Six Sigma (Jiju, 2009). Une grande partie du succès de SS correspond à son agilité d'ajouter une couche de communication entre les différents paliers de l'entreprise (Abdolshah et al., 2009).

En 1997, une étude a été réalisée auprès des firmes de consultation pour statuer sur l'efficacité du TQM. Au mieux, le tiers des entreprises aux États-Unis et en Europe ayant adopté un programme TQM ont obtenu un résultat tangible significatif (Andersson, Eriksson et Torstensson, 2006). Selon eux, les échecs de la démarche seraient, en grande partie, causés par la définition trop vague de ses concepts. Selon ce que nous venons de citer, SS semble être une évolution du TQM même si les deux approches viennent sensiblement du même moment dans l'histoire.

#### **1.2.2.1 Axée sur les résultats financiers**

La démarche SS se base sur des mesures à partir desquelles, il est possible de tirer des estimations. Nous avons besoin de suffisamment de données pour décrire les phénomènes avec précision (Douglas, 2010). Cette prémisse nous permet alors d'utiliser tout l'aspect calculatoire de SS. Un projet utilisant cette démarche est complètement justifiable avec les théories financières de la gestion de projet. C'est-à-dire que lors qu'une initiative est trouvée, nous pouvons justifier la raison d'être du projet par des économies potentielles pour l'entreprise et la rigueur de la démarche exige que l'on estime, dans la phase de définition, les bénéfices escomptés avant de commencer un projet. De nombreuses compagnies (manufacturières, services, petites et grandes) autour du globe ont implanté SS et ont atteint de remarquables améliorations de leur part de marché, la satisfaction de la clientèle, la fiabilité de leurs produits, la qualité de leur service, etc. avec d'impressionnantes économies

financières (Jiju, 2009). D'ailleurs, cette rigueur financière est une des forces de la méthodologie, car le but est de laisser, le moins possible, d'éléments au hasard, mais plutôt d'avoir une bonne estimation des risques que nous prenons.

#### **1.2.2.2 Axée sur la réduction de la variabilité**

Effectivement SS met l'emphase sur la livraison des caractéristiques que le client souhaite. La méthode consiste, à la base, d'écouter le client et de comprendre ce qu'il veut. Ensuite, lui livrer avec le moins de défauts possible. Un défaut, dans ce contexte, peut être vu comme un écart à la demande d'un client.

C'est que SS requiert un contrôle de la production et par conséquent, des mesures de caractéristiques des produits. Ces mesures sont comparées à un objectif et ainsi nous jugeons si la caractéristique est acceptable pour le client. L'amélioration continue par SS, tente de rapprocher, réduire l'écart, entre ces valeurs mesurées et les objectifs. De manière plus générale : l'accent associé à la méthodologie Six Sigma est de comprendre les entrées (x) qui ont le plus grand effet sur les sorties (y) et de contrôler ces entrées de sorte qu'il soit à l'intérieur des spécifications pour que le produit final soit de qualité aux yeux du client (Mehrerdi, 2011).

Cette particularité, plutôt abstraite, permet à SS de s'étendre à tous les types d'industries. La démarche SS s'est rependue à travers l'industrie manufacturière, mais elle est peut être utilisée dans tous les autres types.

Selon (Mehrerdi, 2011), les objectifs souvent associés à cette démarche sont :

- L'amélioration des délais de livraison;
- Réduction du temps de cycle associé à l'embauche et à la formation de nouveaux employés;



- Amélioration de la logistique;
- Amélioration de l'habilité des prédictions de ventes;
- Amélioration de la qualité du service à la clientèle.

### **1.2.3 Évolution vers le Lean Six Sigma**

La démarche Lean ne possède pas les outils pour réduire la variation et fournir un contrôle statistique des processus. Par ailleurs, la méthodologie SS ne fait pas le lien entre la qualité de la sortie et la rapidité d'exécution d'un processus (Delgado, Ferreira et Branco, 2010).

Après l'introduction du Lean, les outils sont devenus plus qualitatifs que quantitatifs afin d'être plus faciles à utiliser et prendre moins de temps à comprendre (Delgado, Ferreira et Branco, 2010). Les outils du Lean ont été développés fondamentalement avec un point de vue qualitatif se basant sur des années d'expérience. Le rôle de SS est de comprendre en détail ce qui se passe réellement à l'intérieur des étapes du processus (Jiju, 2011).

Les deux démarches se complètent, car le Lean permet d'éliminer les gaspillages et favorise la standardisation et SS permet d'identifier la variation pour la réduire (Pepper et Spedding, 2010). Ensemble, le Lean et le SS offrent des outils d'analyse et une méthodologie qui permet d'éliminer le gaspillage et de prévenir les défauts (Monnot, 2004). Le Lean met l'accent sur l'efficacité en ciblant la production de produits ou services au moindre coût et le plus rapidement possible (Jiju, 2011).

L'ajout du Lean au SS est une approche holistique à l'amélioration des processus de l'industrie en mélangeant différents niveaux d'employé, avec des compétences différentes, pour gérer et améliorer les processus au jour le jour (Jiju, 2011). L'application des outils et techniques Lean permet d'identifier des opportunités qui pourraient être davantage améliorées avec la démarche Six Sigma. Mais il n'existe pas de démarche standard du LSS et donc, la compréhension de la démarche n'est pas nécessairement bien comprise. De plus, il

n'y a pas de direction claire, et les utilisateurs ne savent pas quelle stratégie appliquer au début d'un projet (Pepper et Spedding, 2010).

Aligner ensemble l'aspect culturel du Lean avec l'investigation par les données du SS retient un énorme potentiel pour une approche authentique et durable pour la gestion du changement et l'amélioration des processus de l'entreprise (Pepper et Spedding, 2010).

Nous parlons souvent aussi de Design For Six Sigma (DFSS). Il s'agit ici de prendre en compte la voix du client dans le cycle de conception du produit ou du service. La voix du client est obtenue à partir d'entretiens, par interactions directes, par observations des clients, réunions, sondages ou encore avec l'analyse de la satisfaction de la clientèle. Le but est de développer au début du processus de conception une série d'indices de qualités requises pour satisfaire la clientèle (Douglas, 2010).

#### **1.2.4 Distinction entre l'entreprise manufacturière et de service**

Dans les entreprises de service, la qualité est définie comme une valeur de satisfaction de la clientèle (Raisinghani et al., 2005).

Facteur commun à tous les services : Temps d'attente du client, le nombre d'appels nécessaire pour résoudre un problème, les connaissances et les services en place pour aider les représentants à fixer les problèmes du client (Raisinghani et al., 2005).

Les informations qui circulent à travers l'industrie manufacturière ne sont simplement pas le même genre dans l'industrie de service (Abdolshah et al., 2009). Le secteur des services traite plus d'entités intangibles comme le service à la clientèle par exemple. Fournir l'assistance nécessaire pour établir une bonne relation avec son client en tentant d'avoir une communication efficace pour satisfaire ses attentes est difficile à mesurer (Tjahjono et al.,

2010). Le problème récurrent de l'entreprise de service est de comprendre quoi et comment mesurer. Il est important de s'assurer que la caractéristique assujettie à une mesure soit critique pour améliorer la satisfaction du client et le niveau de qualité du service (Jiju, 2006).

La littérature concernant l'application de SS dans les industries service s'est grandement accrue comparativement à l'usage dans l'industrie manufacturière. En 2004, 20% de la littérature sur le sujet concernait les industries de service. En 2009, il s'agit de 40% (Tjahjono et al., 2010).

Plusieurs industries de services réalisent des gains significatifs en utilisant les outils les plus simples (Jiju, 2006). C'est-à-dire, le diagramme de Pareto, l'analyse de cause à effet, la cartographie de processus, etc. Selon Ishikawa, les outils les plus simples permettent de régler au moins 80% des problèmes rencontrés dans le domaine de la qualité et de l'amélioration de processus (Jiju, 2006).

### **1.2.5 Structure hiérarchique typique**

Nous pouvons reconnaître une entreprise qui intègre SS si, entre autres, des employés portent un titre qui rappelle une ceinture de kung-fu. Ces différents titres représentent la hiérarchie des employés qui travaillent à accroître la qualité. Cette hiérarchie sert aussi à s'assurer que la chaîne d'objectifs qualité soit intégrée des demandes clients jusqu'aux missions de l'entreprise et vice versa. Ce qui favorise l'initiation de projets d'améliorations à partir de n'importe quel endroit dans cette chaîne : À n'importe quel niveau hiérarchique de l'entreprise. En gestion de projets, nous parlons du mixte des approches ascendante et descendante. Cette dernière permet à la direction de sélectionner des projets qui serviront à se rapprocher de la vision de l'entreprise (long terme) et l'approche ascendante, quant à elle, vise plutôt des objectifs opérationnels (court et moyen terme). Généralement, trois titres sont utilisés : Master Black Belt, Black Belt et Green Belt en ordre hiérarchique. Par contre, dépendant de la grandeur de l'organisation, nous pouvons trouver d'autres types de

spécialiste : Champion, RedBelt, YellowBelt etc. Les trois principaux titres seront détaillés dans la prochaine section.

### **1.3 Critique envers la méthodologie Six Sigma**

#### **1.3.1 La science et les besoins de l'industrie**

Quelques opportunités de recherche intéressantes sur la démarche SS sont explicitées dans cet article (Jiju, 2004):

- Le coût initial pour démarrer l'approche Six Sigma dans une entreprise peut être significatif. Ceci peut décourager les petites et moyennes entreprises d'entreprendre une telle initiative.
- SS peut devenir un exercice bureaucratique si l'emphase est sur le nombre de Black Belt entraîné, le nombre de projets complétés, etc. au lieu d'avoir l'accent sur l'économie globale.
- Il y a une survente de la démarche SS de la part des firmes de consultation. Une partie d'entre elles déclare détenir l'expertise quand en réalité, ils comprennent à peine les outils, les techniques ainsi que la démarche.

Cette critique est particulièrement importante au Québec, car plus de 95% des entreprises sont soit petites ou moyennes (Canada, 2012). Ces petites entreprises auraient tout avantage d'instaurer cette culture d'amélioration durant leur premier instant de croissance. D'ailleurs c'est ce qui pourrait leur permettre un avantage concurrentiel. Une étude élaborée en Allemagne sur les PME montre que la grande majorité d'entre elles pense que la démarche doit nécessairement être plus simple pour s'adapter à la réalité des petites entreprises. Mieux vaut, selon eux, amener une culture de changement avec une grande quantité d'employés qui

sont au courant d'une démarche d'amélioration plutôt que d'avoir des spécialistes de la statistique. Près de 80% des entreprises répondantes dans ce sondage ont répondu qu'une formation plus simple et plus rapide serait mieux adaptée à leur besoin qu'une formation classique (Wessel et Burcher, 2004). La démarche Six Sigma a vu le jour par l'utilisation de la statistique et les penseurs à l'origine des outils sont généralement des statisticiens (Kwak et Anbari, 2006). Il est évident que les spécialistes de la statistique seront toujours excellents pour résoudre des problèmes qui exigent des analyses complexes, mais ils ne seront jamais assez nombreux dans une entreprise pour amener une culture de changement. Une entreprise d'une centaine d'employés qui fabrique des portes et fenêtres n'engagera jamais trente statisticiens pour amener une culture de changement. À moins de vouloir développer une expertise en statistique : ce qui sera stratégiquement surprenant. C'est à travers le travail de tout un chacun que cette culture doit être amenée et pour ce faire, plus d'employés, qui ont tous des bagages de savoirs différents, doivent avoir accès à une formation leur permettant de développer leurs pensées dans le sens de l'organisation du travail. Certains employés ne possèdent pas les connaissances nécessaires pour comprendre et utiliser les outils mathématiques et statistiques inclut dans cette démarche ce qui les mène à être démotivés (Delgado, Ferreira et Branco, 2010). De plus, la méthodologie SS comme on la connaît aujourd'hui accorde une importance excessive à l'usage des statistiques et cette importance limite les bénéfices potentiels que les utilisateurs peuvent en tirer (Gupta et Sri, 2007). Il semble avoir un déséquilibre entre le niveau scientifique de la démarche et les besoins de l'industrie.

De plus, la grande variété d'outils contenus dans la démarche peut être un obstacle lors de la sélection pour en faire l'usage approprié (Delgado, Ferreira et Branco, 2010). Cette critique montre bien que l'enseignement du coffre à outils est défaillant, car une personne expérimentée ne pourrait pas s'exprimer ainsi. Au contraire, quelqu'un qui détient une grande connaissance du coffre à outils trouvera des situations particulières qui mériteraient l'ajout d'un outil au coffre. La grande variété d'outils et de techniques comprise dans la démarche SS est une richesse, mais qui compromet son utilisation en la rendant complexe.

Une sélection des outils et techniques essentielles robustes devrait être faite pour démocratiser la démarche (Tjahjono et al., 2010). À travers ce même article, plusieurs auteurs constatent qu'il n'existe pas de procédure standard qui permet à l'utilisateur de choisir un outil ou une technique selon un contexte spécifique ce, qui dans plusieurs cas, sème la confusion et réduit la chance de succès. Encore une fois, cette critique montre le manque de connaissance : Il ne peut pas y avoir de procédure standard simple et claire, car le nombre d'outils est grand et plusieurs d'entre eux ont des objectifs de résolution comparable. Pour un problème donné, un analyste pourrait décider de tracer des boîtes à moustaches et de les comparer, un autre pourrait faire une analyse de variance ou encore ajouter une strate de donnée et faire une charte multi variée, etc. Il existe des tableaux qui facilitent la décision par exemple pour choisir quel test d'hypothèse utiliser et encore quelle carte de contrôle, etc., mais l'analyste pourrait aussi recueillir des données dans un format lui permettant une analyse différente. La décision du choix d'un outil pour une situation particulière repose sur la logique, mais aussi sur la créativité de l'analyste. Nous avons déjà une procédure standard qui permet un choix logique des outils à utiliser pour un projet SS : il s'agit des phases DMAAC à l'intérieur desquels des outils sont proposés. Pour la partie créative, il faut se fier à l'expérience de l'analyste. Comme la critique le suggère, la façon la plus plausible pour limiter la confusion due au grand nombre d'outils serait d'en faire une sélection et de limiter le choix en fonction des objectifs de résolution.

### **1.3.2 Les rôles, le savoir et les enjeux éducationnels**

Typiquement dans la hiérarchie des spécialistes SS nous retrouvons trois niveaux de ceinture généralement reconnue. Au plus haut niveau, nous retrouvons le Master Black Belt qui fait la sélection de projets, entraîne et supporte les Black Belt dans leurs projets. De plus, ils s'assurent que l'organisation soit gérée par des mesures aux différents niveaux hiérarchiques. Ils développent cette structure de mesure. Ce titre est de haut niveau dans une organisation et généralement, il y en a un seul par organisation (dépendant de la taille, des branches,

départements, etc.). Sous eux, nous retrouvons les Black Belt qui sont les spécialistes de la gestion de projet d'amélioration continue. Ce sont eux qui sépareront les projets en phases, constituera les besoins pour le projet, exécutera les analyses en plus d'instaurer les changements. Ils seront aidés par les Green Belt pour exécuter le projet. Ces derniers sont habilités avec les connaissances générales d'amélioration continue, mais n'ont pas une formation statistique aussi complète qu'un Black Belt. Un employé ayant un titre Green Belt ne travaille pas toujours sur des projets d'améliorations de processus. Souvent, il s'agit d'une partie de son travail, une tâche secondaire. Tandis que le Black Belt s'y consacre à temps plein. Un résumé des différentes ceintures, selon l'ASQ, peut être retrouvé à cette référence (ASQ, 2014).

Généralement, ce sont les BB à qui nous accordons le plus de crédits pour générer de grandes économies à l'entreprise (Ingle et Roe, 2001; Klefsjö, Wiklund et Edgeman, 2001). Ils ont une connaissance plus complète des outils d'amélioration et qu'ils sont ceux qui exercent à temps complet les projets d'améliorations du début à la fin. Un coffre à outils simplifié devrait alors se baser sur leur corpus de connaissance pour former des gens capables d'exécuter ces types de projets de manière complète. L'ensemble des savoirs requis d'un BB est plutôt imposant (ASQ, 2007). Si chaque BB maîtrise tout ce qui est dans ce corpus de connaissance, il est certainement bien outillé et les outils statistiques rigoureux peuvent être efficaces pour comprendre mieux les processus, mais ils entraînent aussi une peur de la méthodologie pour les utilisateurs et ceci peut être un frein important pour élaborer l'initiative (Nonhaleerak et Hendry, 2008). La formation nécessaire pour détenir une certification demande un effort important et ceci peut aussi être une entrave à la motivation des futurs agents de changement (Kumar et Antony, 2009). Est-ce que cet imposant corpus de connaissance est vraiment nécessaire? Sachant, en plus, que les projets d'améliorations ne requièrent pas souvent l'utilisation d'outils statistiques rigoureux (Richard M. Franza, 2009). De plus, notre partenaire industriel constate une mauvaise rétention des notions à la suite de l'enseignement d'une certification BB. Ils vivent la même situation qu'explicitée dans la littérature.

D'ailleurs, il ne faut pas croire qu'en quatre semaines de formation un employé sera prêt à faire de grandes améliorations. D'un point de vue cognitiviste, la hiérarchie des savoirs se constitue en trois niveaux : déclaratif (la théorie nécessaire), procédural (l'application de la théorie pour résoudre un problème) et conditionnel (reconnaitre quelle procédure utiliser dans un contexte précis) (Barbeau, Montini et Roy, 1997). Or, un BB qui amène rapidement des améliorations dans une entreprise maîtrise non seulement la théorie et les procédures de résolution, mais aussi savoir quel(s) outil(s) et dans quel contexte. Ce dernier niveau de savoir requiert beaucoup d'expérience pratique et c'est seulement une fois rendu à ce niveau que nous pouvons être efficaces comme analyste.

Une étude réalisée par différentes universités du centre de la Floride en collaboration plusieurs partenaires industriels montre l'importance de l'éducation de la démarche LSS. À travers, une analyse Delphi, l'université a produit une liste de ce qu'on attend des futurs ingénieurs industriels. Les trois premiers résultats classés en ordre d'importance sont consécutivement : le comportement éthique, la démarche SS et les concepts de l'entreprise Lean (Hamidreza et al., 2007). Ceci montre bien l'importance accordée à la démarche vis-à-vis les entreprises. Il est aussi plausible que la formation d'un ingénieur industriel intègre l'utilisation des outils statistiques, car cette formation s'échelonne sur plusieurs années, mais nous ne pouvons pas espérer qu'un employé soit autant efficace qu'un ingénieur en quatre semaines de formation intensive sur les outils statistiques.

Le Dr Andrew Thomas et Dr Phil Rowe expliquent durant une discussion sur les différences entre le Lean et le SS que problème éternel de la démarche SS est qu'elle est hautement analytique. Par conséquent, il faut plusieurs années d'entraînement avant de pouvoir l'appliquer de manière efficace (Jiju, 2011). De nombreuses entreprises l'ont appris à leur dépend : Dans plusieurs cas, lorsque l'application de SS n'atteint pas son potentiel dans une organisation, ce n'est pas la démarche en soit qui devrait être remis en cause, mais plutôt



l'acquisition et l'assimilation que l'organisation détient du savoir requis pour l'utiliser (McAdam et Hazlett, 2010).

Les outils doivent être utilisés pour entraîner des améliorations. Il serait inefficace de s'en servir pour le souci de les utiliser (Richard M. Franza, 2009). Un aspect important à long terme est plutôt d'amener une culture d'amélioration au lieu d'avoir un érudit de la méthodologie. C'est à travers cette culture que les spécialistes s'amélioreront eux-mêmes (Arumugam, Antony et Kumar, 2013).

### **1.3.3 La démarche et les enjeux organisationnels**

La démarche SS ne se limite pas à quelques améliorations locales, mais aussi à instaurer une culture orientée constamment vers l'amélioration. Il serait faux de croire que l'embauche d'un BB est suffisante. Ce dernier doit être aidé par d'autres employés sous lui et supporté par ses patrons. Un grand danger est de croire que SS est une solution instantanée qui permet de résoudre tous nos éternels problèmes (Jiju, 2004). D'ailleurs, une des raisons qui fait en sorte que plusieurs programmes SS échouent est qu'un manque de compréhension existe dans la direction et la gestion de son implantation (Richard M. Franza, 2009). Cette connaissance insuffisante fait en sorte que la direction n'est pas en mesure d'appuyer et de soutenir le projet d'intégration fermement (Abdolshah et al., 2009). Les auteurs sont unanimes sur le fait que l'implantation de cette méthodologie doit au préalable être soutenue par la haute direction, car c'est eux qui lanceront une telle initiative et traiteront le changement de la culture organisationnel (Abdolshah et al., 2009; Delgado, Ferreira et Branco, 2010; Richard M. Franza, 2009; Ronald, 2010; Tjahjono et al., 2010).

Pour promouvoir et propager l'amélioration continue dans l'entreprise des employés sont nommés aux différents paliers : opérationnel, tactique et stratégique pour suivre les formations GB, BB et MBB ce sont eux qui gèreront, en cascade et à plus petite échelle, les changements dans les processus et méthodes de travail. Pour une implantation véritable de

SS tous les départements doivent être impliqués pour qu'une culture générale de changement se propage et qu'une connaissance entière de l'entreprise se partage (Tjahjono et al., 2010).

Selon (Mehrjerdi, 2011), les points suivants doivent être encouragés pour que l'entreprise soit soucieuse de favoriser avec succès la propagation de l'amélioration continue dans son organisation.

- Les employés doivent comprendre que la qualité livrée est une part du travail de chacun. Ils doivent être prêts à suivre des formations, à comprendre et à appliquer;
- La qualité n'est pas un discours, ce sont des actions concrètes;
- Motiver ses employés à perfectionner ses connaissances sur le sujet;
- Les employés doivent suivre des formations sur l'usage de techniques statistiques de la démarche Six Sigma;
- Permettre aux employés clés de participer à des séminaires sur la qualité;
- Permettre aux employés de faire les cours Green Belt, Black Belt et Master Black Belt.

#### **1.4 Synthèse des enjeux et orientation du travail**

Nous pouvons tirer de la littérature les causes potentielles des échecs de la démarche SS. Le diagramme de causes à effet à la page suivante (figure 1.1) montre une synthèse des enjeux expliqués dans la section 1.3.

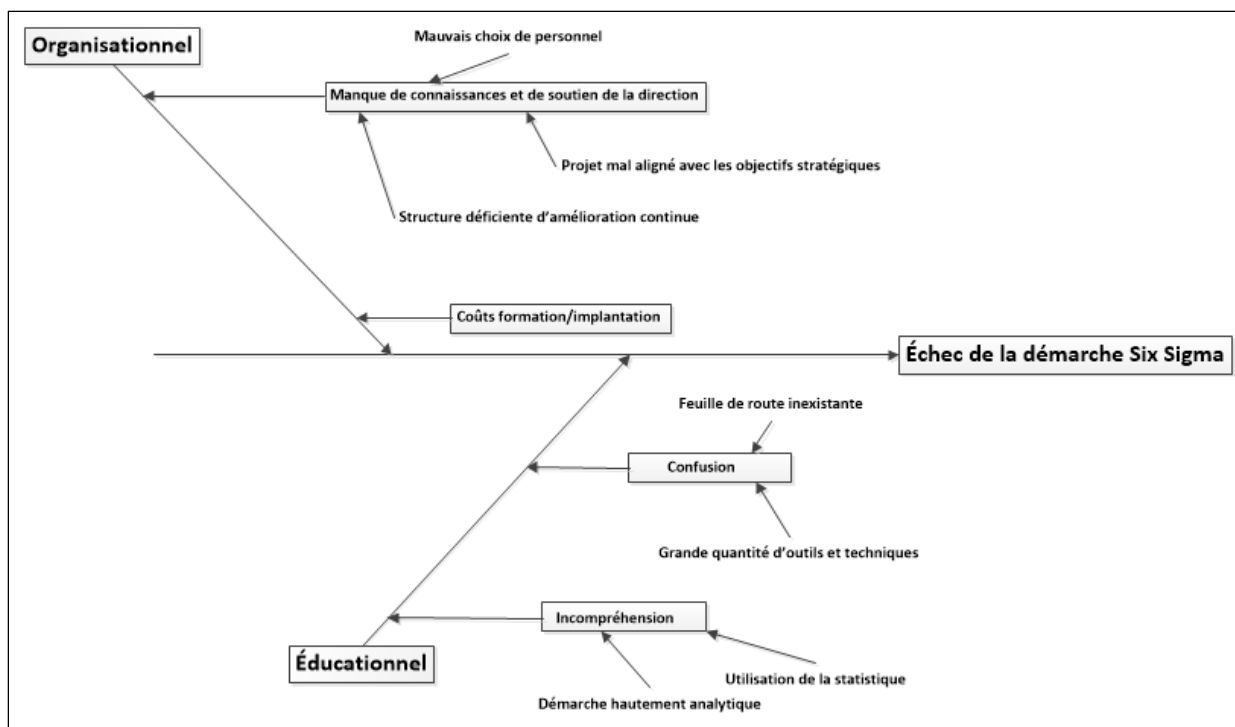


Figure 1.1 Diagramme des causes de l'échec de la démarche Six Sigma

Ce travail porte sur l'amélioration du coffre à outils en ce qui concerne les enjeux éducationnels. Nous voulons concevoir un coffre à outils simplifié qui comprendra moins d'outils. Ce qui permettra plus facilement de se retrouver lors que nous devons faire un choix pour une analyse. Ainsi la confusion liée à la sélection des outils devrait être réduite. Nous voulons aussi tenter d'éliminer l'utilisation de la statistique pour rendre la démarche accessible à un plus grand nombre de travailleurs. Il est évident que la compréhension sera augmentée si les concepts sont plus simples. Du coup, la rétention des connaissances sera nécessairement plus grande et, par conséquent, l'application des techniques aussi. D'ailleurs, un coffre à outils simplifié permettra certainement d'obtenir des gains en ce qui concerne les causes organisationnelles, car si les formations sont plus simples, elles peuvent prendre moins de temps et coûtent alors moins cher. De plus, si davantage d'employés y ont accès, la culture d'amélioration devrait s'instaurer plus facilement et l'entreprise fera face à une résistance aux changements moins grande. Par contre, ce travail ne porte pas sur l'aspect organisationnel même si des conséquences peuvent être constatées.

## 1.5 Méthodologie

Le but de cette méthodologie est d'indiquer si le coffre à outils simplifié semble prometteur à l'intégration dans une formation en entreprise. Ceci constitue l'étape avant de monter une formation et de l'enseigner. Nous voulons savoir s'il vaudrait la peine d'aller plus loin avec ce le coffre à outils proposé. Ce travail est un prototype dans le but d'explorer une voix qui permet une alternative à l'utilisation rigoureuse de la statistique.

Nous avons établi trois éléments de comparaison qui découlent des causes d'échecs présentées à la figure 1.1. Il s'agit du temps de formation, de la facilité de compréhension des concepts et de la facilité de sélection d'un outil. Nous avons ajouté un quatrième élément qui est le compromis sur la capacité à résoudre des problèmes. Nous savons que le coffre à outils simplifié sera moins puissant en termes de résolution de problème, mais globalement est-il préférable quand même?

Nous voulons répondre à cette question en évaluant nos quatre critères par l'entremise de la structure par pondération hiérarchisée (AHP) suivante :

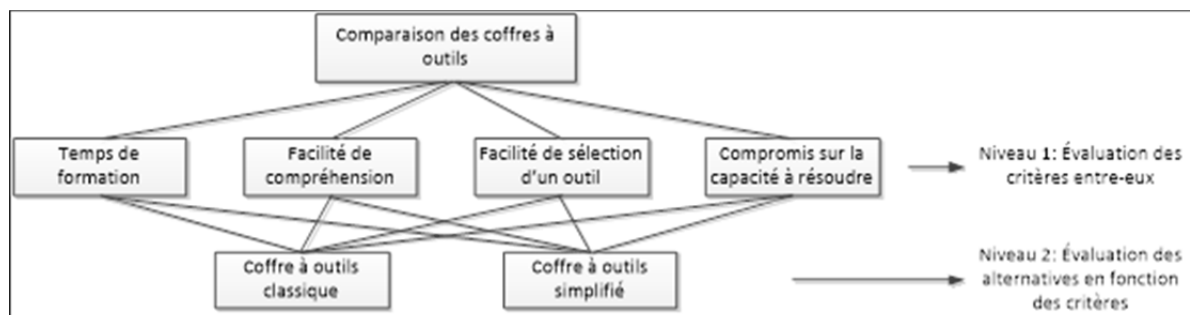


Figure 1.2 Modèle d'évaluation AHP

Les pointages de pondération pour le premier niveau sont établis par priorisation des critères (détail au chapitre 4). Tandis que le deuxième niveau est évalué par un panel d'expert. Ce

dernier est composé de quatre experts qui ont une connaissance accrue de l'application et aussi de l'enseignement de la méthodologie SS :

- Sylvia Gilbert ing., CSSBB, conseillère et associée principale chez Mindcore conseil;
- Michel Rioux ing., Ph. D. professeur et directeur du programme de génie des opérations et de la logistique;
- Sylvain Tétrault M.ing, spécialiste en amélioration continue chez Bombardier Aéronautique;
- Mickaël Gardoni Ph.D. professeur au département de génie de la production automatisée.

Ces quatre experts se qualifient par leurs expériences de travail et d'enseignement de la méthodologie SS. Chacun de ces experts a assisté à la même présentation d'une durée d'environ deux heures portant sur la comparaison du coffre à outils classique et du coffre à outils simplifié. La présentation ainsi que les chapitres 2 et 3 de ce mémoire leur ont été laissés en référence pour compléter leur évaluation des alternatives en fonction des critères par un questionnaire (disponible à l'annexe 1). Les résultats des préférences trouvées et l'analyse qui en découle sont explicités à la section 4.1.

De plus, nous avons profité d'une opportunité, lors d'une conférence, pour connaître l'opinion d'étudiants en fin de parcours dans le programme de génie des opérations et de la logistique. Leur opinion s'insère bien dans ce travail étant donné qu'ils pourraient être de futurs utilisateurs du prototype. Le questionnaire est disponible à l'annexe 2 et l'analyse des résultats à la section 4.2.

Les deux sondages (experts et étudiants) permettent d'obtenir l'opinion des gens susceptibles d'enseigner la démarche et l'opinion des gens qui sont susceptibles de recevoir la formation. Nous récoltons les informations des deux côtés ainsi nous avons une vue plus complète sur la perception et l'utilité d'une telle initiative.

En ce qui concerne la technique, nous évaluons les logiciels actuellement disponibles sur le marché pour répondre aux besoins du prototype à la section 4.3. Nous testons aussi la capacité de résolution de problèmes des outils du prototype, en proposant quatre études de cas résolues de manière comparée avec les deux types d'outils : simplifié et classique. Ces problèmes sont tous tirés de références du domaine d'étude et sont normalement résolus avec la méthodologie classique. Les études de cas sont présentées à la section 4.4.

## **CHAPITRE 2**

### **ÉVALUATION DES OUTILS ET DES CONNAISSANCES REQUISES**

Ce chapitre porte sur l'évaluation des outils contenus dans la démarche SS. Il s'agit de dresser un portrait des connaissances requises et des règles d'interprétation pour l'analyse qu'on en tire. Les différentes sections de ce chapitre présentent les phases d'un projet SS ainsi que les outils qui s'y rattachent. Seuls les outils ayant un caractère mathématique y sont détaillés, car ce sont eux que nous désirons simplifiés. Les outils qui sont d'avantages de gestion ou d'analyse qualitative sont hors de notre portée, car ce ne sont pas eux qui demandent une expertise statistique. Cette sélection se base sur le corpus de connaissance requis pour l'acquisition d'une ceinture noire de l'ASQ. Cette organisation est un fournisseur important de formation même que selon (Laureani et Antony, 2011), elle devrait être la référence internationale pour la reconnaissance des compétences.

#### **2.1 Reconnaître**

La phase de reconnaissance n'est pas toujours incluse dans la démarche SS parce qu'elle peut être considérée à l'extérieur d'un projet. Dans cette phase, il s'agit de reconnaître que nous avons un problème. Nous ne sommes pas encore en train de tenter de le régler. Les étapes subséquentes servent à dresser des solutions à un problème particulier. Ici nous voulons sélectionner ou prioriser des projets d'améliorations de la qualité. Ces décisions peuvent être prises par des gestionnaires autres que ceux qui exécutent le restant de la démarche SS. La sélection d'un projet doit être en adéquation avec les objectifs opérationnels et la stratégie globale de l'entreprise (Sunil et Anuradha, 2010). Il s'agirait d'une décision prise typiquement par un MBB, car sa position dans l'entreprise lui confère une vue sur ses missions. Par conséquent, il assure l'adéquation entre l'alignement stratégique de l'entreprise et de ses projets.

Du même auteur, voici les conditions qui mènent à faire un projet SS. Des sept points, si les trois premiers ne sont pas respectés, le projet devrait être directement éliminé. Les quatre autres points peuvent être résolus en redéfinissant le projet.

1. Les causes du problème doivent être associées à un processus;
2. Le processus ne doit pas être clair, mais plutôt complexe;
3. La solution ne doit pas être évidente;
4. Le succès doit être mesurable;
5. Le projet doit affecter au moins un indicateur de performance spécifique;
6. Le projet doit offrir un retour sur investissement positif;
7. Des données adéquates doivent être disponibles pour en faire l'analyse.

Outils couramment utilisés dans cette phase :

- Analyse financière;
- Matrice impact effort;
- Matrice à critères pondérés.

Ces outils ne méritent pas une attention particulière, car leur usage ne nécessite aucune utilisation de la statistique. L'analyse financière peut être un sujet complexe et peut s'opérer de plusieurs façons différentes. Ce sujet ne sera pas évalué dans ce présent travail.

## **2.2 Définir**

La phase de définition quant à elle permet de mettre en contexte, en perspective le problème. De comprendre toutes les relations qui le composent pour en dresser le portrait général. Dans cette phase nous voulons aussi produire une méthodologie pour résoudre les problèmes identifiés. Documenter la problématique, dresser la liste des intervenants que nous aurons besoin de consulter et former une équipe de travail s'il y a lieu.



Outils couramment utilisés dans cette phase :

- Charte de projet et outils de gestion de projet;
- QFD;
- Cartographies.

Ces outils ont une importance capitale pour le succès d'un projet d'amélioration. Par contre, leur nature n'est pas statistique et ne sera pas considérée dans le présent travail. Les outils de gestion de projets peuvent être complexes et l'utilisation peut grandement varier à travers l'industrie. Le choix d'outil de gestion de projet est laissé à la discrétion de l'utilisateur.

## **2.3 Mesurer**

Dans cette phase nous quantifions l'ampleur du problème en le mesurant. Autrement dit, nous prélevons les informations de notre système avec une stratégie de collecte de données. Par exemple, nous pourrions vouloir prélever un nombre de défauts par pièce, des temps d'opérations, un niveau de satisfaction, des délais d'attente, etc. À la suite des trois premières phases, le diagnostic est probablement complet. C'est-à-dire que nous devrions avoir une bonne esquisse de l'ampleur du problème et les gains potentiels d'un scénario amélioré pourraient être calculés avec une bonne estimation.

La phase de mesure comporte plusieurs outils de nature statistique pour lesquels nous avons un intérêt certain. Ils sont détaillés dans les sections subséquentes.

### **2.3.1 Analyse d'un système de mesure (R & R)**

Avant de commencer à mesurer une caractéristique. Ou encore, si nous soupçonnons qu'une erreur est induite dans nos données par le système de mesure, il est important de s'interroger sur la validité du système de mesure.

Deux éléments sont primordiaux dans l'analyse d'un système de mesure. Il s'agit de reproductibilité et répétabilité. La reproductibilité permet de savoir si la prise de mesure varie en fonction des différents opérateurs qui prennent les mesures. On dit que le système de mesure est reproductible lors que des employés différents obtiennent les mêmes résultats (Pyzdek et Keller, 2010). Tandis que la répétabilité permet de voir si le système de mesure est consistant dans le temps en enregistrant les mêmes mesures dans les mêmes conditions. Dans ce contexte on parle aussi de biais qui se définit comme l'écart entre la valeur mesurée et la vraie valeur. On se sert de ce biais souvent pour calibrer nos équipements de mesure. Un système de mesure doit aussi être stable. C'est-à-dire qu'il doit prélever des résultats dans une erreur acceptable autant le lundi que le jeudi. L'erreur de linéarité est observée quelquefois. Ce type d'erreur se produit quand le système de mesure inscrit un écart de plus en plus important quand on s'éloigne de la valeur centrale de l'étendue des mesures possibles du système. Par exemple une balance qui enregistre une erreur plus grande plus la masse pesée est grande.

Pour vérifier ces différentes caractéristiques, il existe principalement deux méthodes. Il s'agit de passer par les cartes de contrôle R ou encore la carte  $\bar{X}$  et R. autrement, l'ANAVAR est la méthode qui permet de tirer le plus d'informations et est la plus précise (Babin et al., 2007).

Notions nécessaires :

- Carte de contrôle (section 2.6.1);
- ANAVAR (section 2.4.2).

Niveau de formation : post-secondaire.

### 2.3.2 Le théorème de la limite centrale (TCL)

Ce théorème stipule que peu importe la loi de distribution qui s'applique à l'échantillon étudié, la distribution des moyennes d'échantillons prélevés d'une population tendront, plus  $n$  augmente, vers une loi normale (Hambleton, 2008). Plus la distribution de base s'éloigne d'une distribution normale, plus il faudra de données pour faire l'illustration de ce théorème : au moins  $n = 30$  (Munro, 2008). Pour la majorité des types de distributions, le tracé de la fonction de densité montre une allure normale à partir de quatre ou cinq moyennes d'échantillons (Babin et al., 2007). C'est en ayant soit une loi normale de base ou un échantillon plus grand que 30 que l'on peut comparer, sagement, les écarts-types selon l'équation du TCL suivante :

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.1)$$

Cette équation permet alors de relier l'écart-type de la distribution des moyennes échantillonnelles et l'écart-type de la population.

Notions nécessaires :

- Loi de distribution normale;
- Distinction entre échantillon et population;
- Variable indépendante et aléatoire (condition d'utilisation);
- Fonction de densité de différentes lois de distribution.

Niveau de formation : post-secondaire.

Ce théorème n'est pas un outil concret d'amélioration continue. Il permet de comprendre le fonctionnement naturel des moyennes d'échantillons venant d'une même distribution. Il peut aider à la compréhension générale de la distribution des moyennes, mais compter sur son application concrète pour résoudre des problèmes d'amélioration continue demande un

niveau d'expérience plutôt grand en statistique. Ce théorème met en relation plusieurs concepts abstraits et ceci exige une grande maîtrise de cette science.

### 2.3.3 Test de normalités

Les différents tests de normalité permettent de comprendre si les données étudiées ont l'allure d'une distribution normale à un niveau de confiance  $(1-\alpha)$  jugé acceptable (souvent 95%). D'une part, vérifier la normalité permet d'utiliser la loi normale pour faire de l'inférence statistique si le test est positif. De plus, ce test est une porte d'entrée à différents tests d'hypothèses statistiques. C'est-à-dire que si nous avons des données continues qui ont une allure normale, nous pouvons ensuite utiliser d'autres outils statistiques tels que le test Z, le test t, le test F et l'ANAVAR (Gryna et al., 2007).

Il existe plusieurs façons de déterminer la normalité d'un échantillon. Une manière précise couramment enseignée est avec le test d'Anderson Darling. Il est aussi possible de trouver l'adéquation à la loi normale avec d'autres tests statistiques tels que le test de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro Wilk ou encore Liliefors (Rakotomalala, 2008); Dans tous les cas, ces tests seront effectués avec un logiciel de statistiques et le résultat que nous regardons est le « p-value ». C'est-à-dire la probabilité de rejeter incorrectement l'hypothèse nulle lors qu'elle est vraie. Généralement, on accepte l'adéquation à la loi normale lors que l'indicateur « p-value » est plus bas que le niveau de signification  $\alpha$  que nous avons déterminé (souvent 0.05).

Ces tests requièrent une compréhension générale de la statistique ainsi que la définition de terme réservé à son usage tel que: risque alpha, « p-value » et les lois de distribution. De plus, leur calcul est souvent fait à l'aide de logiciels spécialisés.

Notions nécessaires :

- Connaissance générale de la statistique.

Niveau de formation : post-secondaire.

#### **2.3.4 Analyse d'aptitude d'un procédé**

L'analyse d'aptitude est souvent appelée aussi l'analyse de capabilité. La principale utilité de cette analyse est de connaître à quel point notre procédé est fiable. C'est-à-dire à quel niveau nous pouvons respecter les spécifications du client ou encore pour évaluer la performance d'un processus par des indices quantitatifs.

L'indice le plus simple est le nombre de défauts par unité (DPU). Il se traduit par le nombre moyen de défauts retrouvés dans un échantillon. Un défaut est défini comme étant un produit qui nécessite qu'on corrige certains de ses aspects ou encore qu'on le jette. Autrement dit, une pièce sans défaut passe toutes les étapes de production et est jugée acceptable sans retouche. Il ne faut pas omettre le nombre d'opportunités par unité. Si la pièce présente plus d'une caractéristique quantifiable, l'indice DPU doit en tenir compte. La formule formelle s'écrit alors  $DPU = \text{nombre de défauts} / \text{nombre d'opportunités}$ . Où le nombre d'opportunité est nombre de pièces \* nombre de caractéristique(s) soumise(s) à l'inspection.

##### **2.3.4.1 Le calcul du niveau sigma**

Le niveau sigma est l'indicateur universel de la démarche SS. L'idéal en tant qu'intégrateur de la démarche SS, est d'atteindre un niveau sigma de 6 ou plus. Le niveau sigma est lié avec le pourcentage de non-défaut (souvent nommé « yield % »). Le pourcentage de non-défaut s'interprète comme étant la probabilité générale de produire une bonne pièce. Ce calcul se base sur la fonction gaussienne avec les paramètres de la loi normale centrée réduite ( $\mu=0$ ,  $\sigma=1$ ). Par exemple, nous pouvons voir dans le logiciel Statistica, la probabilité de non-défaut (p) correspondant au niveau 1 sigma ( $x=1$ ). Nous choisissons la moyenne (mean = 0) et

l'écart type (st.dev = 1) pour simuler une loi normale centrée réduite. En plaçant la valeur de la variable  $x$  à une longueur d'écart type, nous obtenons une probabilité  $p$  de 0.6826. Nous avons aussi l'illustration dans le graphique du bas qui montre une région ombragée qui correspond à une longueur d'écart type de chaque côté de la moyenne. C'est-à-dire 68.26% de la population sous une loi normale centrée réduite. Dans notre contexte cela s'interprète en disant qu'un processus au niveau un sigma produit 68.26% de non-défauts.

Quoique ce calcul se fasse assez simplement avec des logiciels spécialisés, il fait appel à des concepts de statistiques plutôt avancés. Reprenons ce calcul :

Fonction de densité de la loi normale (fonction gaussienne) :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

Centrée réduite alors  $\sigma=1$  et  $\mu=0$ . L'équation devient :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2.3)$$

Probabilité  $p(x)$  associée au niveau 1 sigma. Il s'agit de calculer l'aire sous la courbe de la gauche jusqu'à une longueur d'écart type de la moyenne. Par contre, il faut tenir compte du

décalage de 1.5 sigma proposé par Motorola<sup>1</sup>(Maleyeff et Krayenvenger, 2004). Alors l'intégrale se calcule jusqu'à  $1-1.5 = -0.5$ .

$$p(x) = \int_{-\infty}^{-0.5} f(x)dx = 0.3086 \quad (2.4)$$

Il existe une autre façon assez répandue d'estimer le niveau sigma à partir de table se basant sur l'indicateur DPMO (défauts par million d'opportunités). Le DPMO est simplement le DPU multiplié par 1 000 000. Ces tables sont accessibles facilement sur Internet.

### 2.3.5 Les indices d'aptitudes

Il existe une grande quantité d'indices d'aptitudes, mais nous allons s'attarder aux deux indices les plus souvent utilisés dans l'industrie Cp et Cpk (Hambleton, 2008).

L'indice Cp permet d'identifier si, en général, l'étendue de notre procédé s'inscrit à l'intérieur des spécifications attendues par le client. Il s'agit d'un ratio entre l'étendue des spécifications du client et l'étendue, à six longueurs d'écart type, des données recueillies.

Les données doivent montrer une allure normale et être stables statistiquement. Ces deux conditions permettent de s'assurer que l'inclusion à des données à  $\pm 3\sigma$  couvre 99.73% des données et que l'écart type soit significatif pour le calcul subséquent suivant.

$$C_p = \frac{LSC - LIC}{6s} \quad (2.5)$$

---

<sup>1</sup> Le décalage de 1.5 sigma est un sujet controversé qui n'est pas à l'étude dans ce mémoire. Il a été introduit pour prendre en considération, entre autres, la dégradation naturelle d'un procédé.  $6\sigma$  à court terme correspond à  $4.5\sigma$  à long terme.

Où, LSC et LIC sont les limites supérieure et inférieure de contrôle et  $s$  est l'écart type de l'échantillon.

Statistiquement, lors que  $C_p$  vaut 1, 99.73% des pièces produites devraient se retrouver à l'intérieur des spécifications du client. Plus  $C_p$  est grand, plus le procédé est apte à respecter les spécifications. En général, on dit que le procédé est à la limite de l'acceptable lors que  $C_p > 1$  mais certains experts acceptent seulement un indice  $C_p > 1.5$  (Hambleton, 2008). Tout dépend de la nature de ce que nous produisons. Par contre, cet indice ne permet pas de voir si nous respectons l'objectif. Autrement dit, nous pouvons produire une pièce dont les spécifications sont à l'intérieur des tolérances du client, mais elles peuvent être décalées d'un côté ou de l'autre d'une valeur moyenne sans qu'on s'en aperçoive. Pour en tenir compte, nous pouvons obtenir une plus grande précision avec l'indice  $C_{pk}$  qui se calcule ainsi :

$$C_{pk} = \min \left[ \frac{LSC - \bar{x}}{3s}, \frac{\bar{x} - LIC}{3s} \right] \quad (2.6)$$

La valeur de l'indice  $C_{pk}$  est plus prudente, car elle compare avec la tolérance qui se rapproche davantage de la moyenne de l'échantillon. Généralement, on admet un indice  $C_{pk} > 1.33$  pour affirmer l'aptitude d'un procédé à respecter les spécifications du client. Plus, il est grand, meilleur est le procédé. Un indice  $C_{pk} = 2$ , indique une aptitude d'un niveau  $\sigma = 6$ .

Notions nécessaires :

- Échantillonnage (trouver une taille d'échantillon qui respecte un niveau de confiance pour le calcul du DPU);
- La loi normale et ses paramètres;
- Loi normale centrée réduite;



- Calcul de probabilité avec la loi normale;
- Concept de stabilité statistique par l'utilisation de cartes de contrôle  $\bar{x}$  et R.

Niveau de formation : post-secondaire.

## **2.4 Analyser**

Après avoir prélevé des données de l'état actuel du procédé. La démarche SS propose d'en faire l'analyse pour trouver des opportunités d'amélioration ou encore régler des problèmes. Dans cette phase, nous voulons identifier des causes et leurs ampleurs quantitatives à l'effet qu'elles produisent. Suite à cette analyse, nous devons être en mesure de savoir quels paramètres il nous faut changer pour améliorer la situation. C'est à cette étape que les outils deviennent rapidement complexes. C'est-à-dire que c'est ici que nous trouvons la plus grande quantité d'outils statistiques.

### **2.4.1 Le design d'expérience**

Ce type d'analyse permet de quantifier l'importance de l'effet de différents facteurs pour une cause. Il s'agit d'élaborer un plan de plusieurs expérimentations avec des modalités différentes pour chaque facteur. La planification d'expérience se fait suivant une démarche que nous pouvons décortiquer en quatre grandes étapes. À chacune de ces étapes, de l'analyse est induite dans la procédure. Voici les grandes étapes (figure 2.1) et le détail de chacune élaborer<sup>2</sup> plus loin.

---

<sup>2</sup> Les plans d'expériences font l'objet d'une documentation importante. Son élaboration dans cette étude se limite à la compréhension de sa complexité.



Figure 2.1 Étapes du design expérimental

#### 2.4.1.1 Déterminer les facteurs à l'étude

Pour faire un plan d'expérience, à priori, nous avons besoin d'une relation de cause à effet. Comme illustrer à la figure 2.2, nous avons un ou des facteurs (X) à l'entrée d'un processus et un<sup>3</sup> effet (Y) à sa sortie.

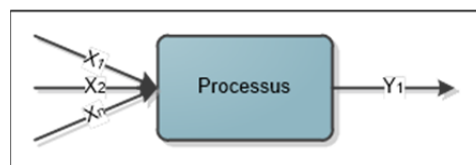


Figure 2.2 Facteurs pour un effet

<sup>3</sup> Le cas de figure à plusieurs effets n'est pas étudié dans ce travail.

Au départ, il faut déterminer quels seront les facteurs qui feront l'objet de l'étude. Le diagramme de cause à effet (Ishikawa) serait très pertinent pour en faire l'énumération. Quoiqu'il en soit, la première étape est de mettre un nom aux facteurs X, au processus et à l'effet Y. Les facteurs d'entrées peuvent être autant de nature quantitative que qualitative. Par contre, pour tous les facteurs, il faudra préciser des valeurs de réglages, modalités, parce que l'analyse d'un plan se fait avec des valeurs catégoriques à l'entrée et variable(s) continue(s) à la sortie.

Issue de notre diagramme de cause à effet, nous choisissons les facteurs que nous considérons pour le plan d'expérience. Par la suite, il faut choisir les modalités que prendront les facteurs. Dans une analyse de tamisage ou exploratoire, nous choisissons deux modalités qui sont souvent les extrêmes des réglages que l'on peut obtenir avec les facteurs. Il s'agit ici d'explorer sur la plus grande étendue du domaine réalisable. Dans une analyse, plus raffinée nous avons souvent moins de facteurs à l'entrée et nous pouvons choisir plus de deux modalités par facteur dans le but d'obtenir un réglage plus précis dans le cadre d'une analyse confirmatoire.

#### **2.4.1.2 Préparation de la matrice des essais**

La matrice des essais s'obtient suite au choix de la structure du plan. La structure d'un plan, quant à elle découle principalement du nombre de facteurs à l'étude, du nombre de modalités des facteurs, de l'effort en temps et financier des expérimentations. Il existe deux grandes catégories de structure de plan : les plans factoriels complets et fractionnaires. Supposons que nous avons 5 facteurs à l'étude et que chaque facteur possède 2 modalités. La construction d'un plan factoriel complet sera composée de tous les réglages possibles. C'est-à-dire  $2^5 = 32$  réglages différents.

Par contre, pour différentes raisons : économie de temps, tamisage d'un grand nombre de facteurs par exemple, nous pourrions vouloir faire moins d'essais pour tirer des conclusions

grossières. Nous pouvons donc utiliser un plan factoriel fractionnaire. Pour le même exemple, il serait possible de faire un plan composé de  $2^{5-1} = 16$  réglages ou encore  $2^{5-2} = 8$  réglages. Autrement dit, un plan d'expérience complet peut devenir fractionnaire avec la moitié, le quart et même encore moins d'essais. Par contre, la théorie devient beaucoup plus complexe. Il y a de nombreux éléments à considérer lors de la mise au point d'un plan d'expérience factoriel fractionnaire et ces théories sont hors de portée des non-spécialistes (Alexis et Alexis, 1999). Les plans factoriels fractionnaires reposent sur l'idée que les effets principaux sont confondus avec les effets d'interactions. Autrement dit, il est possible de tirer des conclusions en moins d'essais en établissant une structure d'alias qui permet d'identifier les effets confondus. À partir de cette théorie, nous devons faire le choix d'un générateur d'alias. Ce générateur est souvent présenté comme le plus haut niveau d'interaction. Supposons un plan avec trois facteurs de deux modalités et nous voulons estimer les effets avec un demi-plan. Il s'agit d'un plan fractionnaire  $2^{3-1} = 4$  essais au lieu de 8 pour le plan complet  $2^3$ . Dans ce cas le générateur serait  $I = ABC$ . En appliquant la procédure pour trouver les alias nous obtenons que A devienne un estimateur de BC. B est un estimateur de AC et que C est un estimateur d'AB. Dans ce cas, les effets principaux sont confondus avec des interactions doubles. C'est la propriété des plans que l'on nomme de résolution III. La résolution est obtenue généralement par le nombre de lettres qui compose le générateur d'alias. Ici nous avons  $ABC = 3$  lettres = résolutions 3. La résolution est un concept important des plans factoriels fractionnaires et permet d'aider la sélection d'une structure. Plus la résolution est grande plus il est difficile de se tromper concernant les interactions négligeables. (Montgomery, 2008) Selon le National Institute of Standards and Technology (NIST), les plans de résolution V sont très bons, IV sont bons et III servent à faire du tamisage de variables avec peu d'essais.

Pour l'élaboration d'un plan factoriel fractionnaire, il faut être un usager averti des plans d'expérience, car une grande liste de possibilités existe. Nous avons vu ici très rapidement les concepts concernant des plans factoriels fractionnaires. Selon d'autres situations

particulières, l'utilisateur pourrait choisir d'autres structures de plans fractionnaires tels que Plackett et Burman, Taguchi, Rechshaffner, etc.

Autrement, l'analyste pourrait aussi décider d'inclure plus de deux modalités par facteurs. En ayant, par exemple, trois modalités par facteurs, ceci permettrait d'avoir une idée de la courbure de la réponse entre les deux extrêmes des valeurs. Autrement dit, avec deux modalités, nous devons assumer l'hypothèse que nous avons une relation linéaire de la réponse entre les deux valeurs. Lors que nous incluons plus de modalités par facteurs, ceci permet d'obtenir une plus grande précision de la surface de réponse. Nommons ici deux types de plans qui offrent souvent un bon compromis entre le nombre d'essais et le niveau d'estimation pour trois modalités. Selon les circonstances, l'analyste pourrait choisir un plan de type composite centrée ou encore un plan de Box Behnken.

Dans la construction de la matrice des essais, il faut aussi considérer comment nous allons nous y prendre pour assigner les réponses des traitements. Plusieurs stratégies sont possibles. Nommons ici les trois stratégies de base : la répétition, le blocage, et l'aléatoire complet.

### La répétition

La répétition d'un ou plusieurs traitements d'un plan d'expérience permet d'obtenir une information supplémentaire plus tard dans l'analyse. Elle permet de calculer une variance pour les différents traitements ayant les mêmes réglages. Par conséquent, elle permet de décomposer l'erreur totale du modèle en deux catégories. Soit l'erreur pure qui sera imputée aux diverses sources de bruits incontrôlables et l'erreur d'ajustement qui proviendra de la variance entre les différents essais d'un même réglage. Avec cette dernière information, nous obtenons une analyse plus riche et elle permettrait une plus grande précision ou compréhension.

## Le blocage

Ce concept permet de regrouper certains réglages en bloc et d'en tirer des effets dits « effet de bloc ». C'est-à-dire qu'après le design du plan expérimental nous aurons aussi une contribution de la variance qui sera attribuée à l'effet des différents blocs. Cette assignation pourrait être souhaitable dans le cas où nous faisons des expérimentations sur plusieurs journées. Les blocs pourraient être les différents jours pour connaître l'influence qu'ils ont sur nos expérimentations par exemple.

## L'aléatoire complet

Cette notion est certainement la plus importante de la théorie des plans d'expériences et elle doit être en tête de l'analyste du début jusqu'à la fin de l'expérimentation. Il s'agit ici de comprendre que ce que nous voulons récolter est une variance issue du fruit du hasard et non d'une étude biaisée. Ce qui montre l'importance de déterminer l'ordre aléatoire dans lequel nous ferons les essais. Ce qui permettra de répartir l'erreur d'expérimentation sur l'ensemble des essais sans produire de tendances entre la variance et le temps. Ce qui aurait comme conséquence de fausser l'étude (Michálek, 1990; Neter et al., 1996).

### **2.4.1.3 La collecte des données**

La collecte est la partie où nous faisons l'expérimentation. Il s'agit de régler les paramètres selon les réglages à essayer et d'écrire les réponses obtenues. Il est important lors de cette collecte de garder l'ordre aléatoire des essais et d'être vigilant pour éviter diverses sources de biais.

#### 2.4.1.4 L'analyse des données

Le but de l'analyse des données d'un plan d'expérience est d'identifier la contribution des différents facteurs à une variance totale du système. À ce stade, l'outil à utiliser est le tableau de l'analyse de la variance à plusieurs facteurs. (voir section 2.4.2)

Notions nécessaires :

- Connaissance générale de la statistique;
- Analyse de la variance à plusieurs facteurs.

Niveau de formation : post-secondaire.

#### 2.4.2 Analyse de la variance (ANOVA)

Il existe plusieurs façons de faire de l'analyse de la variance. Dans sa forme la plus simple, on retrouve l'analyse à un facteur (One-Way ANOVA). Dans ce type d'étude, on cherche à déterminer si plusieurs échantillons provenant d'une même variable ont des moyennes statistiquement différentes. Le tableau 2.1 détermine le cadre d'une analyse de la variance à un facteur. Pour tester l'égalité des moyennes, on se base sur le calcul de deux sources de variations : entre les groupes, dans les groupes. La variance totale nous permettra de connaître la proportion de chaque source de variance par le calcul des sommes de carré.

Tableau 2.1 Anavar à un facteur

Sources de variation	Somme de carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	Ratio F
Entre les groupes (facteur A)				
Dans les groupes (Erreur)				
Total				

L'interprétation du ratio F permet de rejeter ou pas l'hypothèse nulle qui est la non-égalité des variances entre les échantillons. Nous pouvons affirmer que les moyennes entre les sous-

groupes sont différentes plus le ratio F est grand. Dépendant d'un niveau de risque choisi et du nombre de degré de liberté associé au facteur, nous pouvons déterminer si F est significatif ou pas. Pour les détails du calcul des valeurs de ce tableau, consulter (Wheeler, 1990, p. 91).

L'analyse de la variance qui nous intéresse plus particulièrement sert à connaître la contribution de l'effet de plusieurs facteurs pour une variable de réponse. Dans le cas précédant, nous n'avions qu'une seule variable décomposée en sous-groupe. L'ANOVA peut aussi s'effectuer pour obtenir l'effet général d'une variable ainsi que les effets d'interactions des variables en prolongeant la théorie des sous-groupes. Ce type d'analyse est celui que nous faisons suite à un design expérimental. En ayant des variables d'entrées (X) à plusieurs modalités catégoriques, nous pouvons déterminer une variance par variable, par modalité et pour l'ensemble des variables. De plus en ayant une variable de réponse (Y), souvent continue, nous pouvons connaître tous les effets principaux et d'interactions qui associent les X avec le(s) Y. La table de l'analyse de la variance peut s'écrire ainsi en considérant ici trois facteurs d'entrées A, B et C à deux modalités fixes et une variable de sortie continue.

Tableau 2.2 Anavar à plusieurs facteurs

Sources de variation	Somme de carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	Ratio F	P
Facteur A					
Facteur B					
Facteur C					
Interaction AB					
Interaction AC					
Interaction BC					
Interaction ABC					
Erreur					
Total					



Dans ce tableau, une nouvelle colonne permet de distinguer facilement les facteurs ou interactions qui ont une importante signification. Il s'agit de la colonne nommée P. Il s'agit de la probabilité calculée avec la distribution de Fisher tenant en compte le ratio F et les degrés de liberté associé au facteur et à l'erreur. En général, nous admettons que le facteur est statistiquement significatif quand  $P < \alpha=0.05$ .

#### **2.4.2.1 Les conditions d'applications lié à l'analyse de la variance**

L'analyse de la variance se valide par une série de tests que nous faisons à postériori. Il y a essentiellement trois validations à faire. Il s'agit de l'indépendance des résultats, la normalité des résidus et l'homogénéité des variances. Nous faisons ces validations après l'analyse de la variance, car pour les faire nous utilisons les résidus. Ces derniers représentent un écart entre une valeur observée et une valeur prédite. Nous comprenons que les résidus s'obtiennent donc après l'analyse de variance.

L'indépendance des résultats est une validation qui permet de comprendre si certaines réponses auraient pu être influencées par un facteur de biais ou encore un facteur qui ne serait pas sous notre contrôle. Lors que les résultats ne sont pas indépendants, un bruit différent de la variance pure du système s'est introduit dans l'étude. Par conséquent, il est plus difficile d'en dégager des conclusions claires par rapport à l'influence unique des facteurs sur l'effet. Il est possible de minimiser les risques de dépendance des résultats avant de faire la collecte des données en choisissant une stratégie d'échantillonnages (collecte aléatoire, température constante, moment de journée, etc.) dépendant de ce que nous voulons prouver.

La normalité des résidus et l'homogénéité des variances sont toutes deux très souvent liées, car lorsqu'une partie semblable d'un ensemble de données possède une variance différente du restant de l'échantillon, cela affecte assurément la distribution des données. Ainsi, plus les variances sont hétérogènes, moins nous avons de chance d'obtenir une distribution gaussienne dite normale. Dans une analyse de la variance, nous effectuons un test F pour

tenter de distinguer la variance des facteurs par rapport à la variance associée à d'autres facteurs à l'extérieur de l'étude (l'erreur). Une variance hétérogène pourrait nous mener à tirer de fausse conclusion avec le test F. Dans le cas d'un design expérimental balancé le test F reste suffisamment robuste, mais dans le cas d'un plan non balancé le test F peut être grandement affecté et le risque de faire l'erreur est plus grand (Montgomery, 2008). Par ailleurs, la normalité des résidus est souvent vérifiée avec un graphique de probabilité normale. Ce graphique permet aussi l'interprétation de valeurs aberrantes. Des valeurs que nous voudrions certainement éliminer de nos résultats.

La validation de ces tests se fait, dans la plupart des cas, par une analyse graphique. En ce qui a trait à la normalité, nous utilisons un graphique de probabilité normale. Ce type de graphique permet une bonne estimation de la normalité par le schéma des données. Elle permet aussi de vérifier s'il existe des données aberrantes. Effectivement, un point très éloigné de la droite normale signifie sûrement une mauvaise observation qui devrait être éliminée de l'étude. L'identification de valeurs aberrantes est un avantage de l'utilisation du graphique plutôt qu'un test de normalité d'Anderson-Darling par exemple. Par contre, un test d'hypothèse permet une interprétation plus formelle et précise.

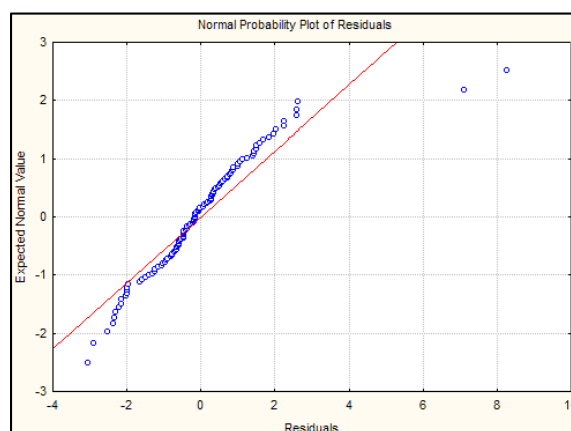


Figure 2.3 Probabilité normale des résidus

La figure 2.3 montre un exemple de graphique de probabilité normale avec deux valeurs aberrantes.

Il est possible de déterminer l'homogénéité des variances et l'indépendance des résultats par l'utilisation d'un seul graphique. Le graphique des résidus par rapport aux valeurs prédites. L'indépendance s'observe si le graphique montre une distribution aléatoire des points dans le graphique. Tandis qu'une variance homogène se traduit par une certaine uniformité de l'écart des points à la ligne centrale sur toute la longueur du graphique. Voici un exemple à la figure 2.4.

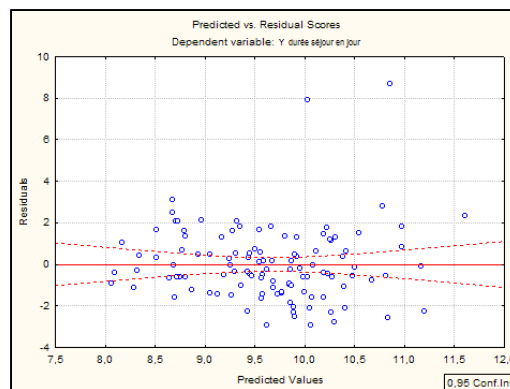


Figure 2.4 Résidus et valeurs prédites

Dans le cas d'une violation de conditions, l'analyste peut choisir différentes transformations (racine, log, Box Cox, etc.) pour ajuster les données et respecter les conditions d'utilisation pour tenter ainsi de trouver un modèle significatif.

L'analyse des résidus se trouve dans toutes les bonnes références qui mentionnent l'analyse de la variance. Pour des explications plus complètes, consultez (Harry, 2010, p. 559).

Notions nécessaires :

- Connaissance générale de la statistique;
- Compréhension des tests d'hypothèses;

- Calcul des probabilités;
- Loi de distributions normale;
- Concept reliant l'homogénéité des variances avec la distribution gaussienne;
- Interprétation de graphique de probabilité normale;
- Interprétation de l'indépendance des résultats : graphique de résidus observés vs prédits.

Niveau de formation : post-secondaire.

### **2.4.3 La stratification**

La stratification s'inscrit dans l'analyse exploratoire et a pour but de diviser les données en catégories de sorte à mieux comprendre certains phénomènes. Dans le contexte, on définit une strate comme étant un ensemble d'éléments indépendants provenant d'un échantillon ayant une même caractéristique. Ce type d'analyse s'effectue si au départ l'ensemble de données est agrégé et permet d'être décortiqué en plusieurs strates. Il est aussi possible d'envisager l'échantillonnage stratifié si les données n'ont pas encore été mesurées. Dans ce cas, l'analyste doit, à l'avance, définir une structure de caractéristiques et de variable ainsi qu'un nombre d'éléments à prélever par strates et sous-groupes. Ce type d'analyse peut se conduire avec de nombreux outils par exemple : le graphique en pointe de tarte, à barres, X-Y en ainsi qu'avec des tableaux de contingence et plusieurs autres selon la créativité de l'analyste. L'ASQ suggère le diagramme X-Y pour faire une analyse stratifiée. Le graphique suivant est disponible dans un gabarit Excel sur le site web de l'ASQ.

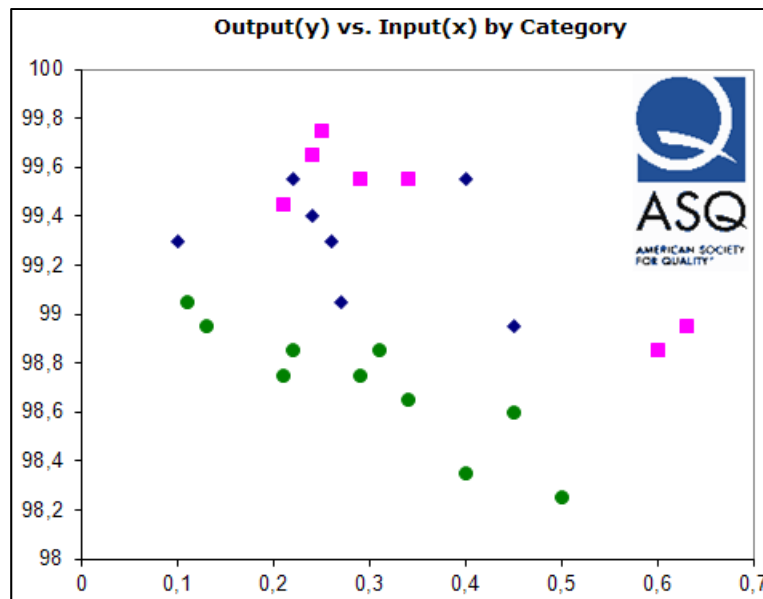


Figure 2.5 Diagramme de stratification X-Y  
Tiré de [www.asq.org](http://www.asq.org)

En pratique, il y a plusieurs façons de stratifier les données. La connaissance du système à l'étude ainsi que l'intuition de l'analyste sont les meilleurs guides. Un diagramme de cause à effet (Ishikawa) peut aussi être utile pour mettre en œuvre une stratification des données (Rooney et al., 2009).

Notions nécessaires :

- Technique d'échantillonnage : indépendance;
- Différents graphiques de base.

Niveau de formation : secondaire.

#### 2.4.4 Analyse multi varié graphique

L'analyse multi varié graphique est un outil connu de la phase d'analyse qui permet de visualiser la variance de plusieurs variables d'entrées X sur une réponse Y. L'idée de ce type d'analyse est de mettre en relation plusieurs familles de variations dans un graphique.

L'analyse graphique multi varié est normalement effectué dans le but de mieux comprendre ce qui cause du bruit dans un système. À cet effet, elle sert pour orienter les efforts d'amélioration vers une cause possible ou à l'inverse permet d'éliminer de l'analyse certaine variables. Autrement dit, ce type de graphique s'inscrit dans l'analyse exploratoire. Plus précisément, il s'agit d'une analyse de stratification. Nous voulons segmenter les données de sorte à faire ressortir les variances de différentes familles. Il s'agit de la variance d'un groupe, entre les groupes et temporelle. Selon le cas, ces différentes familles peuvent être identifiées par exemple : la variance d'une pièce, entre les pièces et entre les moments d'une journée.

Pour concevoir une charte multi-vari, il faut d'abord diviser en famille les variances qui s'appliquent à notre cas particulier. Ensuite nous récoltons l'information. Il s'agit d'un échantillonnage stratifié et dans un tel cas, nous ne voulons pas échantillonner de manière aléatoire. Le but est plutôt de comprendre les changements qui ont lieu entre les familles de variances. Plusieurs règles existent en ce qui concerne l'échantillonnage stratifié, mais selon (Shainin, 2008) il suffit d'échantillonner jusqu'à ce qu'une famille se démarque. Autrement dit selon cet auteur, il n'est pas nécessaire de considérer le calcul d'une taille d'échantillon. Dorian Shainin a élaboré cette procédure pour investiguer les sources de variabilité. La variation se segmente en trois grandes familles : dans le temps, à l'intérieur du sujet, et entre les sujets. Voici un exemple, à la figure 2.6, de graphique multi varié tiré de (Stefan H. Steinera, 2008) que j'ai modifié pour identifier les types de variabilité. Trois pièces (des tiges) consécutives ont été prélevées chaque heure pour mesurer le diamètre à quatre positions différentes.

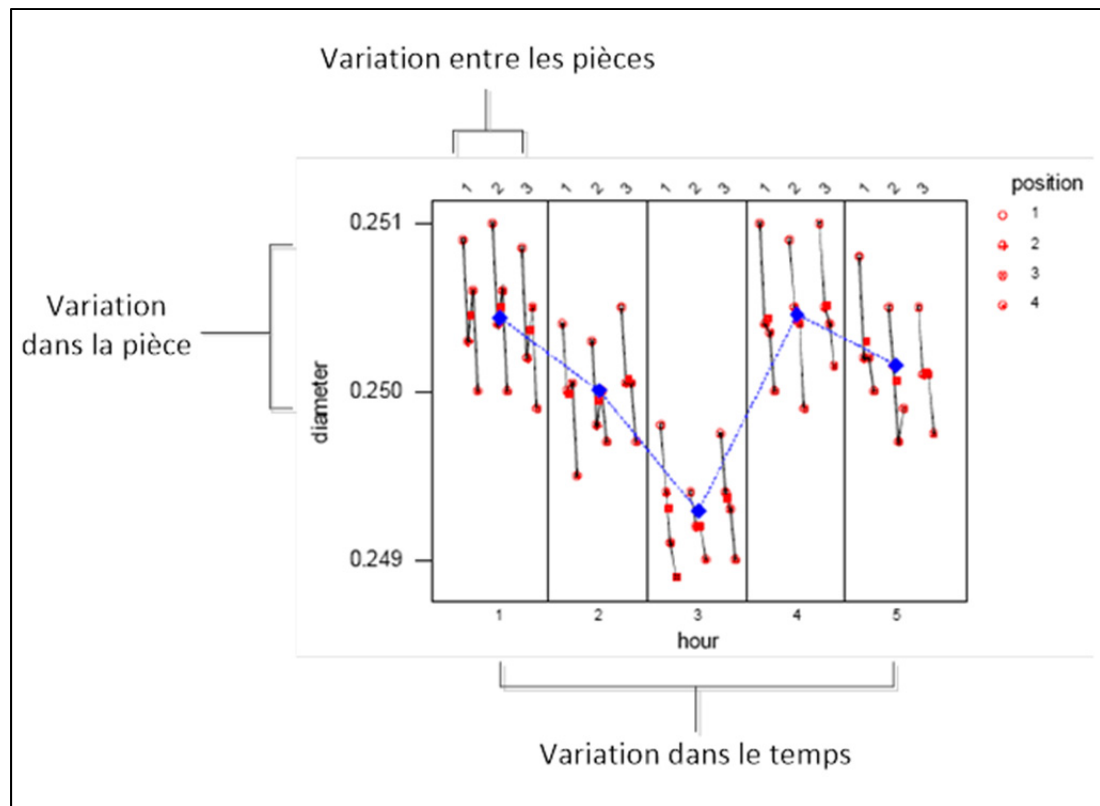


Figure 2.6 Charte multi variée  
Adaptée de (Stefan H. Steinera, 2008)

Un grand nombre d'informations est visuellement accessible dans ce graphique. Nous pouvons y voir les variations potentielles sous trois différents axes à la fois. Ce qui permet de donner une direction à l'analyse pour approfondir et trouver les causes des variations.

Notions nécessaires :

- Technique d'échantillonnage : indépendance.

Niveau de formation : secondaire.

### **2.4.5 Analyse de la régression**

Dans le même sens que l'analyse de la variance, il s'agit ici de trouver l'influence d'un ou de plusieurs facteurs sur une variable de réponse. La distinction est que la régression est plus adéquate lors que nous avons des facteurs de type continu à l'entrée autant qu'à la sortie.

Notions nécessaires :

- Même type de connaissance et même niveau que l'analyse de la variance. (section 2.4.2).

Niveau de formation : post-secondaire.

### **2.4.6 Les tests d'hypothèses**

Les tests d'hypothèses permettent de comparer des données pour vérifier avec un niveau de confiance établi, la similitude entre différents indicateurs. Principalement, ces tests permettent de comparer soit des moyennes, des variances et des proportions à partir de deux ou plusieurs échantillons ou encore d'un échantillon pour une valeur cible. (Gryna et al., 2007, p. 602) propose un exemple de table qui permet de choisir le bon test à exécuter en fonction du cas que nous avons. Vous pouvez consulter cette référence au besoin.

Notions nécessaires :

- Connaissance générale de la statistique.

Niveau de formation : post-secondaire.

### **2.4.7 L'échantillonnage**

La question éternelle de l'échantillonnage est combien, je dois en prélever pour que mon échantillon soit représentatif? Selon la statistique, un échantillon ne devrait pas être



« représentatif » d'une population; un échantillon est plutôt significatif d'un ensemble ayant les mêmes caractéristiques selon un risque d'erreur que nous prêt à assumer. D'un point de vue calculatoire, il n'est pas possible d'obtenir un nombre précis d'échantillon à prélever pour atteindre un risque d'erreur acceptable en début d'étude. Pour déterminer un nombre de sujets à prélever ( $n$ ), nous faisons appel à une distribution normale. Avec quelques observations, nous pouvons déterminer rapidement une moyenne et un écart-type. Ces deux paramètres serviront, selon la loi normale, de déterminer un nombre d'échantillons supplémentaire pour atteindre un niveau de confiance choisit par l'analyste. Si l'analyste a de la chance et que les données affichent peu de dispersion, le nombre à prélever sera faible. Autrement, ce sera le contraire. Le nombre de sujets à prélever évolue en fonction de la dispersion des données recueillies.

Il s'agit du même principe lors de la stratification des données pour déterminer un nombre à prélever. Ce qui permet le regroupement en strate est qu'en ensemble partage une même caractéristique. Ceci peut rendre une analyse plus riche lors de l'exploration, car plusieurs caractéristiques sont analysées en même temps. Par conséquent, le travail d'amélioration peut être orienté plus rapidement (selon la pertinence de la stratégie).

La technique consiste à prélever des sujets non biaisés. C'est-à-dire que la caractéristique pour laquelle nous voulons un échantillon est, le moins possible influencé par des facteurs connus. Pour se faire, les conditions au moment du prélèvement doivent être semblables sauf pour la caractéristique qui nous intéresse. Par exemple lors de la mesure d'une pièce, la pièce changera, mais, idéalement, pas les conditions de mesure ni l'employé. Si nous voulons, échantillonner les employés qui mesurent vaut mieux que la pièce et les conditions de mesure ne changent pas, etc. Étant donné qu'il n'est pas physiquement possible de prélever des sujets à un moment identique, il vaut mieux répartir aléatoirement les prélèvements dans le temps. Ceci permet une meilleure exploration en couvrant tout le domaine temporel. Par exemple une entreprise opérant de 8 à 17 heures, devraient faire des prélèvements aléatoires couvrant tous les moments d'opérations (s'ils opèrent en continu).

L'échantillonnage nécessite une stratégie de prélèvement et un plan de collecte des caractéristiques de sorte à obtenir les données nécessaires à l'analyse qui suivra. Lors d'une exploration, il vaut mieux penser à stratifier les données pour obtenir un portrait plus général.

Notions nécessaires :

- Connaissance des lois binomiale et normale;
- Connaissance du système à l'étude.

Niveau de formation : post-secondaire.

## **2.5 Améliorer**

À cette étape, il s'agit de prévoir les changements que nous voudrions apporter au système et les implanter. Cette phase repose sur le fait que nous ayons trouvé la ou les cause(s) qui posaient problème à la phase précédente d'analyse. Il s'agit ici de produire un modèle du système qui tient compte des solutions aux problèmes.

La phase d'amélioration contient tous les principes qui se rattachent à l'amélioration continue. Les outils concernant l'élimination des gaspillages et la réduction des temps de cycle sont empruntés au Lean Manufacturing. La plupart de ces outils ne sont pas de nature statistique par exemple : la cartographie améliorée, instauration d'un flux tiré, le 5S, le kanban, le kaizen, etc. Sinon quelques statistiques et graphiques de base peuvent être utilisés lors qu'il s'agit de calcul de temps de cycle, proportion des temps, etc. Nous voyons bien ici la complémentarité entre les outils Lean et SS pour faire de l'amélioration continue. Car SS vise l'augmentation de la qualité. Formellement, le seul outil SS dans cette phase est le design d'expérience et parfois il est classé dans la phase d'analyse, car d'une part, il sert à trouver des causes potentielles, mais il peut aussi servir à optimiser un réglage de sorte à se rapprocher des caractéristiques du client. Dans ce dernier cas, on parlerait plutôt de la phase

d'amélioration. D'ailleurs cet outil, est le seul qui est de nature statistique et il est explicité, dans ce mémoire, avec les outils d'analyse.

Dans cette phase, nous avons tout en mains pour évaluer le projet avec la plus grande précision. C'est-à-dire que nous connaissons le problème ainsi que la solution. Il est possible de faire une analyse des risques conséquents à l'implantation de manière quantifiée en énumérant des critères avec une valeur probabiliste. D'ailleurs, les critères politique, économique, social et technologique (PEST) peuvent être une bonne façon d'initier cette étude. Nous pouvons déterminer les coûts initiaux, les bénéfices escomptés, le temps d'implantation ainsi que les risques qui se rattachent au projet.

L'implantation des solutions doit passer par un consensus de l'équipe d'amélioration en ce qui concerne les alternatives pour régler un problème(Kubiak et Benbow, 2009). Pour ce faire, l'équipe peut se prévaloir d'une matrice à critère pondéré. Dans cette même référence, il est suggéré de tester la solution avant de l'implanter soit par un test à petite échelle, par simulation ou encore par prototypage selon le type de projet. Ensuite nous parlons de l'engagement des gestionnaires ainsi qu'un plan d'allocation de ressources et de communication clair. Ce dernier servira à organiser l'allocation des tâches du projet, mais aussi à préparer, persuader les intervenants aux changements qui auront lieu.

Il sera nécessaire d'instaurer des indicateurs de performances pour mesurer les gains associés au projet et pouvoir les comparer avec les prédictions et continuellement réévaluer les risques et peut-être mettre en doute le projet lui-même. Autrement dit, gérer le projet et notre supérieur devrait gérer l'ensemble des projets<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> La gestion de projet ainsi que la gestion de portefeuille de projets est une science en soit qui n'est pas explicité dans ce mémoire. Par contre, si l'analyste est familier avec ces théories, il serait à son avantage de les considérer.

Finalement, selon la nature du projet, il est possible que de la formation soit nécessaire pour que les employés puissent s'adapter à faire leur travail dans le nouvel environnement.

## **2.6 Contrôler**

En ce qui a trait au contrôle, nous voulons ici faire le suivi de ce qu'ont apporté les changements. Vérifier si les gains estimés se sont vraiment réalisés et surtout maintenir ces gains. Une stratégie doit être mise en place pour prélever la mesure de certaines variables et en faire l'analyse. Le contrôle permet aussi ultérieurement d'approfondir la connaissance du système et de s'améliorer davantage selon ce que nous observons à travers le contrôle.

### **2.6.1 Les cartes de contrôle**

Le contrôle statistique des procédés a été introduit vers 1920 par W. Shewart et a été popularisé par W. Edwards Deming durant la Deuxième Guerre mondiale (Wheeler et Chambers, 1992). Shewart voulait trouver une façon de prédire, avec un niveau de certitude, le comportement d'un procédé. Pour ce faire, selon lui, il doit être sous contrôle statistique. La carte de contrôle est l'outil privilégié pour déterminer si le procédé est ou n'est pas sous contrôle statistique. De plus, l'essentiel d'une carte de contrôle est de donner des indications sur les améliorations possibles en séparant les causes communes des causes spéciales.

Selon un plan d'échantillonnage, des caractéristiques sont mesurées ou évaluées pour situer l'élément sur la carte. Selon différentes allures que prendra la variation sur la carte, nous pourrions définir si le procédé est sous contrôle ou pas. La variation est décomposée en deux grandes catégories : les causes communes et les causes spéciales.

Lors que le procédé est sous contrôle, nous disons que sa variation est aléatoire ou naturelle. C'est-à-dire, qu'elle est prévisible à l'intérieur de limites de contrôle. Il s'agit de causes

communes de variation. Par contre, lors qu'il n'y a plus contrôle statistique, nous parlons plutôt de causes spéciales qui ne sont pas naturelles ou aléatoires. Elles sont assignables à d'autres phénomènes : temps, dégradation de matière première, ajustements d'équipements, etc. Ce type de problème affectera la tendance ou la dispersion du procédé. Il faut les trouver et les éliminer.

Voici un exemple généré avec le logiciel Statistica (figure 2.7) pour faire l'analyse statistique d'un procédé. L'ensemble de données comprend 24 mesures d'une variable nommée Y4 en sous-groupe de 3.

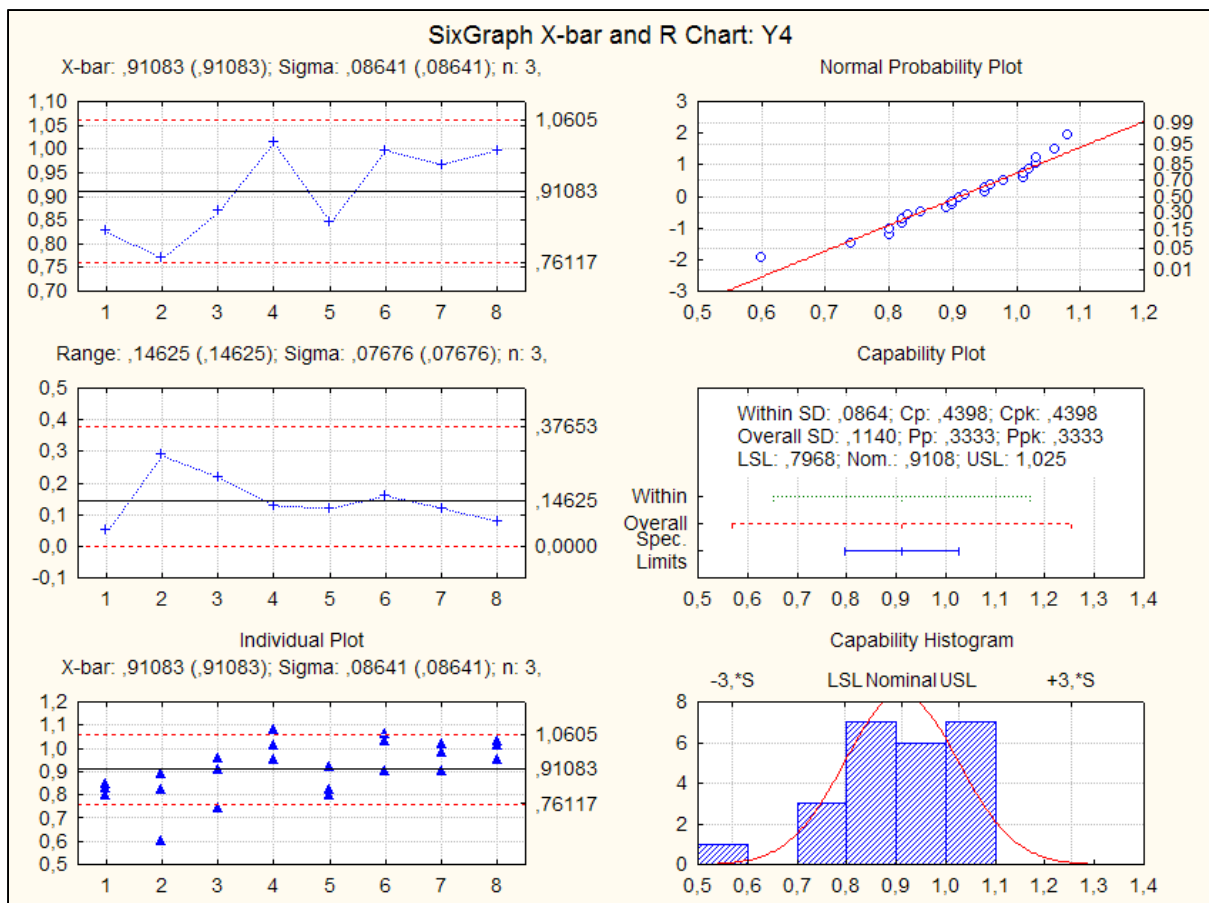


Figure 2.7 Analyse à six graphiques

Il s'agit ici d'une analyse des moyennes et des étendues (carte  $\bar{x}$  et R). Une prémisse pour assurer la robustesse des cartes  $\bar{x}$  et R est que l'échantillon soit distribué normalement. Le graphique de probabilité normale (en haut à droite) permet d'en juger. En dessous, nous trouvons l'analyse de capacité du procédé qui regroupe différents indices Cp, Cpk, etc. ainsi qu'un histogramme qui montre comment la variabilité se distribue. L'analyse de la capacité est un complément facultatif des cartes de contrôle. Les deux premiers graphiques de la colonne de gauche sont les cartes de contrôle  $\bar{x}$  et R. Nous pouvons remarquer les limites de contrôle fixées à  $\pm 3\sigma/\text{racine}(n)$  de la ligne centrale (la moyenne générale). D'ailleurs, la ligne centrale est habituellement, la moyenne générale. La première carte montre les moyennes des sous-groupes de 3. La deuxième affiche leur étendue et la troisième montre les valeurs individuelles des 24 sujets. Maintenant l'analyse de ces cartes, par une série de tests, est essentielle pour connaître si le procédé est sous contrôle statistique et plusieurs types de test existent :

Les plus populaires et rependus sont les règles de Shewhart. Ce dernier sépare la carte en zone délimitée à une distance d'un écart type de la ligne centrale. La zone A est la plus éloignée et détermine la limite de contrôle tandis que la zone C touche la ligne centrale. Si une, le procédé n'est plus sous contrôle statistique si une des règles (Baillargeon, 2001, p. 342) n'est pas respectée :

1. 1 point à l'extérieur des limites de contrôle. (plus loin que la zone A);
2. 9 points consécutifs au-delà de la zone C du même côté de la ligne centrale;
3. 6 points consécutifs qui montrent une augmentation ou diminution;
4. 14 points qui alternent vers le haut et vers le bas;
5. 2 points sur 3 consécutifs dans la zone A;
6. 4 points sur 5 consécutifs dans la zone B ou au-delà;
7. 15 points consécutifs dans la zone C du même côté de la ligne centrale;
8. 8 points consécutifs de part et d'autre de la ligne centrale, sans point dans les zones C.

Dans l'exemple issu de Statistica, nous remarquons qu'une règle n'est pas respectée et par conséquent le procédé n'est pas sous contrôle statistique. Dans la carte  $\bar{x}$ , les échantillons 4 à 8 se situent à l'intérieur ou plus loin que la zone B. Nous voyons que le procédé est en turbulence et une investigation est nécessaire pour trouver la cause spéciale.

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma	from	to
Tests for special causes (runs rules)	sample	sample
<b>9 samples on same side of center</b>	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	4	8
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figure 2.8 Règles de contrôle de Shewart

De leur côté, l'Automotive Industry Action Group (AIAG) semble utilisé des règles un peu plus approximatives. Elles sont citées à la page 390 dans (Kubiak et Benbow, 2009)

- 1 point à l'extérieur des limites de contrôle;
- 7 points consécutifs du même côté de la ligne centrale (moyenne);
- 7 points consécutifs qui augmentent ou diminuent;
- 90% ou plus des points sont dans le tiers médian des limites de contrôle (au moins 25 points);
- 40% ou moins des points sont dans le tiers médian des limites de contrôle (au moins 25 points).

Plusieurs autres séries de règles ont été publiées dont les règles de Nelson, celles de Western Electric, Boeing et General Electric aussi et elles se ressemblent à quelques détails près. Les règles de l'AIAG représentent la liste la plus courte.

Nous trouvons deux familles de cartes de contrôle les quantitatives qui servent à mesurer une grandeur et les qualitatives dont la mesure est binaire habituellement conforme ou non-conforme. Dans le cas des cartes quantitatives nous utilisons très fréquemment la carte  $\bar{x}$  et

R, mais d'autres sont également utilisés comme la carte  $\bar{x}$  et s quand nous avons des sous-groupes plus grands que 9. Sinon il est possible d'utiliser des cartes avec soit la moyenne ou l'étendue mobile. Ces dernières sont utiles s'il n'est pas possible de former de sous-groupe. La figure suivante propose un chemin décisionnel pour choisir une carte quantitative:

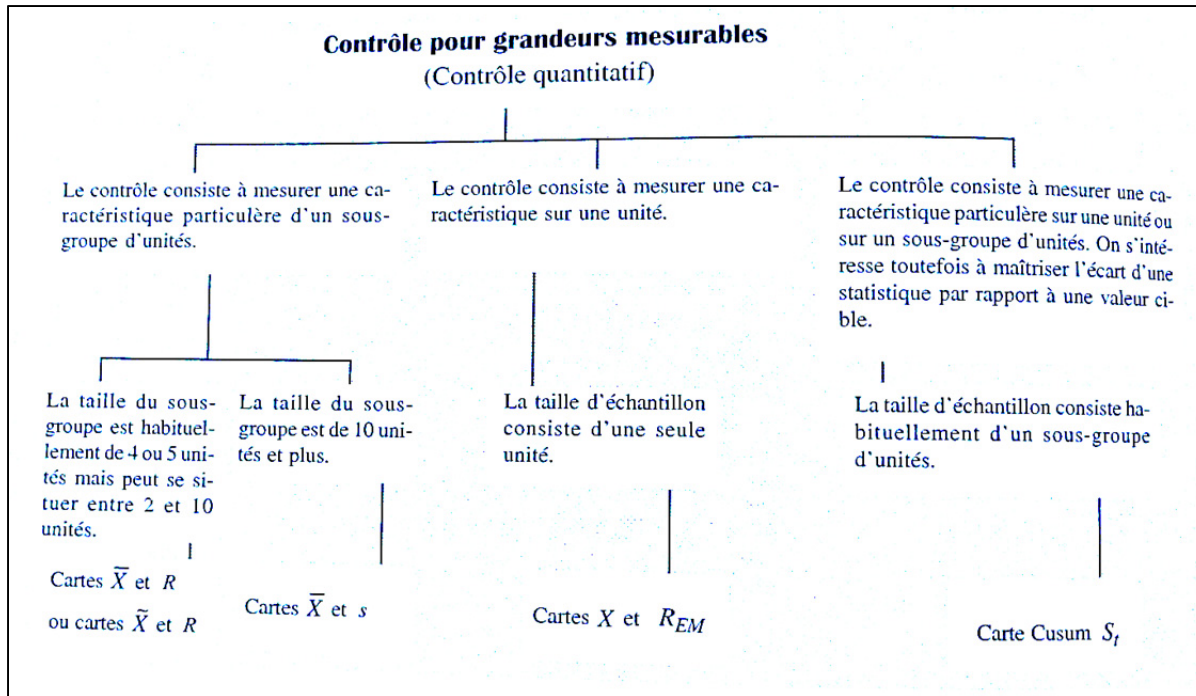


Figure 2.9 Diagramme conditionnelle pour un contrôle quantitatif  
Tiré de (Baillargeon, 2001, p. 326)

Dans les cartes qualitatives ce qui nous intéresse c'est d'observer les non-conformités. Ces cartes permettent la mesure d'un compte et non d'une grandeur continue. Essentiellement nous retrouvons quatre cartes : la carte p, np, c et u. Nous pouvons trouver un processus décisionnel dans (Baillargeon, 2001, p. 415) aussi disponible dans (Wheeler et Chambers, 1992, p. 281).



Le processus habituel, selon (Stagliano, 2004, p. 114), pour mettre en place un contrôle se décompose comme suit :

1. Identifier la caractéristique à analyser;
2. Spécifier la nature de la variable à l'étude :
  - a. Discrète : compte, proportion, pourcentage de non-conformité;
  - b. Continue : volume, épaisseur, vitesse, etc.
3. Déterminer l'approche d'échantillonnage :
  - a. Déterminer des sous-groupes (si possible);
  - b. Des grandeurs d'échantillon;
  - c. Une fréquence d'échantillonnage.
4. Sélectionner la bonne carte de contrôle;
5. Faire l'échantillonnage et produire une série chronologique et lors qu'il y a suffisamment de sujets<sup>5</sup>, produire la carte de contrôle;
6. Analyser les cartes et prévoir les actions correctives pour stabiliser le procédé;
7. Recalculer les limites lors de changements sur le procédé qui affecteront certainement les mesures enregistrées.

Notions nécessaires :

- Application d'une stratégie de collecte de données;
- Connaissance des différentes cartes de contrôle;
- Connaissance des règles et de l'analyse des différentes cartes;
- Loi de distribution normale.

Niveau de formation : Post-secondaire.

---

<sup>5</sup> 25 ou plus pour un contrôle par attribut et 50 ou plus pour un contrôle sur une variable

## 2.7 Synthèse des outils statistiques

En regardant les outils à l'extérieure d'une démarche SS nous pouvons aussi les classer par fonction. Nous pouvons nommer quatre principales fonctions qui regroupent ce que nous pouvons faire avec des données accumulées. Il s'agit soit de décrire, de comparer les données entre elles, de les comparer à un seuil ou encore de vérifier les relations entre elles. La figure 2.10 montre le classement des outils du chapitre dans ces catégories. Le but étant de comparer avec une démarche simplifiée si nous pouvons obtenir des outils pour chaque catégorie.

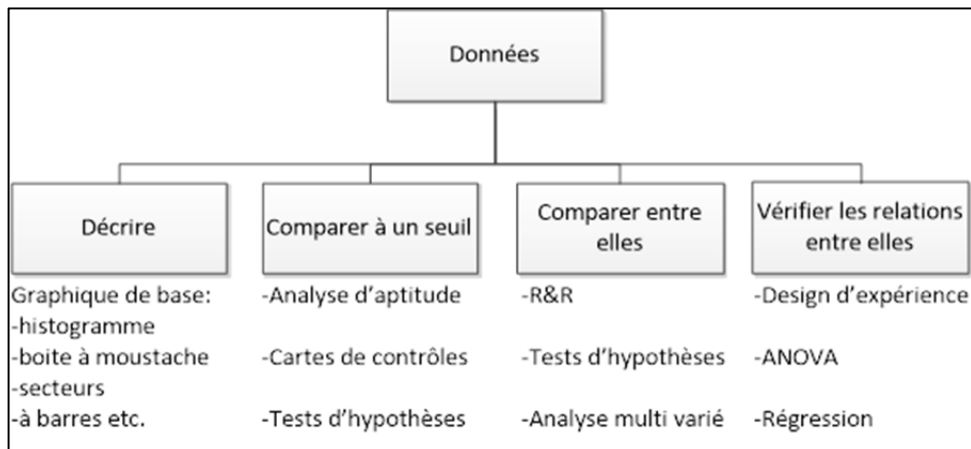


Figure 2.10 Diagramme des outils de la formation Black Belt par objectifs

Nous avons exclu certaines connaissances de ce graphique étant donné qu'ils sont davantage des techniques ou encore de la théorie nécessaire à l'application d'outils. Comme par exemple le théorème central limite est utile pour comprendre que plus un échantillon augmente de taille plus l'intervalle de confiance autour de la moyenne ne réduira. Les tests de normalités sont préalables à l'utilisation de plusieurs autres outils qui exigent que les données soient distribuées normalement. La stratification et l'échantillonnage sont des méthodes de prélèvement des données et les outils d'analyse seront en conséquence des choix issus de ces techniques.

## **CHAPITRE 3**

### **SÉLECTION D'OUTILS DE REMPLACEMENT**

Rappelons-nous la critique de la méthodologie au chapitre premier. Certains auteurs pensent qu'une part de la complexité de la démarche SS vient de la confusion due au grand nombre d'outils. De plus, la complexité de certains outils statistiques démotive plusieurs initiés. Finalement, la démarche demande plusieurs années d'entraînement étant donné qu'elle est hautement analytique.

Cette section décrira la sélection des outils que nous voulons conserver dans la démarche simplifiée pour tenter de diminuer la confusion ainsi qu'amoindrir la grande importance accordée à l'utilisation de la statistique pour réduire le temps de formation et d'entraînement. Nous croyons que de limiter la sélection à des outils visuels simples permettrait d'atteindre les objectifs tout en gardant encore un grand potentiel de solvabilité de problèmes. Autrement dit, la sélection doit être faite en conservant, en priorité, les outils les plus puissants qui sont simples d'utilisation.

Il est clair que de réduire la dépendance à la statistique aura des effets sur la précision des résultats ou encore sur la certitude qu'on accorde aux résultats, mais cette sélection d'outils s'adresse à des initiés qui ne connaissent pas nécessairement la statistique. Nous voulons construire un coffre à outils qui soit utilisable rapidement pour que ces gens puissent faire de l'amélioration continue et non de l'analyse statistique. Nous souhaitons que les outils contenus dans la démarche se basent sur des calculs et des notions acquises à l'école secondaire. Dans le cas où une analyse approfondie serait requise alors un autre professionnel ayant une bonne compréhension de la statistique devrait se pencher sur le problème. Nous croyons que ce type de coffre à outils permettrait aux débutants d'acquérir les connaissances suffisantes pour être fonctionnelles dans les projets d'amélioration de la qualité, de rester motivés, car ils pourront voir l'effet de leurs connaissances. De plus, s'ils le veulent, rien ne

les empêche de faire l'apprentissage d'outils davantage complexe par la suite et de construire sur les connaissances simples déjà acquises. D'ailleurs, il a été découvert par Jean Piaget que notre façon d'apprendre est de construire sur des connaissances déjà acquises (Gardner, 1993). Le constructivisme, depuis les années 60-70, est une théorie fondamentale de l'éducation (Tobin, 1993). Alors mieux vaut s'initier à la gestion de la qualité sur une base analytique accessible plus simplement.

Une équipe de chercheur de l'Université Technologique du Michigan s'est intéressée à la boîte à outils de la méthodologie SS selon plusieurs aspects. Deux informations recensées par eux sont grandement utiles pour le développement de notre boîte à outils. Il s'agit du niveau de connaissance requis de l'utilisateur ainsi que l'efficacité de résolution de l'outil. Ces informations sont disponibles dans la référence suivante (Catherine, John et Dana, 2006, p. 469). Cette référence a été utilisée en appui pour nos choix, mais d'abord et avant tout rappelons que nous voulons initier des gens qui n'ont aucune connaissance de la statistique et voir même de l'amélioration continue.

Les outils présentés dans ce chapitre, ont été simplifiés considérant seulement des notions acquises à l'école secondaire selon le programme de formation secondaire du premier et deuxième cycle du ministère de l'Éducation (Québec, 2004) et (Québec, 2007). Les outils présentés nécessitent une compréhension de savoirs moins complexe que la formation classique et ainsi favorisent une meilleure rétention des connaissances par une construction sur des éléments déjà acquis (Watzlawick, 1990). Cet aspect est, évidemment, critique pour la mise en application de l'outil. Si la rétention de l'outil est plus grande alors nécessairement l'analyste les utilisera avec plus de confiance et pourra davantage générer des gains au lieu de valider sans cesse dans ses manuels de référence. L'entreprise ne paie pas ses employés pour faire de l'analyse, mais pour générer des gains.

Voici les prémisses préconisées pour la construction du coffre à outils :

1. Le coffre à outils doit se limiter à des notions mathématiques compréhensibles par un diplômé de cinquième secondaire;
2. Le coffre à outils doit faire abstraction des lois de distribution statistique et aussi de l'écart type;
3. Les outils privilégiés devront permettre une analyse de nature visuelle;
4. Privilégier la réutilisation d'un outil pour un autre cas de figure au lieu de créer un autre outil semblable.

### 3.1 Type d'opérations et démarche d'analyse

Nous avons vu à la section 2.7 les quatre grandes familles d'opération avec des données : décrire, comparer les données entre elles, comparer à un seuil et de vérifier les relations entre elles. Étant donné que nous voulons un coffre à outils de nature visuelle, nous devons pouvoir illustrer nos données, car les graphiques ont toujours été la façon la plus puissante et efficace de communiquer de l'information contenue dans un ensemble de données (Wheeler et Chambers, 1992).

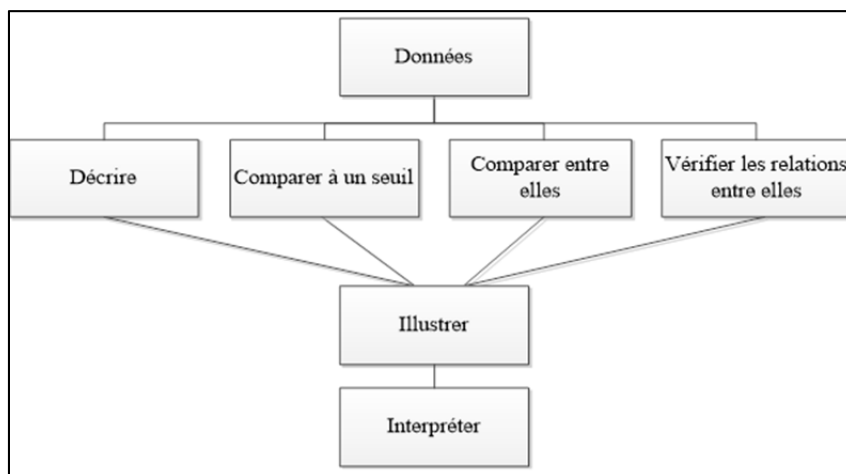


Figure 3.1 Diagramme des types d'opérations et de la démarche d'analyse

Nous pouvons maintenant revisiter les outils vus précédemment et faire l'analyse à savoir comment nous les incluons dans notre coffre à outils.

## **3.2 Sélection, analyse et conception des outils**

### **3.2.1 Les outils graphiques de base**

Les outils graphiques de base sont importants dans notre démarche, car ils sont souvent déjà connus des utilisateurs et présente pour nous les meilleures opportunités d'utilisation, car ils sont simples d'usage et font abstraction de notion complexe de la statistique. Tous ces graphiques ne requièrent aucune formation universitaire et sont donc éligibles pour une sélection dans notre démarche. En voici la liste :

- 1) Boîte à moustache (distribution/répartition);
- 2) Pointe de tarte (proportion/contribution);
- 3) Graphique à barres (proportion/contribution);
- 4) Histogramme (distribution);
- 5) Pareto (distribution ordonnée);
- 6) Nuage de point (corrélation).

#### **3.2.1.1 Boîte à moustache**

Cet outil est certainement le plus prometteur de notre sélection, car il possède de nombreuses caractéristiques et il est simple à utiliser et comprendre, car il s'utilise sans avoir référencé à des concepts avancés de statistiques. C'est un outil visuel qui permet de représenter la tendance centrale ainsi que la dispersion d'un ensemble de données. Dans Statistica et Minitab, nous pouvons l'utiliser soit avec la moyenne ou avec la médiane. Utiliser avec la moyenne, les séparations se font avec une longueur d'écart type tandis qu'avec la médiane, il

s'agit d'une distance inter quartile. Dans notre cas, nous choisirons toujours la médiane, car elle est plus robuste pour représenter la tendance centrale. C'est que la médiane n'est aucunement sensible aux données éloignées étant donnée la mise en rang des sujets de l'échantillon. D'ailleurs, cet outil permet de déterminer les données éloignées, mais aussi la dispersion. Les données sont divisées en quartiles et la distance entre chacun d'eux détermine sa densité. Plus cette distance est longue plus la distribution sera évasée et vice versa.

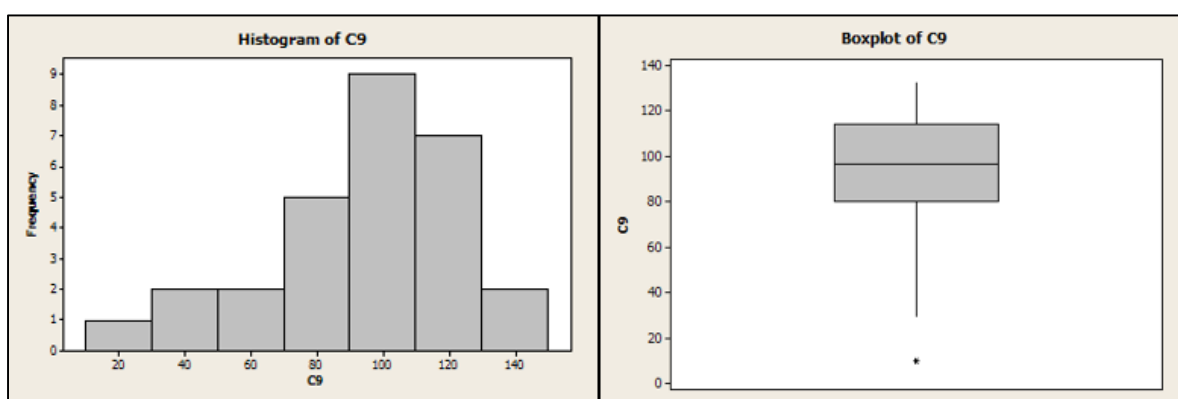


Figure 3.2 Histogramme et boîte à moustaches d'un jeu de données

De plus, il est aussi possible de détecter approximativement l'asymétrie d'une distribution en analysant la boîte à moustaches. L'histogramme (figure 3.2) montre un ensemble de données ayant une asymétrie à gauche. L'allure de l'histogramme montre quand même que les données sont distribuées autour d'une moyenne. C'est-à-dire qu'en général les données sont en majorité autour de 100. C'est aussi ce que nous pouvons remarquer avec la boîte à moustaches. La boîte indique que 50% des données se situent entre 80 et 115 environ. De plus, la ligne centrale montre un léger décalage vers le bas ce qui indique une faible majorité de données plus grande que 100 des données de la boîte. Avec les moustaches, nous voyons clairement l'asymétrie à gauche, car la longueur de la moustache du bas est clairement plus grande que celle du haut. Nous voyons aussi une donnée éloignée qui ne figure pas dans l'histogramme. Étant donné la longue moustache du bas et la donnée éloignée, il serait

prudent de croire que les données ne sont peut-être pas normales. L'analyse de l'histogramme porterait à penser la même chose.

Dans le cas où la normalité serait importante, le test de normalité d'Anderson Darling permettrait de trancher. Nous voyons le résultat du test (figure 3.3) n'est pas très convaincant en affichant une valeur p-value un peu plus grande que 0,05. Ce qui signifierait effectivement que les données sont distribuées normalement, mais nous sommes à la limite de l'acceptable. L'analyse visuelle permet la même interprétation, car les points de la ne sont pas alignés totalement sur la ligne diagonale.

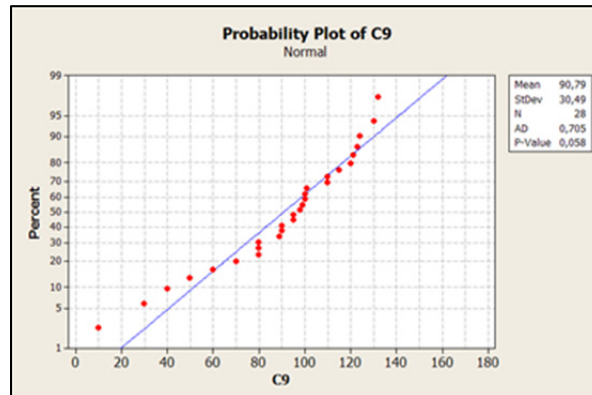


Figure 3.3 Graphique de probabilité normale

L'allure que prendrait une distribution normale est représentée avec les deux figures suivantes :

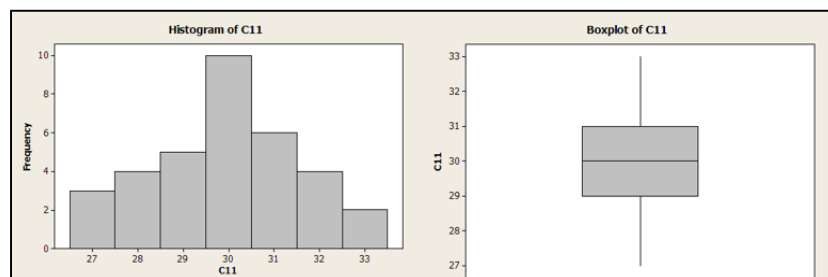


Figure 3.4 Histogramme et boîte à moustaches normale



Lorsque nous avons ce type de boîte à moustache, nous pouvons suspecter la ressemblance à une loi normale. Par contre, ceci n'est pas certain. Il se pourrait que les données soient discrètes et qu'ils aient la même distance entre elles et que chaque donnée ait la même densité. Dans le cas où nous avons des données discrètes, l'analyste devrait plutôt utiliser un graphique à barres ou encore un graphique en secteurs, car l'usage de la boîte à moustache est réservé aux données quantitatives.

Finalement nous tenterons d'intégrer le plus possible la boîte à moustache, car elle peut s'utiliser dans plusieurs cas de figure : décrire, comparer à un seuil, comparer des ensembles entre eux. Par contre, ce graphique ne s'applique malheureusement pas pour vérifier les relations entre les variables. Il est préférable d'utiliser le plus souvent possible les mêmes outils, car l'analyste les maîtrisera forcément mieux.

### 3.2.1.2 Graphique à barres

Les graphiques à barres servent à représenter des données selon différentes catégories. Autrement dit, ils sont utiles pour l'illustration de données discrètes. Par exemple si un département enregistre différents types de non-conformités et que nous voulons comparer la répartition de ces dernières sur un intervalle de temps.

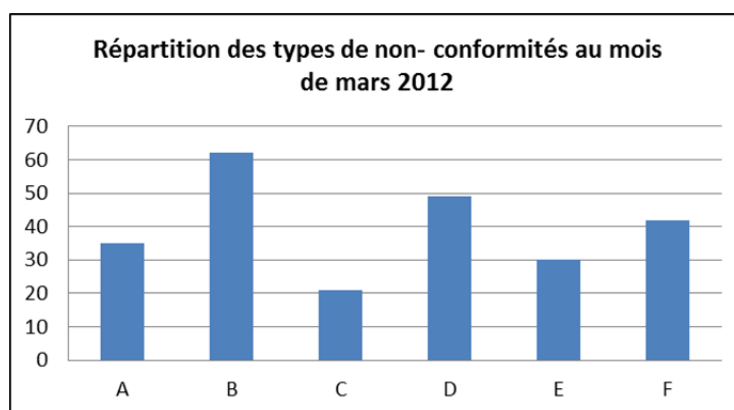


Figure 3.5 Exemple de graphique à barres

Dans ce graphique nous illustrons le compte des types de non-conformités pour le mois de mars. Ce genre d'illustration s'avère utile lors de l'exploration de notre système pour mieux le comprendre. De plus, en ayant des données sur une année, il est possible de comparer les graphiques par mois pour mieux comprendre l'évolution des erreurs. Dans ce dernier cas, il s'agirait de stratifier les données pour tenter de trouver une tendance et, ultimement, tirer des hypothèses pour expliquer une cause. Nous reviendrons à la technique de stratification au prochain chapitre.

### 3.2.1.3 Le graphique secteur

Ce graphique est semblable au graphique à barres parce qu'il utilise les mêmes données de base par contre il illustre une proportion relative à l'ensemble. Autrement dit, nous faisons abstraction du compte pour faire l'emphase sur un pourcentage.

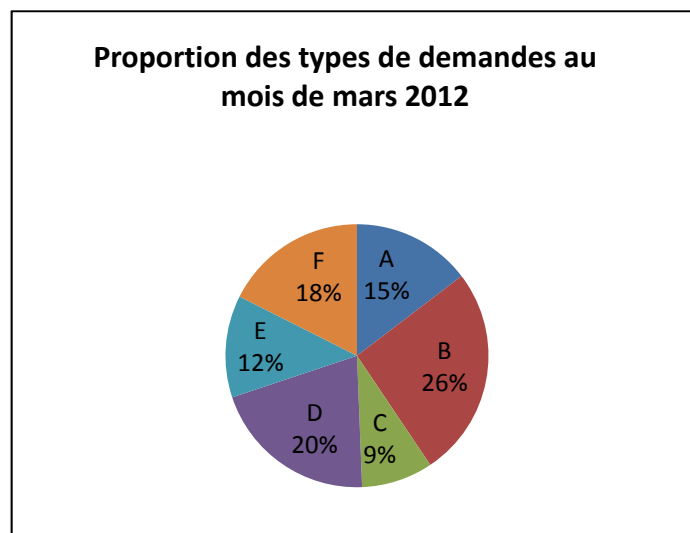


Figure 3.6 Exemple de graphique secteur

Ce graphique est davantage utile pour montrer une catégorie qui se démarque. Le graphique secteur est le plus simple à comprendre et on l'utilise souvent dans un but de communication.

Cet exemple serait à la limite de la pertinence pour ce type de graphique, car nous n’y voyons rien qui contraste avec le reste.

#### **3.2.1.4 Histogramme**

Même s’il peut avoir une allure semblable au graphique à barres, l’histogramme ne s’utilise pas avec le même genre de données. Pour construire ce dernier, nous utilisons des données quantitatives que nous classons dans différentes catégories ou intervalle de mesures. Contrairement au graphique à barres, l’histogramme ne contient aucun espace entre les catégories, car les données sont classées entre les intervalles de l’axe horizontal. Le but est d’obtenir une fréquence de la variable par classes pour tenter d’en tirer une répartition. L’histogramme est utile quand nous avons plutôt une grande quantité de données autrement il pourrait être hasardeux de tirer des conclusions sur la répartition des données. L’histogramme est souvent la porte d’entrée à l’analyse statistique, car il permet aussi de faire l’analyse visuelle à l’adéquation d’une loi de probabilité statistique. À la suite de cette identification, nous pouvons ajuster et calculer des probabilités pour différentes valeurs que prendrait la variable décrivant la loi.

Lors que les échantillons sont plus petits qu’une trentaine d’individus, il est possible de faire un diagramme tige et feuille si nous avons des données continues ou encore un diagramme à point si les données sont discrètes. Voir (Griffiths, 2009, p. 644) pour des exemples.

#### **3.2.1.5 Diagramme de Pareto**

Le diagramme de Pareto est un autre outil de base de l’amélioration continue. Il est de nature qualitative, car le but est d’obtenir une fréquence, un compte, pour chacune des catégories, mais les données peuvent être quantitatives et classées selon des intervalles. Cet outil majeur de l’amélioration continue sert à accorder une importance aux types de non-conformité et ainsi prioriser la direction des efforts à faire.

Dans le cadre d'une stratification des données, il est possible d'utiliser successivement cet outil, mais si l'accent devient trop grand, nous pouvons perdre de vue ce qui est significatif. Le diagramme de Pareto n'affiche pas directement une relation de cause à effet, mais indique une direction pour préciser la recherche de causes.

Nous allons maintenant faire l'analyse des outils vue au chapitre précédent et vérifier s'ils sont éligibles pour qu'ils soient conservés dans notre démarche simplifiée. Valider s'ils sont conservés tels quels, remplacés, modifiés ou encore complètement enrayés. Rappelons-nous que dans une démarche sans l'utilisation de la notion de distribution et même sans la notion de l'écart type, il est impossible de trouver une signification statistique lors de nos analyses. D'ailleurs la signification statistique et une notion dont nous voulons volontairement faire abstraction, car dans une démarche d'amélioration continue même si une variable a de l'effet sur une réponse, mais n'a pas une signification statistique importante ceci ne devrait pas nous empêcher de nous améliorer quand même en ajustant le réglage. Nous reparlerons de ce concept plus loin avec les plans d'expérience. Les sections suivantes reprennent les outils du chapitre deux avec l'intention de les simplifier.

### **3.2.2 L'analyse d'un système de mesure (R et R)**

Nous avons vu que l'analyse d'un système de mesure passe de manière classique par soit une analyse de la variance ou encore par des cartes de contrôle. Il serait possible d'utiliser un outil visuel qui ne nécessite pas une grande connaissance des statistiques. Effectivement une variante de la charte multi vari avec des boîtes à moustaches pourrait permettre une analyse semblable. Par contre, cet outil de nature visuelle n'a pas le même pouvoir discriminant qu'une ANAVAR, mais l'analyste pourra quand même tirer de bonnes estimations des tendances et juger de la reproductibilité et de la répétabilité de son système de mesure.

Répétabilité : Mesure dans les mêmes conditions (environnement et méthode) par le même employé à des moments différents.

Reproductibilité : Mesure dans les mêmes conditions (environnement et méthode) par des employés différents à des moments différents

L'analyste doit obligatoirement comprendre qu'il s'agit d'analyser les données sous différents axes. C'est-à-dire de manière stratifiée et ici il y a trois facteurs à faire varier : les employés, les pièces ainsi que le temps. Le but est de comparer des échantillons entre eux de sorte à remarquer les différences et ressemblances.

On vérifie la répétabilité avec les réplifications (même employé, même pièce, moment différent) et la reproductibilité en comparant les mesures des mêmes pièces par des employés différents sur le graphique.

L'analyste doit identifier une pièce pour laquelle nous avons un consensus sur sa mesure. Cette pièce circulera plusieurs fois dans le contrôle sans que l'opérateur qui en fait la mesure sache qu'elle est soumise à une analyse plus approfondie. Selon Automotive Industry Action Group l'exercice devrait comporter 10 mesures de la pièce et trois réplifications par employé. L'idéal est d'avoir trois employés qui font l'exercice (Kubiak et Benbow, 2009, p. 100). Voici le prototype du graphique suggéré (figure 3.7). Dans cet exemple, trois employés à trois moments différents ont fait 10 fois la mesure de la même pièce.

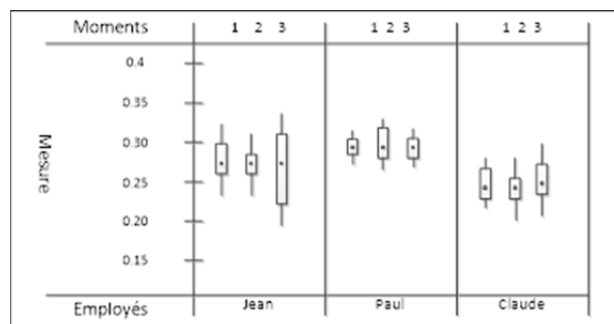


Figure 3.7 Prototype de graphique R et R simplifié

Dans cet exemple, nous remarquons que l'appareil est répétable mais non reproductible, car les mesures des mêmes employés sont plutôt constantes, mais entre les employés il semble y avoir un écart. Ce graphique permet d'investiguer à savoir comment chacun d'entre eux utilise l'appareil. Les boîtes à moustaches ont été privilégiées dans le but d'habituer l'analyste à travailler avec elles.

### **3.2.3 Le théorème central limite (TCL)**

Ce théorème est contenu dans le corpus de connaissance de formation de l'ASQ, mais n'est d'aucune utilité dans notre plan de formation. Cet outil appartient à la théorie fondamentale de la mathématique statistique et intègre des notions qui dépassent ce qu'on apprend à l'école secondaire.

### **3.2.4 Test de normalités**

La formation de base fait abstraction de la notion de distribution. Dans ce contexte, cette notion de s'intègre pas à notre coffre à outils. Par contre, plusieurs outils de nature statistique requièrent la normalité dans les données comme condition d'utilisation. Ces outils devront naturellement être substitués pour éviter ce type de test.

### **3.2.5 Analyse d'aptitude d'un procédé**

Concernant le calcul du niveau sigma, le but de ce calcul est de prendre la mesure de l'évolution de notre démarche d'amélioration continue. À travers le temps, nous souhaitons voir le niveau sigma augmenter. Ce qui signifierait que le nombre de défauts que nous produisons diminue. Nous avons vu que le calcul du niveau sigma fait référence à la loi normale centrée réduite. Plus précisément, à la proportion statistique de non-défauts. Par contre, le point de départ est un nombre de défauts par opportunité (DPU). Cet indice est

suffisant pour surveiller l'évolution de nos efforts. Plus le DPU diminue dans le temps, plus on s'améliore. De plus, si l'analyste veut se comparer à un compétiteur ou un partenaire qui publie un niveau sigma, il est plutôt facile de convertir le DPU en niveau sigma en passant par le DPMO et une table de conversion comme nous l'avons vu au chapitre 2. Finalement nous suggérons que le nombre de défauts par opportunité fasse l'objet d'un suivi sur un tableau de bord au même titre que les autres indicateurs de mesure. Celui-ci serait réservé à l'usage des spécialistes de l'amélioration continue à savoir comment leurs projets ont un impact sur le nombre de défauts par opportunité.

### **3.2.6 Les indices d'aptitudes**

Ces deux indices servent à indiquer à quel point nous respectons les spécifications du client. Ils se basent par contre sur l'hypothèse que les données suivent une loi normale. Dans ces conditions, nous ne pouvons conserver l'outil. Toutefois, visuellement nous pouvons faire l'approximation de ces indicateurs avec une variante de la boîte à moustache. Ces indices mettent en relation la moyenne, la dispersion ainsi que les tolérances du client. Nous retrouvons des informations comparables sur la carte de contrôle  $\bar{X}$  et R. toutefois, les limites de contrôle statistique ne peuvent s'intégrer dans notre démarche, car ils font référence à l'écart type de l'échantillon à l'étude et si l'écart type n'est pas connu nous devons utiliser un paramètre de la loi de Student pour trouver les limites supérieure et inférieure de contrôle. Toutefois, nous comprenons que ces indices servent à comparer des caractéristiques de notre production aux spécifications du client. Autrement dit, se comparer à un seuil. La carte de contrôle peut se substituer par une succession de boîte à moustache. Effectivement, il serait possible d'illustrer une série chronologique avec cet outil. Nous suggérons une taille de sous-groupe ayant un minimum de 5 individus pour illustrer la boîte avec toutes ces caractéristiques (min, Q1, Q2, Q3, max). Déterminer une taille de sous-groupe au-delà de 9 individus ne serait pas utile, car nous voulons comparer les boîtes à moustache entre elles et non obtenir une seule boîte à moustache représentant l'ensemble des

valeurs mesurées. D'ailleurs (Baillargeon, 2001) propose d'obtenir au total une centaine d'individus pour obtenir un portrait adéquat de la situation.

Ce nouvel outil est moins discriminant que les indices CP et CPK que nous comparons à un seuil, mais il permet de comprendre sensiblement les mêmes phénomènes. L'utilisateur doit pouvoir analyser le graphique de sorte à y remarquer les anomalies. Cet outil, sert d'une part, à voir quelle approximation de la proportion de la production se trouve à l'extérieur des tolérances du client, mais aussi de faire l'analyse des tendances de la production dans le but de se rapprocher du centre des tolérances dans une démarche d'amélioration continue.

Le graphique suggéré à la page suivante (figure 3.8) montre une série de boîtes à moustache selon un plan d'échantillonnage déterminé. Les deux lignes rouges représentent les tolérances du client fixé à 0.23 et 0.34. L'axe du bas montre les moments de prélèvement qui peuvent être déterminés selon n'importe quelle unité de temps pourvu que ce soit constant à travers tout le graphique. Au moment deux nous retrouvons deux données aberrantes à l'extérieur des tolérances du client et au moment 9 le maximum de la boîte à moustache se trouve aussi à l'extérieur des tolérances, mais généralement nous pouvons dire qu'elles sont respectées dans la grande majorité des cas. L'axe des moments est important pour diriger l'investigation dans le cas où les mesures afficheraient une tendance. Le moment donne un indice temporel pour savoir ce qui s'est produit : changement d'employés, nouveau lot, volume d'appel plus grand, etc.

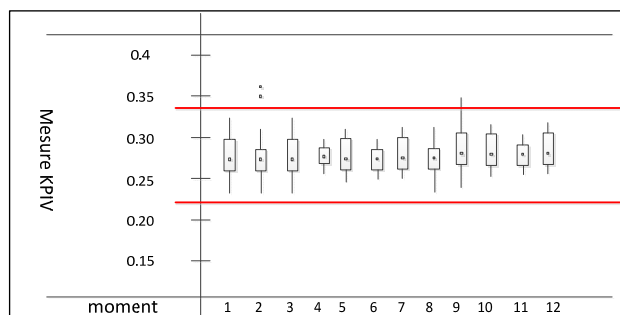


Figure 3.8 Prototype contrôle quantitatif



## Le design d'expérience

En premier lieu, la simplification des plans d'expériences passe par certains compromis, car si de nombreux ouvrages et qu'une grande quantité de types de plan existent, c'est pour répondre à une grande quantité de situations particulières. Donc, l'idée de la simplification ici est de limiter les choix de plans aux plus couramment utilisés et d'en simplifier l'analyse. De cette façon, nous croyons augmenter la rétention du concept et si l'utilisateur en ressent l'envie, il sera en mesure d'approfondir ses notions sur le sujet.

D'abord, les plans d'expériences ne seront jamais complètement simples, car ils font référence à une série de calcul qui peut sembler abstrait. Toutefois, pour permettre une entrée en la matière, il est clair qu'il faut débiter avec les plans complets à deux modalités, car ceux-ci font abstraction de la notion de résolution et d'alias. Le plan complet à deux modalités est le plus simple à comprendre, car il comprend une feuille de prélèvement de toutes les possibilités à tester avec les valeurs extrêmes des facteurs à l'étude. Avec ce type de plan, l'initié peut obtenir les calculs de toutes les interactions entre les facteurs et ainsi obtenir une vue sur l'ensemble des possibilités. D'ailleurs, dans le but de maximiser la compréhension des calculs, l'analyse des plans d'expérience ne sera plus avec un tableau d'analyse de la variance standard dans notre nouvelle démarche, mais se basera uniquement sur le résultat des sommes de carrés des écarts illustrés avec un diagramme d'éboullis. L'ANOVA ne peut rester un outil de la démarche simplifié, car elle implique une grande connaissance de la statistique qui est généralement acquise au niveau universitaire (degré de liberté, ratio F, p-value, etc.). Nous croyons que les sommes de carrés sont suffisantes pour connaître la contribution des facteurs à la variance totale du système. La signification statistique sera réservée aux analystes avertis. D'ailleurs, connaître la contribution des facteurs est suffisant pour orienter l'analyste vers l'amélioration du système.

En raison du nombre d'essais à produire, nous devons limiter notre outil à 5 facteurs (32 essais). Si beaucoup de facteurs sont à l'étude, nous suggérons alors d'en faire le tamisage

par d'autres moyens par exemple par un diagramme de causes à effet, diagramme d'affinité, etc. Autrement, il faut apprendre la théorie des plans fractionnaires.

Ce type d'analyse permet une entrée en matière de la statistique en général, car en explicitant le calcul des sommes de carrés, l'utilisateur pourra comprendre le concept de base du calcul de la variance.

Voici un exemple de l'analyse proposé à trois facteurs selon la matrice des essais complétés suivante:

Tableau 3.1 Exemple de matrice des essais

Matrice des essais			
A	B	C	Résultat (Y)
15	50	30	10
25	50	30	12
15	100	30	9,5
25	100	30	12,1
15	50	60	9,7
25	50	60	11,6
15	100	60	9,9
25	100	60	11,8

L'analyse et les calculs se font en transférant la matrice des essais en matrice des effets.

Tableau 3.2 Exemple de matrice des effets

	Matrice des effets						
	A	B	C	AB	AC	BC	Résultat (Y)
	-1	-1	-1	1	1	1	10
	1	-1	-1	-1	-1	1	12
	-1	1	-1	-1	1	-1	9,5
	1	1	-1	1	-1	-1	12,1
	-1	-1	1	1	-1	-1	9,7
	1	-1	1	-1	1	-1	11,6
	-1	1	1	-1	-1	1	9,9
	1	1	1	1	1	1	11,8
SCE modèle (facteurs)	8,82	0,00	0,045	0,045	0,08	0,08	

La somme de carrés des écarts (SCE) dans le graphique ci-dessus s'obtient avec l'équation suivante :

$$SCE_{facteur_i} = \frac{contraste_i^2}{2^k * n} \quad (3.1)$$

Où « k » est le nombre de facteurs et « n » le nombre de réplication. Dans cet exemple, nous avons trois facteurs et une seule réplication. De manière générale le dénominateur de cette équation équivaut au nombre de lignes de la matrice des essais.

Le « contraste » quant à lui signifie la différence de grandeur sur la réponse entre les réglages min et max d'un facteur. Il s'obtient pour un facteur en calculant la somme des produits. Pour un facteur x et une réponse y nous pouvons déterminer l'équation suivante :

$$contraste_x = \sum_i X_i * Y_i \quad (3.2)$$

Un contraste nul implique que, peu importe le réglage du facteur, sa valeur n'influence pas la réponse. Finalement, nous pouvons calculer le tableau sommaire suivant :

Tableau 3.3 Exemple de sommaire des sommes de carré des écarts

Sommaire	
SCE modèle	9.07
SCE totale	9.115
SCE erreur	0.045

Où

$$SCE \text{ totale} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.3)$$

$$SCE \text{ modèle} = \sum_i SCE \text{ facteurs}_i \quad (3.4)$$

$$SCE \text{ erreur} = SCE \text{ totale} - SCE \text{ modèle} \quad (3.5)$$

À partir de ces résultats, il est maintenant possible d'illustrer la grandeur des effets des facteurs à l'aide d'un diagramme d'éboulis des sommes de carrés.

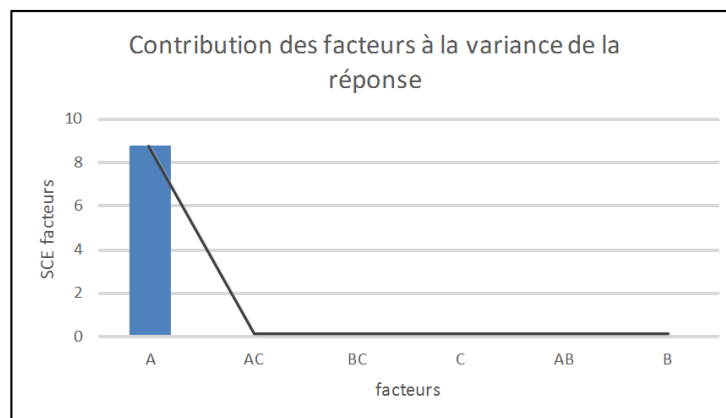


Figure 3.9 Diagramme d'éboulis des sommes de carré

L'analyse du diagramme d'éboulis des sommes de carré s'interprète en recherchant le plateau. Généralement les facteurs qui se retrouvent à gauche d'un coude ont certainement un effet sur la réponse contrairement à ceux qui se retrouvent à droite. S'il n'y a pas de plateau, alors il faut regarder les pentes de la courbe entre les facteurs. Selon (Wheeler, 1990) si une pente se démarque alors cet effet a probablement une signification. Dans le cas contraire, aucun facteur ne produit un effet. Il s'agit alors de bruit. Avec cette méthode d'analyse, nous pouvons alors tirer les mêmes conclusions qu'en trouvant le ratio-F dans le cadre d'une ANOVA. Toutefois une réplication du plan doit être faite pour statuer sur la réelle

signification des facteurs. La réplication du plan permet alors de confirmer les effets et ainsi d'annuler les vérifications de normalité, d'homogénéité et d'indépendance.

Dans un contexte de simplification, nous affichons seulement les facteurs d'interactions doubles dans le diagramme d'éboulis. Un deuxième graphique peut être pertinent pour s'assurer que les interactions plus grandes que les doubles ont de l'effet. Sachant que le reste de la variance inexpliquée dans ce diagramme passe dans les sommes de carrées associés à l'erreur du modèle, il est possible d'illustrer ses proportions en comparant avec la variance totale du modèle (tableau 3.4).

Tableau 3.4 Proportion des sommes de carré pour le modèle et l'erreur

SCE		proportion
SCE modèle	9,07	0,995
SCE erreur	0,045	0,005
SCE totale	9,115	

Nous s'assurons maintenant que les niveaux plus grands d'interaction n'ont pas une grande valeur supplémentaire pour expliquer la réponse, car le modèle est expliqué à 99.5% avec les facteurs dans le diagramme d'éboulis. Ces proportions peuvent être illustrées avec le graphique secteur suivant (figure 3.10).

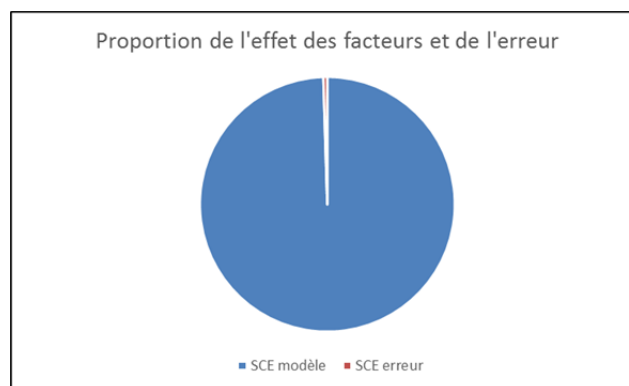


Figure 3.10 Graphique secteur de la répartition des sommes de carré

Le tableau suivant montre le résultat de l'ANOVA issu de Statistica pour les mêmes données de départ. Nous remarquons que seul le facteur A produit un effet statistiquement significatif. Nous pouvons tirer le même genre de conclusion avec le diagramme d'éboulis des sommes de carré des écarts.

Tableau 3.5 Confirmation de l'analyse visuelle par ANAVAR

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)A	8,820000	1	8,820000	196,0000	0,045396
(2)B	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
(3)C	0,045000	1	0,045000	1,0000	0,500000
1 by 2	0,045000	1	0,045000	1,0000	0,500000
1 by 3	0,080000	1	0,080000	1,7778	0,409666
2 by 3	0,080000	1	0,080000	1,7778	0,409666
Error	0,045000	1	0,045000		
<b>Total SS</b>	<b>9,115000</b>	<b>7</b>			

### 3.2.7 L'analyse de la variance (ANOVA)

Dans le cadre d'une analyse de la variance à plusieurs facteurs, nous pouvons nous fier au design expérimental documenté dans cette section. Autrement, si nous voulons tester la tendance centrale de plusieurs échantillons, nous pouvons l'estimer en utilisant des boîtes à moustache multiples. Il est évident que l'analyste ne pourra trouver de signification statistique suite à cette analyse visuelle, mais il obtiendra de bons indices. Voici un exemple avec les données du tableau 3.6 à la page suivante :

Tableau 3.6 Jeu de données  
exemple ANAVAR

	1 Var1	2 Var2
1	5	1
2	7	1
3	4	1
4	6	1
5	5	1
6	3	2
7	3	2
8	5	2
9	2	2
10	5	2
11	5	3
12	6	3
13	5	3
14	6	3
15	4	3
16	8	4
17	7	4
18	6	4
19	5	4
20	8	4

La variable « var2 » montre la segmentation de quatre sous-groupes de la variable 1 « var1 ». L'analyse de la variance issue de Statistica montre le résultat suivant :

Tableau 3.7 Tableau ANAVAR

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	551,2500	1	551,2500	400,9091	0,000000
"Var2"	25,7500	3	8,5833	6,2424	0,005205
Error	22,0000	16	1,3750		

La valeur de la probabilité est très faible. Ce test indique donc que les moyennes des sous-groupes sont statistiquement différentes. Avec les boîtes à moustaches de la figure suivante nous pourrions arriver à une conclusion semblable en comparant les pentes des points médians des boîtes une à côté de l'autre.

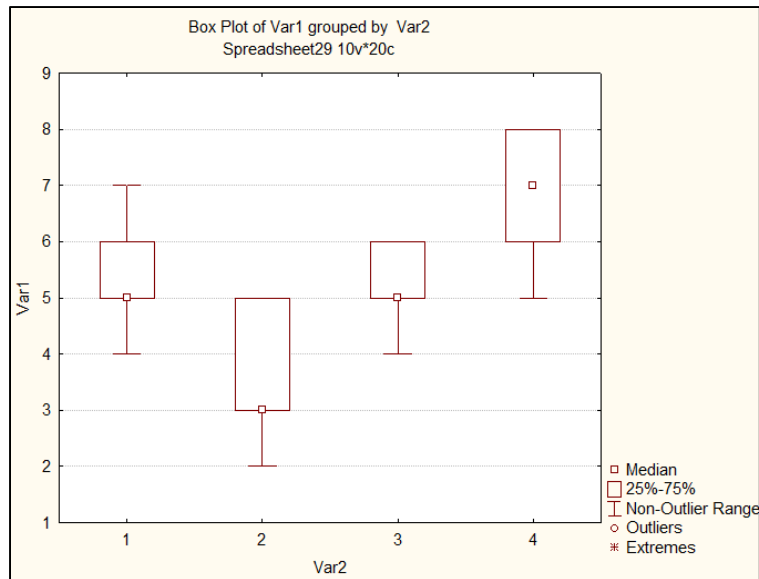


Figure 3.11 Boîte à moustache multiple

Il est certain que cet exemple est plutôt simple et que dans d'autres cas, nous ne pourrions affirmer la différence aussi facilement, mais ce serait probablement la même conclusion avec l'ANAVAR. Donc nous voulons dans une formation de base comparer les tendances centrales avec les boîtes à moustache multiples.

### 3.2.8 Analyse multi varié graphique

Ce type d'analyse s'inscrit parfaitement dans le cadre de notre coffre à outils, car elle ne repose pas sur des principes statistiques complexes. Nous avons donc considéré l'intégré tel quel dans notre boîte à outils. Il s'agit d'échantillonner pour identifier des distinctions entre les différentes familles de variations en les transposant sur un graphique. Ce type d'analyse est très pertinent pour initier un analyste à l'investigation de la variance. Voir la section 2.4.4 pour plus de détail sur l'utilisation de ce graphique.



### 3.2.9 Analyse de la régression

L'analyse de la régression sert elle aussi à expliquer un lien entre des variables comme l'analyse de la variance. Par contre, ce ne sont pas le même type de données qui sont utilisées. Dans la plupart des cas, nous utilisons la régression lorsque nous avons des données quantitatives autant comme variable explicative (X) que variable expliquée (Y). Dans le cas de l'ANOVA, nous fixions des modalités sur nos variables explicatives elles étaient alors de types qualitatifs. La régression de type logistique permet l'utilisation de variables qualitatives (variable de sortie Y), mais nous ne traiterons pas de ce type étant donnée son utilisation beaucoup moins fréquente que la régression linéaire simple ou multiple. Ces deux dernières sont utilisées sur une base plus régulière et doivent constituer l'entrée en matière de l'analyse de la régression, car ce sont les modèles les plus simples.

Ce qui intéresse les analystes logistiques est de comprendre les relations entre deux variables et ceci peut se faire en trouvant le coefficient de détermination ou encore avec l'analyse visuelle des nuages de points avec les droites qui minimise les écarts à la moyenne. Prenons l'exemple de l'ensemble de données suivantes:

Tableau 3.8 Jeu de données  
exemple de régression

y1	x1	x2	x3	x4
10	50	3	20	5
11	52	24	22	8
12	54	60	28	11
13	56	50	35	12
14	58	10	18	15
15	60	34	19	19
16	62	52	16	21
17	64	10	18	23
18	66	6	19	24
19	68	18	16	26
20	70	26	20	28
21	72	30	35	33
22	74	18	18	36
23	76	44	19	37
24	78	46	16	38
25	80	45	20	44
26	82	13	35	45
27	84	32	40	46
28	86	38	45	48
29	88	49	10	56

L'équation permettant de déterminer le coefficient de détermination est la suivante :

$$R^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (3.6)$$

Avec cette formule, il est possible d'établir la force de la corrélation entre les variables : un coefficient près de 1 indique une forte corrélation et près de zéro, elle est faible.

Tableau 3.9 Matrice de corrélation

	Y1	X1	X2	X3	X4
Y1		1,0000	0,1983	0,2116	0,9954
		(20)	(20)	(20)	(20)
		0,0000	0,4019	0,3705	0,0000
X1	1,0000		0,1983	0,2116	0,9954
	(20)		(20)	(20)	(20)
	0,0000		0,4019	0,3705	0,0000
X2	0,1983	0,1983		0,0976	0,2205
	(20)	(20)		(20)	(20)
	0,4019	0,4019		0,6824	0,3501
X3	0,2116	0,2116	0,0976		0,1748
	(20)	(20)	(20)		(20)
	0,3705	0,3705	0,6824		0,4610
X4	0,9954	0,9954	0,2205	0,1748	
	(20)	(20)	(20)	(20)	
	0,0000	0,0000	0,3501	0,4610	

Statgraphics permet de calculer les indices de détermination sur la première ligne de chaque variable. Le nombre d'échantillons observés sur la deuxième ligne et ensuite la signification statistique (p-value) sur la troisième. Nous remarquons une relation forte entre Y1-X1, Y1-X4 et X1-X4. Avec l'analyse visuelle de la matrice de nuage de points (figure 3.12) nous pouvons arriver sensiblement aux mêmes conclusions.

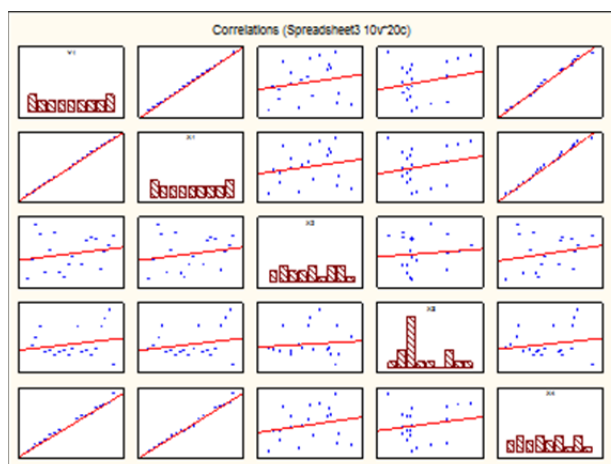


Figure 3.12 Matrice de nuage de points

Dans notre contexte, l'analyse visuelle est à privilégier, car elle répond à la nature de la boîte à outils que nous voulons concevoir. Avec ce schéma, il suffit de remarquer les graphiques pour lesquels les points semblent afficher une faible dispersion. Plus ils sont alignés, plus les deux variables sont corrélées. Une deuxième version visuelle est suggérée dans la littérature. Le principal objectif de cette analyse est de connaître la contribution des facteurs sur la variance totale d'un, ou de plusieurs, effet(s) (Brussee, 2004). Propose un outil qui peut s'avérer utile pour faire cette analyse visuellement. Il s'agit du graphique de corrélation. Ce graphique met en lien la variance des variables d'entrées par rapport à la variance de la variable de sortie. C'est par une analyse de ressemblance de courbures dans les graphiques que nous déterminons l'importance des facteurs et leur influence sur la réponse. Dans l'exemple ci-dessous (figure 3.13), trois variables sont mises en relation avec une sortie Y. chaque courbe correspond à la variance interne de la variable. Le but est de trouver des ressemblances et des opposés dans les courbures de sorte à comprendre si un facteur joue un rôle important dans la variance de la réponse.

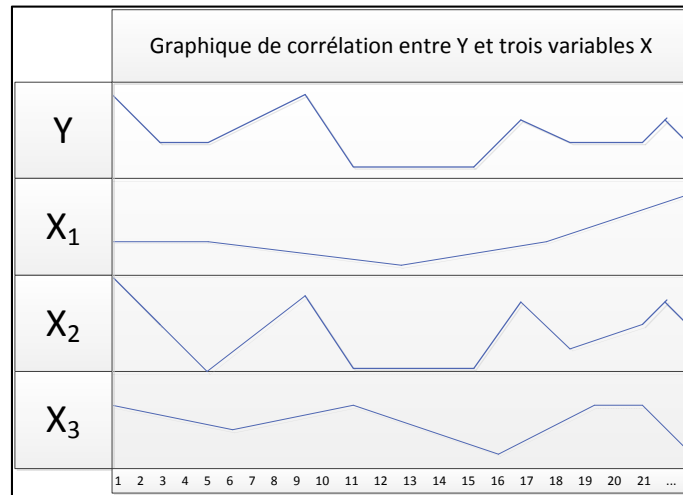


Figure 3.13 Graphique de corrélation

Dans ce cas, nous trouvons que l'allure d' $X_2$  ressemble à l'allure d' $Y$ . Autrement dit, lorsque  $X_2$  varie,  $Y$  varie aussi. Donc,  $X_2$  joue un rôle important et pour contrôler le procédé, il faut inévitablement réduire la variance de cette variable. D'autre part, les allures inverses sont aussi à identifier, car elle montre une corrélation négative. L'axe du bas représente généralement le temps. L'auteur, en page 42, explique que normalement une seule variable d'entrée se démarque des autres en montrant un effet de corrélation plus fort que les autres. Ceci indiquerait alors qu'il faudrait concentrer les efforts d'améliorations sur celle-ci. Dans le cas où aucune variable ne se démarque, il est important de réfléchir sur d'autres aspects du processus auxquels nous n'aurions pas pensé. Variables omises, changement d'employés, facteurs de bruits, etc.

De plus, il est important de comprendre que ce graphique seul ne permet pas de statuer sur une relation de cause à effet. Nous pouvons par contre affirmer, si tel est le cas, qu'un facteur semble être corrélé avec la réponse. Dépendant de l'allure et de la ressemblance des courbes nous pouvons même estimer si cette corrélation semble être faible, moyenne, forte, etc. Une estimation de corrélation n'est pas une relation de cause à effet. Cette relation est obtenue lors d'expérimentation contrôlée. Cependant, l'estimation des corrélations peut permettre de

nous indiquer quelle expérimentation faire, quels facteurs faire varier pour ainsi trouver une relation de cause à effet.

Quoi qu'il en soit, la matrice de corrélation n'est pas compliquée à comprendre et affiche plus d'information. De plus, le nuage de points est déjà utilisé lors de la corrélation simple alors nous privilégions cet outil plutôt que celui montré en figure 3.13.

### **3.2.10 Les tests d'hypothèses**

Les tests d'hypothèses sont des outils confirmatoires. C'est-à-dire qu'ils servent normalement à établir une probabilité sur une hypothèse : sur l'adéquation à une loi de distribution par exemple. Ces outils sont de natures statistiques et demandent généralement des connaissances de niveau universitaire. Ces outils ne sont donc pas qualifiés pour notre boîte à outils. D'ailleurs, tous les outils présentés plus tôt ne requièrent aucune adéquation à une loi de distribution ou encore un test de proportion, de moyenne, etc. Les outils présentés sont de nature visuelle et nous acceptons le compromis du doute pour la facilité d'utilisation. L'utilisateur pourrait très bien générer un diagramme de boîtes à moustache multiple pour affirmer ou infirmer que les moyennes de plusieurs échantillons sont semblables ou pas au lieu de faire un test d'hypothèse de Student (test t). Un test d'hypothèse sera toujours plus discriminant qu'une analyse visuelle, mais sa compréhension met en relation beaucoup de théories pour qu'elle soit initialement enseignée à un débutant. Une fois confronté à une décision difficile à prendre, l'utilisateur sera déjà en mesure de comprendre son utilité et sa raison d'être. La sélection d'outils contenue dans la boîte simplifiée permet toujours d'avoir une alternative à l'utilisation d'un test d'hypothèse, mais sans le pouvoir discriminant de ces derniers.

### **3.2.11 L'échantillonnage**

L'échantillonnage peut devenir facilement technique et il est possible de trouver des références entières sur le sujet. Pour l'utilisation de notre coffre à outils, nous formulerons les principes de base pour assurer une prise de sujets qui assure la valeur de l'analyse qui en découlera.

L'analyste doit avoir une idée des facteurs qui influencent la valeur de la variable qui est collectée. Ces facteurs doivent être sous contrôle de l'analyste lors de la collecte si l'analyste veut pouvoir stratifier ses résultats. Autrement, il risque d'obtenir des valeurs sans pouvoir interpréter les distinctions de variances.

De plus, pour capter le plus possible la variance naturelle du procédé, l'analyste doit élaborer un plan d'échantillonnage qui vise une collecte aléatoire à travers les valeurs que les facteurs peuvent prendre. De cette façon, nous pouvons analyser les données pour comprendre leur effet en segmentant par type ou valeur de facteur.

L'initiation à la méthode d'échantillonnage se limitera à ceci, car si nous voulons aller plus loin nous intégrerons des notions plus complexes comme l'intervalle de confiance et un nombre à prélever. Ces notions requièrent la compréhension de loi statistique et elles ne sont pas permises dans ce prototype de coffre à outils. L'analyste devra prélever suffisamment de sorte qu'une tendance ressorte. Il peut toujours confirmer son analyse en faisant une répétition du plan de collecte de données. Voir la section 2.4.7 pour plus d'information.

### **3.2.12 Les cartes de contrôle**

L'utilisation classique des cartes de contrôle inclut des notions statistiques. La représentation visuelle des cartes permet de voir des tendances qui pourraient s'installer dans le processus.

Par contre, les limites statistiques ne peuvent faire partie de notre démarche, car elle se rapporte à la notion de distribution et au calcul de l'écart type du procédé. De plus, dans le but de faciliter l'initiation nous suggérons deux cartes seulement. Une pour les données de type quantitatives et l'autre pour des données qualitatives.

Dans le cas d'une carte quantitative, nous suggérons d'utiliser la carte présentée à la section 3.3.6 sur les indices d'aptitudes avec les mêmes conditions d'utilisation. C'est-à-dire, entre 5 et 9 sujets par échantillons. Les boîtes à moustaches multiples permettent de visualiser une tendance entre les échantillons tandis que les tolérances clients indiquent le seuil à ne pas dépasser. Le fait de voir l'étendue des échantillons permet d'obtenir une idée de la variance à l'intérieur de chaque sous-groupe. Ceci est suffisant pour avoir un aperçu de la stabilité de notre procédé. En remarquant un ou des échantillons qui se rapprocheraient, des tolérances du client permettraient le constat d'une investigation nécessaire pour améliorer le procédé. Ce graphique combine le visuel de deux cartes de contrôle bien connues. Les cartes  $\bar{X}$  et  $r$ , car les boîtes à moustaches multiples montrent la tendance centrale ainsi que l'étendue sur la même carte.

Par contre, ceci implique que nous pouvons toujours segmenter les données en sous-groupe. Si ce n'est pas le cas, l'analyste devra utiliser un graphique de série chronologique.

Dans le cas d'un contrôle qualitatif, nous choisissons une carte qui pourra montrer les proportions de non-défauts. Le prototype est comparable à une carte  $p$ , mais encore une fois nous faisons abstraction de la notion de limite statistique pour les mêmes raisons qu'expliquer pour la carte précédemment proposée. L'analyste devra plutôt interpréter les moments de variations qui, selon lui, semblent inexplicables et creuser pour en connaître les causes. Comme la carte précédente, cette carte présente un seuil de proportion de non-conformité limite. Alors l'utilisateur aura quand même une idée à savoir si des ajustements ou des améliorations sont à prévoir pour répondre à l'objectif.

Pour obtenir une bonne représentation avec ce type de carte (Baillargeon, 2001, p. 417) propose une série entre 20 et 30 échantillons sur la carte. Chaque sous-groupe doit contenir entre 50 et 200 sujets.

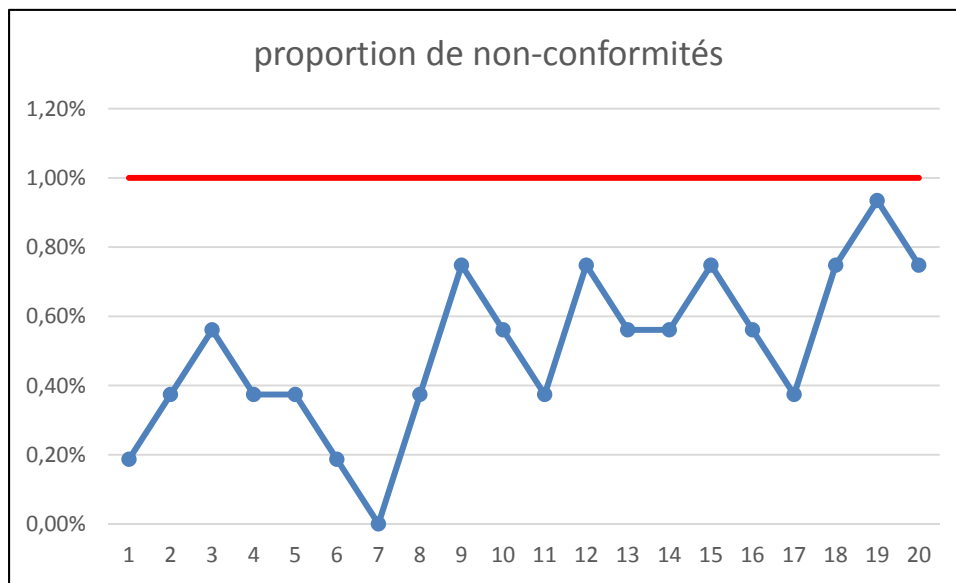


Figure 3.14 Prototype de carte de contrôle qualitatif

Nous pensons que ces deux types de cartes pourront répondre à une grande majorité des cas de figure vue en industrie. Autrement, l'analyste aura une bonne base pour s'initier aux autres cartes.



### 3.3 Synthèse de la sélection des outils

La figure suivante montre les outils du chapitre trois selon les types d'opérations que nous pouvons faire avec des données. Nous remarquons que ce qui se trouve sous décrire est inchangé avec ce que nous trouvions initialement. Seuls les tests d'hypothèses ont été retirés. L'analyse multi varié est restée inchangé tandis que tous les autres outils ont été modifiés dans le but de répondre aux critères d'admissibilités de notre coffre à outils.

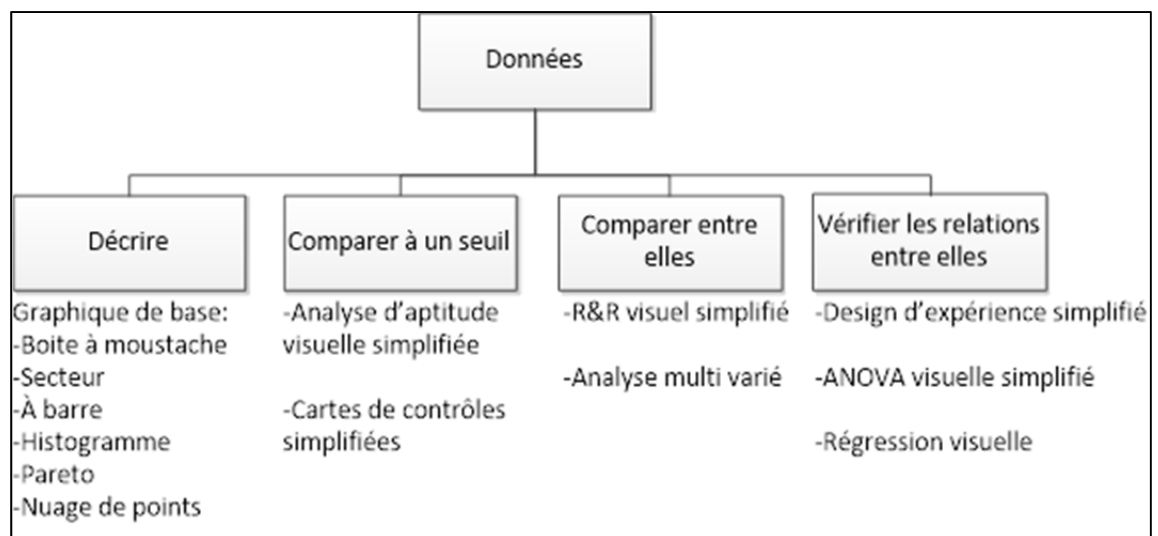


Figure 3.15 Diagramme des outils simplifiés par objectifs



## **CHAPITRE 4**

### **COMPARAISON DES COFFRES À OUTILS**

Ce chapitre porte sur l'évaluation du coffre à outils proposé au chapitre précédent en comparant les démarches classique et simplifiée selon la méthodologie présentée à la section 1.5. De plus, nous testerons la capacité à résoudre des études de cas de la version simplifiée avec quelques exemples. De manière plus générale, nous comparons aussi les deux méthodologies selon plusieurs critères de performance pour avoir une idée plus objective sur les gains et les pertes associés au coffre à outils proposé.

#### **4.1 Évaluation du coffre à outils simplifiés**

##### **4.1.1 Pondération des critères**

Comme mentionné en section 1.5 nous utilisons la méthodologie AHP pour déterminer la préférence d'un des deux coffres à outils. Cette préférence permettra de nous indiquer si la conception d'un tel coffre à outils semble pertinente à des avancements ultérieurs.

La pondération des quatre critères a été réalisée en établissant une priorité d'importance de chacun d'eux et ensuite une comparaison par paires pour trouver leur pondération normalisée. Voici l'ordre d'importance que nous avons accordée:

- 1- La facilité de compréhension;
- 2- La facilité de sélection;
- 3- Le compromis sur la capacité à résoudre;
- 4- Le temps de formation.

Le premier critère est le plus important, car nous misons sur une meilleure rétention des connaissances et nous croyons que c'est celle-ci qui permettra une application plus grande et accessible de la démarche. Ce critère combiné avec la facilité de sélection sont des causes principales de l'échec de la démarche SS. Ce qui explique aussi le choix de la deuxième position. Nous considérons le compromis sur la capacité à résoudre plus important que le temps de formation requis simplement, car il est plus important que nous puissions résoudre des problèmes quitte à passer un peu plus de temps en formation. Pour l'analyse qui suit, nous avons utilisé le logiciel Expert Choice 2000 pour effectuer les calculs relatifs à la méthodologie AHP. Voici comment se répartissent ces priorités lorsqu'elles sont évaluées en pair :

	TempsForr	FacilitéCon	FacilitéSél	Compromis
TempsFormation (L: 1,000)		6,0	5,0	2,0
FacilitéCompréhension			2,0	4,0
FacilitéSélection				2,0
CompromisRésolution	Incon: 0,01			

Figure 4.1 Comparaison en paires des critères d'évaluation

Ce qui nous permet de trouver les pondérations suivantes :

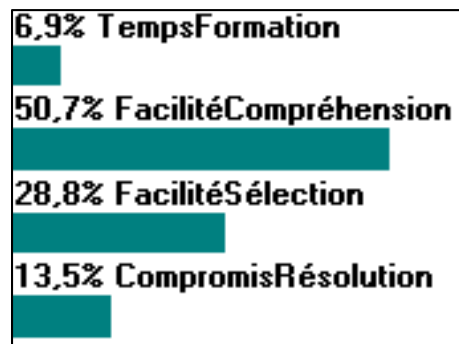


Figure 4.2 Pondération des critères

Cette pondération respecte nos priorités et elle est acceptable étant donné un indice d'incohérence de 0.01.

#### 4.1.2 Pondération des alternatives pour chaque critère

L'évaluation des coffres à outils classiques et simplifiés en fonction de ces critères a été produite par les réponses du panel d'expert comme expliqué à la section 1.5. Le tableau 4.1 montre les résultats obtenus : Pour les questions 1, 2 et 4 il s'agit d'une échelle qui exprime l'estimation du nombre de fois qu'est plus efficace le coffre simplifié. Tandis que, pour la question 3, il s'agit d'un pourcentage de problème que nous pourrions résoudre avec le coffre simplifié dans l'étendue estimée des problèmes que nous pouvons rencontrer. La dernière colonne est la note attribuée pour utilisation dans le modèle AHP. Cette note représente la tendance centrale par moyenne géométrique des réponses obtenues. Il est à noter que pour la question 3, nous trouvons que le coffre à outils simplifié est moins efficace que le classique et est identifié en bleu. Dans les autres cas, le coffre simplifié est préféré et est identifié en rouge. Nous avons alors utilisé la valeur inverse pour la question 3. Les graphiques suivants (figure 4.3) montrent le résultat :

Questions	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Moyenne géométrique	Pondération AHP
1-Compréhension	4	4	2	4	3,4	3,4
2-Sélection	5	3	3	4	3,7	3,7
3-Résolution	85	85	75	75	79,8	1,3
4-Temps formation	4	2	3	5	3,3	3,3

Tableau 4.1 Évaluation des alternatives par les experts

Questions	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Moyenne géométrique	Pondération AHP
1-Compréhension	4	4	2	4	3,4	3,4
2-Sélection	5	3	3	4	3,7	3,7
3-Résolution	85	85	75	75	79,8	1,3
4-Temps formation	4	2	3	5	3,3	3,3

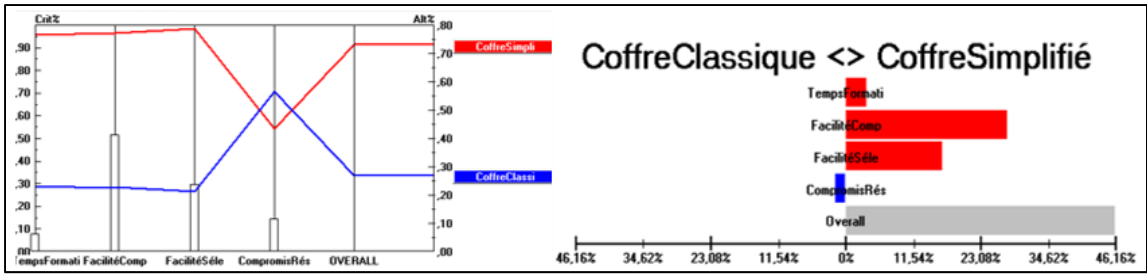


Figure 4.3 Résultats de l'évaluation AHP

Nous voyons l'écart des préférences entre les deux. Les trois premiers critères sont préférés pour le coffre à outils simplifié. Nous voyons que selon ces critères, seul le compromis à la résolution est moins bon et de peu. Tous critères confondus, nous trouvons que le coffre simplifié est préféré d'environ 45%. Ce résultat est encourageant dans la poursuite de l'investigation et de la préparation d'une formation utilisation la version simplifiée.

4.1.3 Équilibre de la préférence

Le seul critère pouvant faire basculer la préférence vers le coffre à outils classique est le compromis effectué sur la capacité à résoudre des problèmes. Les outils classiques permettent la résolution d'un plus grand étendue de problèmes. L'analyse de sensibilité suivante montre l'équilibre de la préférence.

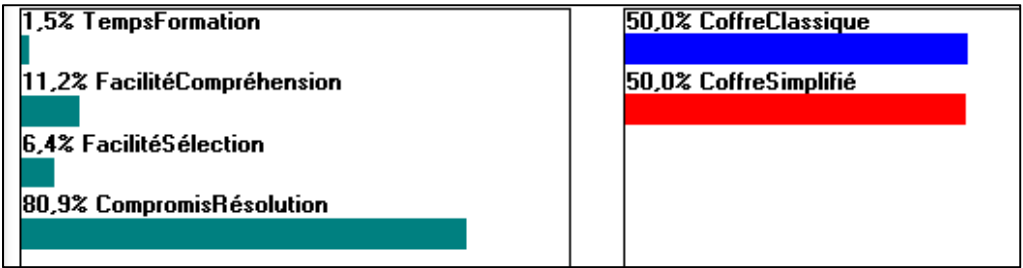


Figure 4.4 Équilibre de la préférence

Pour que le coffre classique soit préféré, le compromis sur la résolution doit passer à plus d'environ 81% de la décision. C'est-à-dire que l'importance accordée à l'étendue des problèmes solvables est de loin le critère le plus important. Ce qui nous rappelle bien la démarche classique actuelle avec ses nombreux outils et techniques.

#### **4.1.4 Commentaires des experts**

Les experts ont apporté plusieurs commentaires pertinents à leurs réponses au questionnaire. Ils sont unanimes sur le fait qu'une formation de ce coffre à outils simplifiés serait nécessairement plus simple en ce qui concerne le traitement des données et la séquence de l'analyse, mais la compréhension reste autant complexe pour l'interprétation des résultats et les objectifs visés par l'analyse en question. Ce commentaire est aussi valide pour la deuxième question concernant la quantité d'outils. Il est vrai qu'un moins grand nombre d'outils facilite la sélection selon les experts, mais à condition que l'utilisateur en comprenne bien les objectifs. Les commentaires sont diversifiés sur la capacité de résolution de problèmes du coffre simplifié. Il semblerait que l'industrie de service requiert moins souvent l'utilisation de statistiques rigoureuse et même dans ce contexte on se pose la question de la validité de la simplification, car seuls les outils Lean résolvent la grande majorité des problèmes. La signification statistique est peu importante selon un autre, car nous devrions voir un écart évident dans nos données pour que l'effort de changement en vaille la peine. Si on se pose la question sur la signification statistique, ne serait-il pas mieux de trouver d'autres opportunités d'amélioration? À l'exception d'entreprise ayant des fréquences de flux très grand ou une faible variation pourrait faire perdre des millions de dollars. D'ailleurs ce commentaire en rejoint un autre. Un des experts pense que la petite entreprise est plus susceptible d'être intéressée par la version simplifiée. Ceci semble plutôt logique, car la grande entreprise serait normalement plus mature sur la quantification de ses processus et l'emmagasiner de données. Ce qui permettrait des analyses plus exhaustives. Finalement le temps de formation serait grandement affecté à la baisse par l'enseignement des concepts nécessaires pour le coffre simplifié. Ceci pourrait permettre d'approfondir sur des exemples

d'applications et des études de cas pratique pour mieux encrer les connaissances transmises. En réduisant le nombre de concepts sans changer le temps de formation en intégrant plus de pratique nous pourrions sans doute améliorer la compréhension des objectifs de chacun des outils. Les utilisateurs seraient en mesure de mieux comprendre l'application dans leur contexte de travail et ainsi augmenter l'utilisation de la démarche.

## 4.2 Sondage sur l'impression des étudiants

Nous avons présenté le prototype aux étudiants en fin de parcours en génie des opérations et de la logistique dans le cadre du cours de management de la qualité (GOL615). Cette présentation était adaptée pour les étudiants du baccalauréat, mais contenait essentiellement les mêmes concepts que pour les experts. Suite à cette présentation d'une durée de deux heures, nous en avons profité pour poser quelques questions dont le questionnaire est disponible à la deuxième annexe. Les résultats de ce sondage appuient davantage l'utilisation d'une trousse d'outil simplifié.

Tableau 4.2 Résultat du sondage des étudiants

Répondants/questions	1- Crédits réussis	2-nbStages	3-Utilisation stat.	4-Résolution sans stat.	5- Confiance utilisation stat.	6- Utilité coffre simplifié
1	d	2	non	c	non	4
2	d	2	non	c	oui	4
3	d	2	non	c	oui	4
4	d	3	non	d	non	5
5	d	3	oui	c	non	5
6	d	3	oui	b	non	4
7	d	2	non	a	oui	4
8	c	1	non	c	non	5
9	d	2	non	c	non	5

Des neuf étudiants sondés, seulement deux ont eu recours à des outils inclus dans la formation classique de SS et pourtant ces deux étudiants ont aussi répondu qu'ils ne sentent pas en confiance face à l'utilisation de tels outils. Ces deux mêmes sujets ont trois stages réalisés. D'ailleurs, même après plus de 90 crédits réalisés au baccalauréat le tiers des étudiants sondés ne sentent pas à l'aise avec l'utilisation d'outils statistiques classiques. Les neuf étudiants sondés pensent que le prototype présenté pourrait leur être utile dans le cadre d'un emploi ultérieur. Ils ont tous répondu soit 4 ou 5 étant très utile.



Ces étudiants ont plus de trois ans de formation, dont plusieurs cours portant sur l'utilisation de la statistique, et pourtant les deux tiers ne se sentent pas en confiance. Ces résultats vont dans le même sens que la cause d'échec de la démarche liée à l'éducation à l'exception que la formation BB s'enseigne en quatre semaines. Ceci montre un appui intéressant en faveur du prototype suggéré particulièrement dans un contexte de formation accélérée.

### **4.3 Évaluation des logiciels de soutien à la démarche**

L'ASQ exige l'utilisation de Minitab dans le cadre de leur certification classique pour mener à bien les projets SS. Ce logiciel sert de soutien à tous les calculs et illustration des données touchant les projets se rapportant à la gestion de la qualité. Plusieurs logiciels permettent de faire de l'analyse graphique et statistique. Cette revue et évaluation validera si un support logiciel semble adéquat pour permettre une utilisation ultérieure dans le cadre d'une formation portant sur le coffre à outils simplifiés. Un logiciel adapté au coffre à outils simplifié ne possède pas exactement les mêmes outils. D'ailleurs, le prototype simplifié ne met pas l'emphasis sur la statistique : ceci devrait idéalement se refléter dans un logiciel adapté. Il est facile de se perdre dans les options d'analyses lorsqu'il y en a beaucoup.

Nous avons segmenté l'évaluation selon les trois grands critères suivants:

- 1- Le fonctionnement. Il valide la possibilité d'utiliser les outils simplifiés. Une note de 0 indique que le logiciel ne permet pas l'utilisation de cet outil. Tandis que la note de 4 nous permet non seulement d'utiliser l'outil, mais de le faire selon toutes les attentes du graphisme espéré du coffre à outils simplifié. La note de deux indique que l'outil peut être utilisé sans toutefois se faire selon les méthodes espérées du prototype. La note de passage est de 3. Un logiciel ayant au moins 3 pour tous les outils permet une adéquation correcte au prototype.

- 2- La convivialité est une caractéristique importante dans le cadre de méthodes d'analyses simplifiées. Le contraire serait inconséquent et pourrait mener à la démotivation des initiés. Nous notons la simplicité intuitive avec laquelle il est possible de naviguer dans le logiciel et produire les graphiques et analyses espérés. La quantité d'options est aussi une caractéristique importante. Il s'agit d'un certain équilibre entre la flexibilité et la confusion qui s'y rattache. Finalement, nous validons la facilité de traverser les étapes d'une analyse à travers la robustesse du logiciel à guider l'utilisateur.
  
- 3- Le coût. Même s'il s'agit du critère ayant la pondération la moins importante, ceci n'en fait pas un critère négligeable, car une licence de logiciel peut varier d'un coût d'acquisition de 0 à près de 20 000\$ selon les options. Généralement pour notre besoin, nous ne dépassons pas les options de base. D'ailleurs, si un logiciel de base ne permet pas une utilisation en adéquation avec le prototype, ses options ne le permettront pas davantage. De bases les prix varient entre 0 et 2000\$ environ. L'échelle de 0 à 10 est inversement proportionnelle au prix avec un pas de 200\$. C'est-à-dire qu'un logiciel ayant un prix d'acquisition de 0 à 200\$ exclusivement se verra attribuer une note de 10.

La pondération des critères met l'accent sur le fonctionnement en lui attribuant la moitié de la décision. La convivialité détient 32% de la décision tandis que le coût 18%. Cette pondération est discutable et subjective. L'objectif n'est pas de prendre une décision formelle d'un logiciel à utiliser, mais plutôt d'identifier les forces et faiblesses de chacun. Il est possible qu'aucun des logiciels ne soit admis. Dans un tel cas, ceci pourra servir d'inspiration pour le développement futur d'une application personnalisée.

Les résultats de la grille complète d'évaluation sont disponibles à l'annexe 2. Voici un sommaire des résultats :

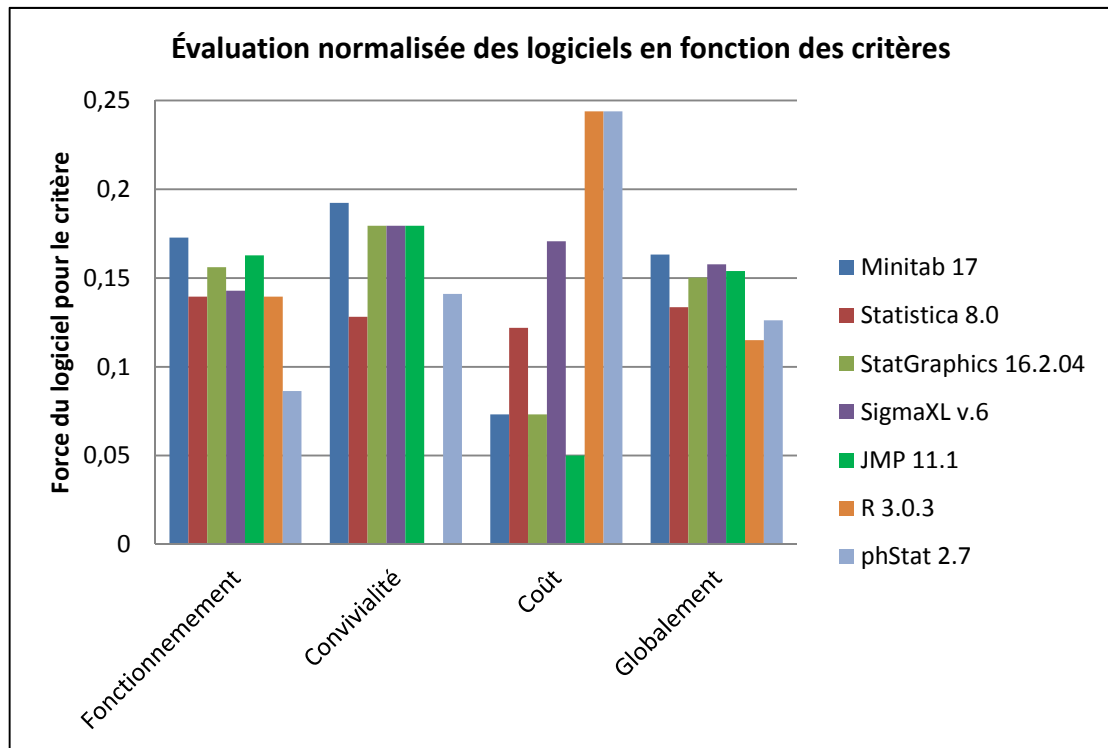


Figure 4.5 Résultat normalisée de l'évaluation des logiciels

La figure 4.5 présente les résultats normalisés de l'évaluation des logiciels en fonction de chaque critère. C'est-à-dire que pour chaque critère, la somme des évaluations est égale à 1 et que chaque bâton représente la force relative du logiciel par rapport aux autres.

À première vue, nous pouvons dire que l'ASQ utilise le meilleur logiciel pour notre application. Selon notre pondération, Minitab se classe globalement au premier rang. Effectivement, il est le meilleur en ce qui concerne le fonctionnement et la convivialité. Par contre, il arrive au dernier rang considérant le coût d'acquisition. D'ailleurs, Minitab permet de faire presque toutes les analyses et les graphiques que nous souhaitons réaliser dans notre prototype sauf pour le design expérimental. Dans ce contexte, nous pouvons aussi affirmer

qu'aucun des logiciels évalués ne respecte totalement les attentes espérées. La force de Minitab réside dans la stratification plutôt simple des données pour les visualiser. D'autant plus, qu'il est facilement possible d'ajouter des éléments graphiques comme une ligne de références par exemple. Ce qui a permis d'obtenir tous les points pour l'outil de carte de contrôle. Le meilleur rival à ce sujet est certainement JMP, car il intègre un constructeur de graphique personnalisé. Il est toutefois moins facile à utiliser, mais permet une flexibilité intéressante dans la stratification des données. StatGraphics est aussi dans la même catégorie que Minitab, mais est moins flexible sur la visualisation des données. R devrait être disqualifié à une utilisation telle quelle, car ce logiciel s'adresse principalement à des programmeurs. D'ailleurs, il a obtenu 0 en pour la convivialité. Il possède plusieurs ensembles d'analyse par interface graphique telle que « Rcmdr », mais elles ne couvrent pas toutes les fonctionnalités désirées et ne sont pas simples d'utilisation : le fichier de données doit être chargé à part, les options graphiques sont limitées à l'affichage, etc. Par contre, il offre peut-être un environnement de développement intéressant pour la programmation d'une interface graphique personnalisée à notre prototype. Sa vocation libre de licence est sa force. Plusieurs ensembles de base tels que « lattice » et « PBSmodelling » permettraient la réalisation d'une interface graphique pour effectuer la visualisation de données telles que nous le souhaitons. Le travail de conception, programmation et de déploiement à réaliser est toutefois considérable. PhStat est un simple utilitaire statistique intégré à Excel. Son utilisation est plutôt axée sur les calculs statistiques. L'autre extrême en termes de calcul statistique est Statistica. Ce dernier offre un environnement fort puissant pour l'analyse statistique et aussi de visualisation de données. Par contre, les options et types d'analyse sont très nombreux et nécessitent une formation avancée pour naviguer sans souci dans ce type de logiciel. Finalement, SigmaXL offre des opportunités intéressantes, car il est intégré à Excel, mais est plutôt complet aussi. Ce logiciel exploite bien les limitations d'Excel en proposant des analyses graphiques en pair sur plusieurs graphiques. Quoique ce genre d'amalgame soit difficilement exportable dans un rapport, il permet quand même une visualisation des données. Son coût d'acquisition compense ces compromis si nous le comparons à Minitab.

Sachant qu'aucun des logiciels n'offre parfaitement une adéquation à nos espérances, l'idéal serait un développement sur mesure inspiré de plusieurs forces recensées lors de l'évaluation. La grandeur de l'application pourrait s'apparenter à PhStat. Nous voyons toutefois avec SigmaXL que l'environnement d'Excel contient des limitations importantes concernant la visualisation des données. L'environnement de programmation qu'offre R n'est pas nécessairement souhaitable étant donné la vocation non statistique du coffre à outils simplifié. Il ne me semble pas plus simple d'utiliser l'environnement proposé par R que de partir à zéro. D'autant plus qu'un développement nouveau permettrait de mieux montrer le caractère unique de ce type de logiciel ne s'adressant plus à des statisticiens, mais plutôt à des professionnels de l'amélioration continue. Autrement, si le coût n'est pas perçu comme étant un facteur important, l'option Minitab reste la meilleure justement, car il est le seul à être axé d'abord sur la gestion de la qualité et ensuite sur la statistique. Les autres logiciels sont d'abord axés sur la statistique et intègrent la gestion de la qualité.

#### **4.4 Comparaison des méthodologies par des études de cas**

Les études de cas présentées dans cette section sont issues de manuels de référence en du domaine de l'amélioration continue. Les analyses classiques sont produites par des logiciels d'analyse statistique reconnus tandis que l'analyse simplifiée est produite dans Excel. Les graphiques ne sont pas tous disponibles dans Excel et dans plusieurs cas, il s'agit de prototype. Certaines informations sont ajoutées aux graphiques dans le but de les rendre conformes à la proposition de la boîte à outils du chapitre 3.

##### **4.4.1 Étude de cas 1 : design d'expérience**

Voici le problème 6.1 proposé par (Montgomery, 2008, p. 264). Il s'agit de voir l'influence de la vitesse de coupe (facteur A), la géométrie de l'outil (facteur B) et de l'angle de coupe (facteur C) sur la durée de vie de la machine. L'auteur fournit la table de données incluant

trois réplifications du plan complet à trois facteurs. Plusieurs questions sont posées, mais dans notre cas, nous ferons l'analyse complète du plan.

#### 4.4.1.1 Résolution classique du problème avec Statistica 8.0

En premier lieu, il faut bien connaître les menus ainsi que les options de Statistica pour naviguer aisément dans ce logiciel. Dans le module des plans d'expérience, beaucoup d'options sont offertes pour faire l'analyse de différentes situations. Voici la matrice des effets générés en sélectionnant un plan complet à trois facteurs et trois réplifications. Incluant les résultats, il s'agit du plan de base pour procéder à l'analyse du plan.

Tableau 4.3 Cas 1, matrice des essais avec Statistica

Standard Run	Design: 2**(3-0) design (Spreadsheet29)				
	Replicat	A	B	C	Résultats
1	1	-1,00000	-1,00000	-1,00000	22
2	1	1,00000	-1,00000	-1,00000	32
3	1	-1,00000	1,00000	-1,00000	35
4	1	1,00000	1,00000	-1,00000	55
5	1	-1,00000	-1,00000	1,00000	44
6	1	1,00000	-1,00000	1,00000	40
7	1	-1,00000	1,00000	1,00000	60
8	1	1,00000	1,00000	1,00000	39
9	2	-1,00000	-1,00000	-1,00000	31
10	2	1,00000	-1,00000	-1,00000	43
11	2	-1,00000	1,00000	-1,00000	34
12	2	1,00000	1,00000	-1,00000	47
13	2	-1,00000	-1,00000	1,00000	45
14	2	1,00000	-1,00000	1,00000	37
15	2	-1,00000	1,00000	1,00000	50
16	2	1,00000	1,00000	1,00000	41
17	3	-1,00000	-1,00000	-1,00000	25
18	3	1,00000	-1,00000	-1,00000	29
19	3	-1,00000	1,00000	-1,00000	50
20	3	1,00000	1,00000	-1,00000	46
21	3	-1,00000	-1,00000	1,00000	38
22	3	1,00000	-1,00000	1,00000	36
23	3	-1,00000	1,00000	1,00000	54
24	3	1,00000	1,00000	1,00000	47

L'analyse des résultats par la méthodologie classique passe par une analyse de la variance à plusieurs facteurs. Dans la figure suivante, nous pouvons voir que le facteur B est hautement significatif, suivi de l'interaction AC et finalement le facteur C. Les trois ont une valeur p-value plus petite que 0.05. Le modèle présenté inclut les interactions double et triple. Nous remarquons que ce modèle explique 77% de la variance ( $R\text{-sqr}=0.76993$ ).

Tableau 4.4 Cas 1, matrice des effets avec Statistica

ANOVA; Var.: Résultats; R-sqr=,76993; Adj.: ,6 3 factors at two levels; MS Residual=34,4345 DV: Résultats					
Factor	SS	df	MS	F	p
Blocks	0,583	2	0,2917	0,00847	0,991571
(1)A	0,667	1	0,6667	0,01936	0,891320
(2)B	770,667	1	770,6667	22,38064	0,000322
(3)C	280,167	1	280,1667	8,13621	0,012789
1 by 2	16,667	1	16,6667	0,48401	0,497998
1 by 3	468,167	1	468,1667	13,59585	0,002438
2 by 3	48,167	1	48,1667	1,39879	0,256623
1*2*3	28,167	1	28,1667	0,81798	0,381072
Error	482,083	14	34,4345		
<b>Total SS</b>	<b>2095,333</b>	<b>23</b>			

Le graphique de Pareto suivant est la version visuelle du graphique de l'ANOVA

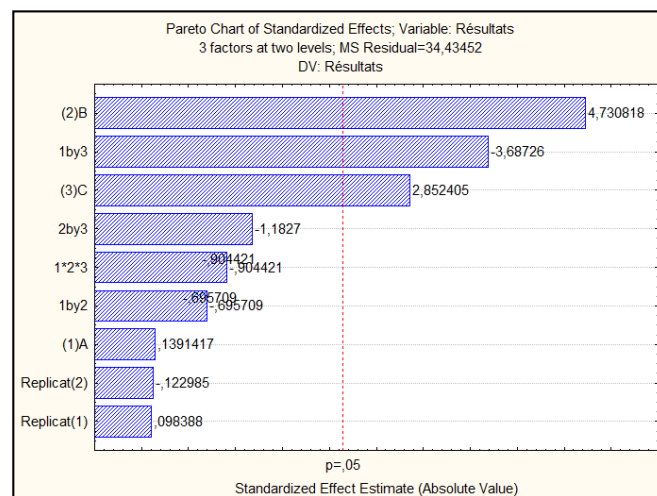


Figure 4.6 Cas 1, Diagramme de Pareto des effets

La méthode classique exige une vérification des données par l'analyse des résidus. Nous devons nous assurer qu'ils soient distribués normalement, indépendants et que les variances soient homogènes.

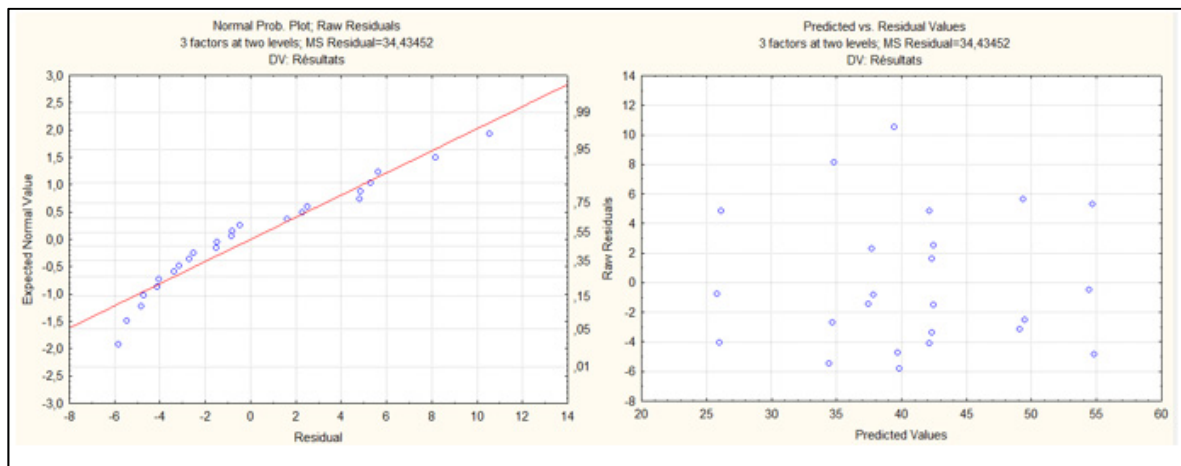


Figure 4.7 Cas 1, Analyse des résidus

Le graphique de probabilité normale (figure 4.7 à gauche) ne n'affiche pas de particularité inquiétante. Il ne semble pas y avoir de données aberrantes. L'homogénéité et l'indépendance sont aussi validées avec le graphique des résidus prédits versus le résidu brut. Les résidus n'affichent rien de troublant: ils sont distribués de manière aléatoire et homogène (figure 4.7 à droite) donc aucune partie de l'échantillon n'est complètement à l'écart des résultats attendus. Cette analyse permet d'avoir l'assurance que l'échantillon utilisé est valide pour une interprétation adéquate des résultats.



#### 4.4.1.2 Résolution selon le coffre à outils simplifié

Les données de base sont sensiblement dans le même format par contre la résolution simplifiée se base uniquement sur la somme de carré des écarts et peut être directement calculé à la fin du tableau.

Tableau 4.5 Cas 1, matrice des essais méthode simplifiée

Matrice des effets							
blocs/facteurs	A	B	C	AB	AC	BC	résultat
1	-1	-1	-1	1	1	1	22
1	1	-1	-1	-1	-1	1	32
1	-1	1	-1	-1	1	-1	35
1	1	1	-1	1	-1	-1	55
1	-1	-1	1	1	1	-1	44
1	1	-1	1	-1	1	-1	40
1	-1	1	1	1	-1	1	60
1	1	1	1	1	1	1	39
2	-1	-1	-1	1	1	1	31
2	1	-1	-1	-1	-1	1	43
2	-1	1	-1	-1	1	-1	34
2	1	1	-1	1	-1	-1	47
2	-1	-1	1	1	1	-1	45
2	1	-1	1	-1	1	-1	37
2	-1	1	1	1	-1	1	50
2	1	1	1	1	1	1	41
3	-1	-1	-1	1	1	1	25
3	1	-1	-1	-1	-1	1	29
3	-1	1	-1	-1	1	-1	50
3	1	1	-1	1	-1	-1	46
3	-1	-1	1	1	1	-1	38
3	1	-1	1	-1	1	-1	36
3	-1	1	1	1	-1	1	54
3	1	1	1	1	1	1	47
SCE facteur	0,67	770,67	280,17	16,67	468,17	48,17	

Un deuxième tableau synthèse permet de produire le graphique qui montre la proportion de la variabilité expliquée par le modèle. Ce graphique permet à l'utilisateur de savoir si les facteurs étudiés sont révélateurs.

Tableau 4.6 Cas 1, proportion des sommes de carré

	SCE	Proportion
Modèle	1584.5	0.76
Erreur	510.8	0.24
Total	2095.3	1

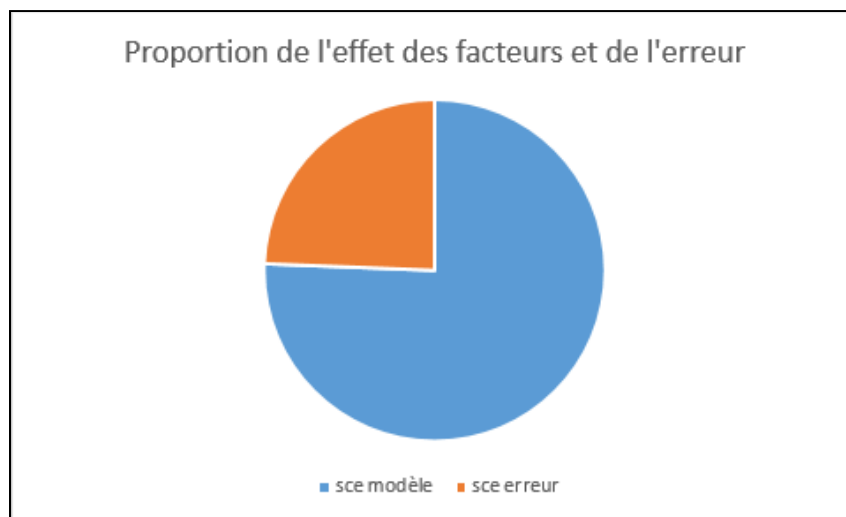


Figure 4.8 Cas 1, Graphique des proportions des sommes de carré

Nous remarquons rapidement que les facteurs à l'étude représentent le trois quarts de la variance du système. C'est-à-dire qu'environ le quart de la variance n'est pas expliqué par les facteurs à l'étude. Finalement, un dernier graphique nous permet de voir les facteurs influents.

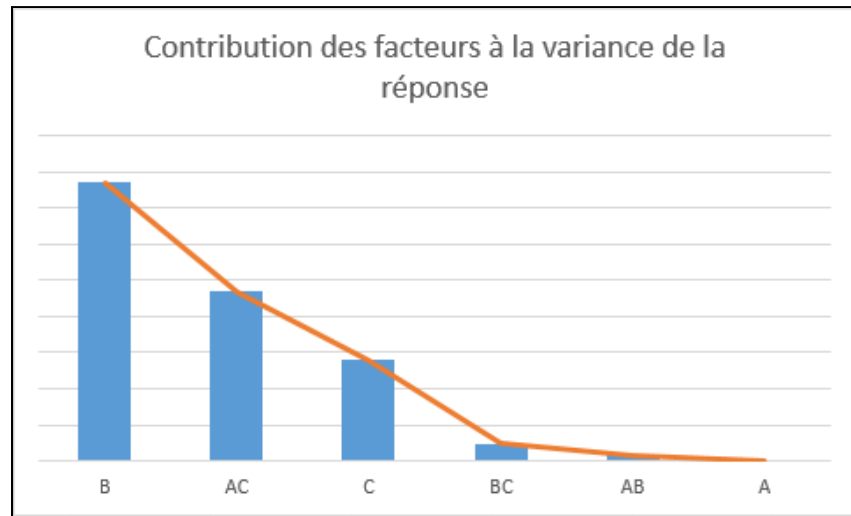


Figure 4.9 Cas 1, Diagramme d'écroulement des sommes de carré

Nous remarquons la présence d'un coude entre la barre C et BC. Ce qui signifie que tous les facteurs à gauche de BC sont significatifs. Nous arrivons alors aux mêmes résultats qu'avec l'analyse classique. Soit que la géométrie de l'outil (B) est déterminante, que la combinaison de la vitesse et de l'angle de coupe (AC) sont importantes et que l'angle de coupe (C) est important à lui seul.

#### 4.4.2 Étude de cas 2 : contrôle de procédé

Voici un exemple du contrôle d'un procédé pour lequel nous suivons la mesure de la dureté d'une pièce. L'exemple ainsi que le tableau de données sont disponibles à l'exemple 7.1 de la référence suivante (Baillargeon, 2001, p. 333). L'entreprise désire suivre statistiquement le procédé par une carte Xbar et R. D'ailleurs les spécifications du client sont entre 262-302 sur l'unité de mesure de dureté HB. L'entreprise a recueilli vingt échantillons de cinq unités prélevées de manière régulière dans le temps selon le tableau de données suivant :

Tableau 4.7 Cas 2, données de base  
Tiré de (Baillargeon, 2001, p. 333)

E1	277	269	277	269	277
E2	285	269	277	269	285
E3	293	277	269	277	269
E4	277	269	277	269	285
E5	285	285	285	269	285
E6	269	285	269	285	285
E7	277	285	269	285	285
E8	277	285	277	285	285
E9	285	277	285	277	277
E10	285	277	277	285	285
E11	277	283	285	277	285
E12	277	285	281	277	285
E13	285	277	285	285	277
E14	269	277	277	285	277
E15	285	277	285	277	293
E16	271	280	275	283	285
E17	276	285	279	280	285
E18	277	269	282	285	279
E19	281	274	285	277	290
E20	271	287	275	283	285

#### 4.4.2.1 Résolution classique du problème avec Statistica 8.0

La figure suivante est l'écran de sortie d'une analyse « six graph » qui comprend les cartes X-bar et R de plusieurs logiciels d'analyse dont Statistica. Ce graphique nous donne plus d'information que ce que nous avons besoin dans le cas ici, car la carte X-bar est rassurante. Nous ne remarquons pas d'anomalie dans le schéma (carte X-bar) des points et aucun point ne sort des limites de contrôle qui sont fixées à 287.19 et 272.01 (plus ou moins 3\*s de la moyenne). Nous pouvons dire que les valeurs ont une allure plutôt normale (graphique de probabilité normale), mais que trois valeurs semblent revenir souvent. Alors les limites de contrôles sont valides, mais une investigation sur les causes possibles des redondances des trois valeurs serait certainement un pas pour améliorer davantage la situation. L'étendue de la troisième série de données pourrait poser un questionnement (carte R), mais elle se situe à l'intérieur des limites de contrôles.

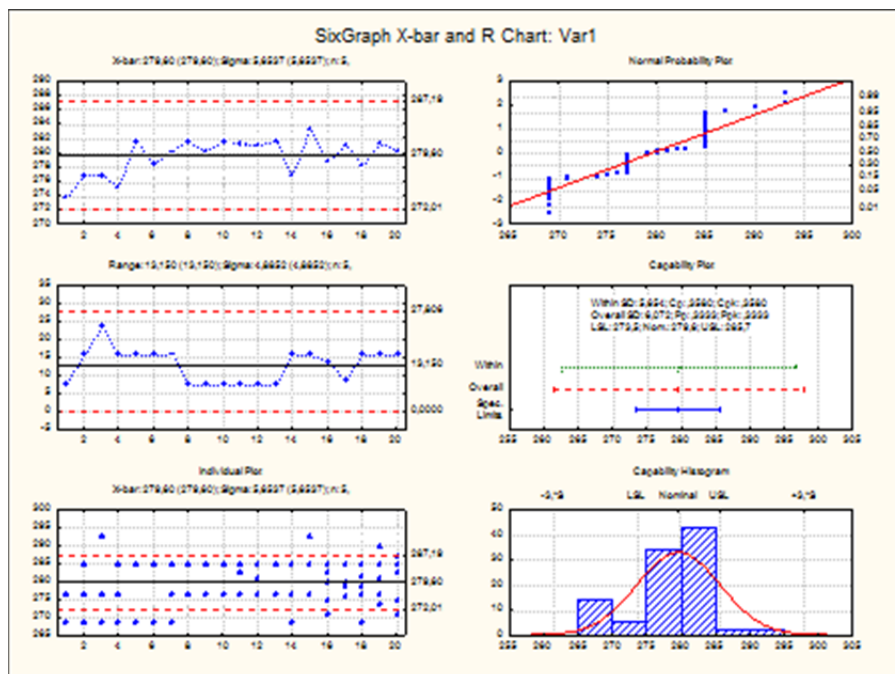


Figure 4.10 Cas 2, analyse de contrôle quantitative d'un procédé

#### 4.4.2.2 Résolution selon le coffre à outils simplifié

Il s'agit ici de données quantitatives continues alors le choix de carte dans notre analyse simplifié se fait avec des boîtes à moustaches incluant les spécifications des clients.

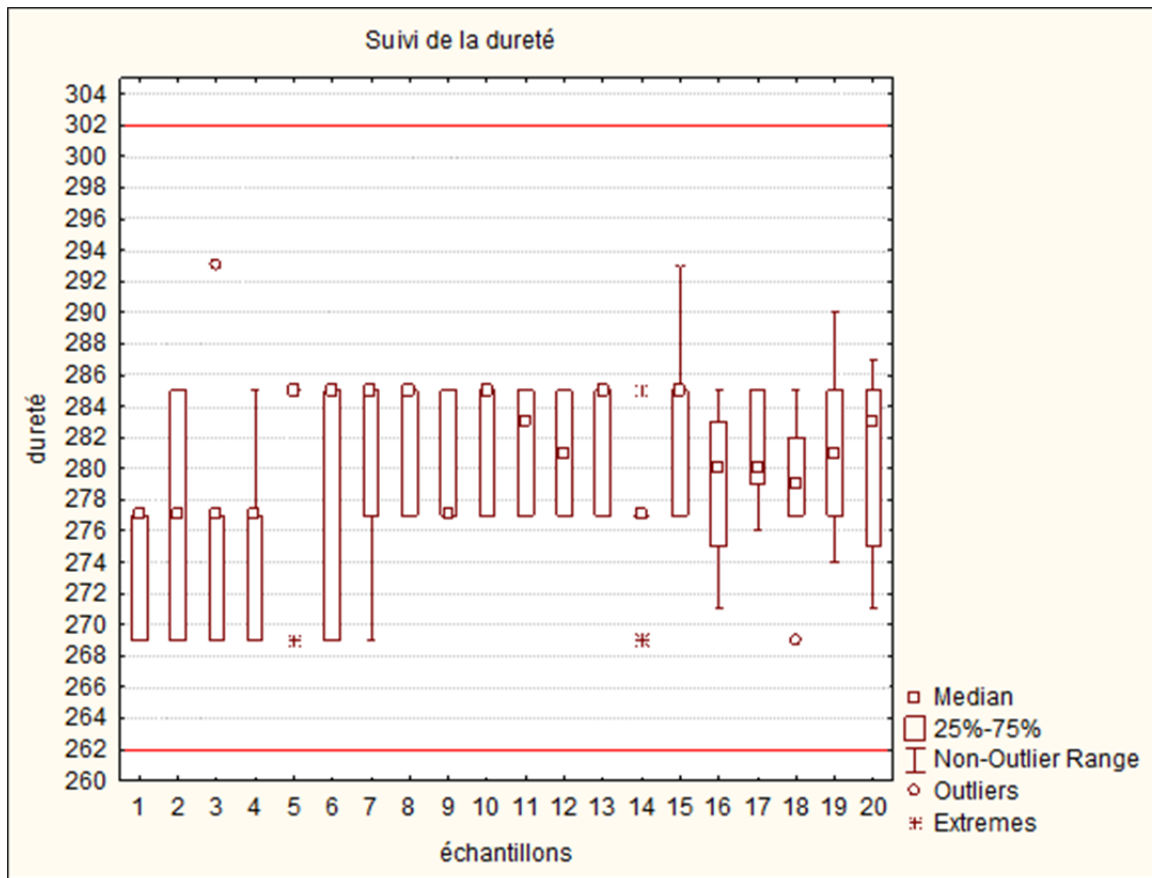


Figure 4.11 Cas 2, analyse simplifiée du contrôle quantitatif

Nous remarquons ici aussi qu'il serait surprenant qu'une cause commune ne permette pas de respecter les spécifications du client. Les médianes semblent plutôt stables entre 269 et 285. L'échantillon 3 montre une étendue plutôt étrange comme dans l'analyse classique. Aucune tendance n'est à suspecter dans les données. Finalement, nous arrivons aux mêmes conclusions. Sauf que dans ce cas-ci, la normalité n'est plus étudiée à part. Si les données

n'ont pas une allure normale, une tendance se verrait directement dans le graphique et l'analyste pourra investiguer pour en connaître les raisons. Le compromis est que nous ne pouvons pas quantifier la capabilité du processus. Toutefois, nous voyons clairement que le processus est plutôt bien maîtrisé, car il semble stable.

#### 4.4.3 Étude de cas 3 : régression multiple

Dans l'exemple suivant, nous voulons trouver l'influence du nombre d'années d'étude ainsi que du nombre d'années d'expérience sur le salaire d'un employé. Il s'agit de l'exercice 20.6 disponible dans (Harry, 2010, p. 567). Le tableau suivant qui contient 12 sujets est fourni pour faire l'analyse.

Tableau 4.8 Cas 3, données de base  
Tiré de (Harry, 2010, p. 567)

1 Salaire	2 Étude	3 Expérience
32	16	6
24	12	10
28	13	15
57	20	8
48	18	11
28	16	2
39	14	12
43	18	4
18	12	6
41	16	9
17	12	2
49	16	8

#### 4.4.3.1 Résolution classique du problème avec Statistica 8.0

L'analyse de la régression par un logiciel de statistique peut-être ardue, car beaucoup d'options sont possibles et plusieurs angles d'analyse sont disponibles. Essentiellement, avec l'analyse classique, nous recherchons : l'adéquation des facteurs au modèle ( $R^2$ ), l'équation de prédiction. Pour assurer la validation du modèle, nous devons faire la vérification des résidus. De plus, dans ce type d'analyse, nous souhaitons souvent bâtir un intervalle de confiance autour des coefficients de l'équation de prédiction.

Premièrement, nous remarquons que les deux variables expliquent en grande partie la variance associée à nos deux facteurs, car le coefficient de détermination est de 88.43%. De plus, le modèle est hautement significatif. Nous pouvons dire qu'une relation linéaire existe entre le salaire, le nombre d'années d'étude et le nombre d'années d'expérience.

Tableau 4.9 Cas 3, coefficient de détermination

Dependnt Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (Spreadsheet5)										
	Multiple R	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
<b>Salaire</b>	0,940361	0,884280	0,858564	1595,830	2	797,9150	208,8367	9	23,20408	34,38684	0,000061

Étant donné ces résultats, nous n'avons pas vraiment besoin de faire l'analyse des résidus, car le modèle est satisfaisant. Vérifions quand même pour être certain.



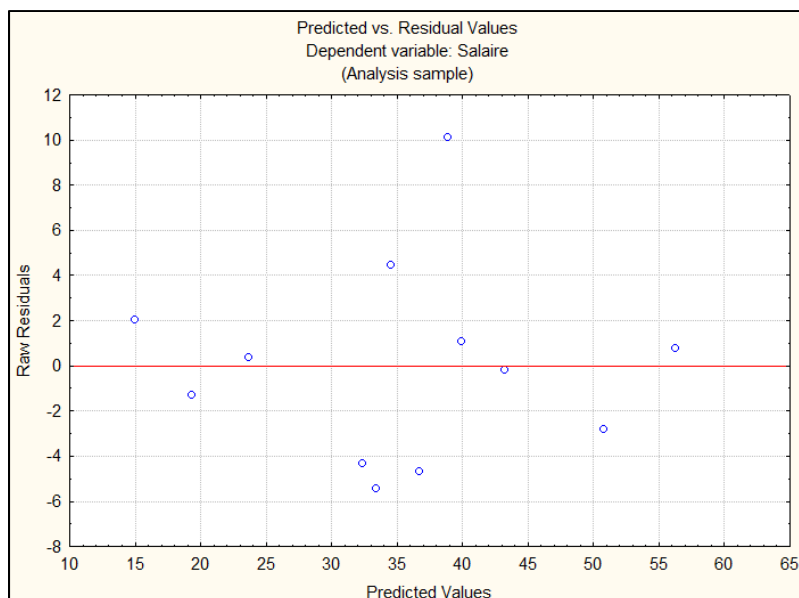


Figure 4.12 Cas 3, analyse des résidus

Effectivement, les résidus sont plutôt disposés de manière aléatoire. Ce qui signifie que le modèle est valide.

Vérifions maintenant comment les deux facteurs influencent le salaire avec l'équation de prédiction.

Tableau 4.10 Cas 3, coefficient des facteurs et intervalle de confiance

Effect	Parameter Estimates (Spreadsheet5) Sigma-restricted parameterization									
	Salaire Param.	Salaire Std.Err	Salaire t	Salaire p	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt	Salaire Beta (β)	Salaire St.Err.β	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt
Intercept	-39,3519	9,117340	-4,31616	0,001944	-59,9768	-18,7270				
Étude	4,3456	0,546269	7,95505	0,000023	3,1099	5,5814	0,904886	0,113750	0,647566	1,162206
Expérience	1,0858	0,366069	2,96605	0,015803	0,2577	1,9139	0,337387	0,113750	0,080068	0,594707

Avec le tableau des coefficients nous pouvons tirer l'équation de prédiction suivante :

	$Salaire = -39.35 + 4.35 * \text{étude} + 1.09 * \text{expérience}$	(4.1)
--	---	-------

De plus, nous trouvons, dans ce même tableau les valeurs min et max des coefficients selon un intervalle de confiance à 95%. Ce qui permettrait à l'analyse de prédire un salaire de manière optimiste et pessimiste. Les coefficients nous informes aussi sur la force d'influence du facteur sur la réponse. Nous voyons que le nombre d'années d'étude est environ 4 fois plus influent que l'expérience (4.35 contre 1.09) même si les deux sont statistiquement significatifs (p-value plus petit que 0.05).

#### 4.4.3.2 Résolution selon le coffre à outils simplifié

La résolution simplifiée se fait avec les nuages de point de la variable dépendante (salaire) par rapport aux variables indépendantes (étude, expérience).

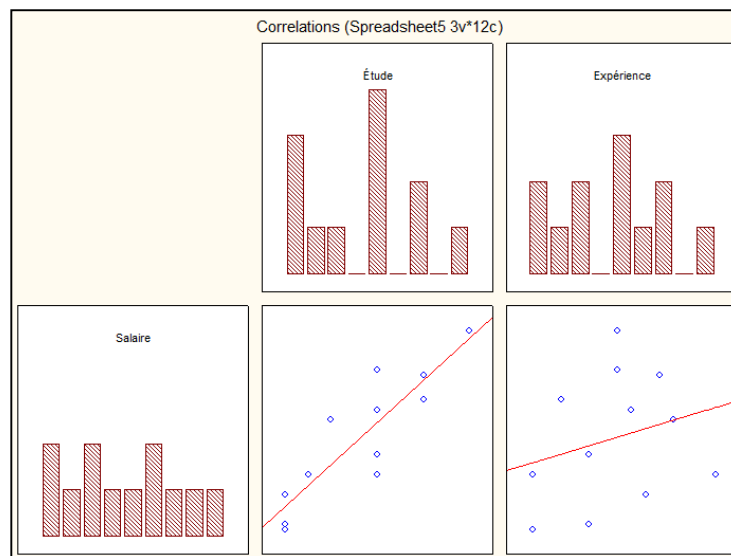


Figure 4.13 Cas 3, matrice de nuage de points

Dans le cas de l'analyse visuelle, il n'est pas possible de quantifier clairement que la relation de force est quatre fois plus grande pour les études plutôt que l'expérience. Par contre, nous voyons clairement qu'il y a relation linéaire des deux facteurs. Dans les deux graphiques, nous pouvons remarquer une tendance à la hausse. Les points étant plus rapprochés de la

droite montre que la variance des salaires par rapport au nombre d'années d'étude sont plutôt faibles tandis que la variance du nombre d'années d'expérience en fonction du salaire est grande. Nous comprenons qu'il y a moins de chance de se tromper, si nous voulons augmenter de salaire, de privilégier les études. De plus, la pente de la droite est beaucoup plus prononcée dans le cas des études. Sans clairement pouvoir dire que l'influence est 4 fois plus grande, le salaire augmente plus rapidement en étudiant.

Dans les deux types d'analyse, les conclusions sont les mêmes sauf que l'analyse simplifiée ne permet pas de quantification. Par conséquent, pas d'optimisation. Elle est de nature exploratoire, mais permet la compréhension de base de la relation entre les variables.

#### 4.4.4 Étude de cas 4 : ANAVAR

Un fermier désireux d'augmenter sa production de blé teste, sur chaque acre de son champ, trois différents fertilisants. Le tableau suivant montre les résultats obtenus en nombre de boisseaux récoltés tel que montré dans l'exercice 19.5 de la référence suivante (Harry, 2010, p. 523). Chaque fertilisant est utilisé sur 8 acres et les résultats pour chaque acre ont été comptés.

Tableau 4.11 Cas 4, données de base  
Tiré de (Harry, 2010, p. 523)

	1 Fertilisants	2 Production
1	1	72
2	1	69
3	1	75
4	1	59
5	1	64
6	1	68
7	1	71
8	1	67
9	2	58
10	2	42
11	2	53
12	2	47
13	2	45
14	2	52
15	2	47
16	2	57
17	3	61
18	3	58
19	3	63
20	3	68
21	3	55
22	3	65
23	3	59
24	3	63

#### 4.4.4.1 Résolution classique du problème avec Statistica 8.0

Nous voulons savoir si les moyennes de production entre les fertilisants sont statistiquement différentes. Pour ce faire, nous pouvons réaliser une ANAVAR à un facteur. Le tableau suivant montre le résultat de l'ANAVAR.

Tableau 4.12 Analyse de la variance à un facteur

Effect	Univariate Tests of Significance, Effect Sizes, and Powers for Production (Spreadsheet5) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition							
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p	Partial eta-squared	Non-centrality	Observed power (alpha=0,05)
Intercept	86160,17	1	86160,17	3441,490	0,000000	0,993935	3441,490	1,000000
<b>Fertilisants</b>	1326,08	2	663,04	26,484	0,000002	0,716092	52,968	0,999995
Error	525,75	21	25,04					

Nous remarquons qu'en acceptant un risque de 5% ( $\alpha = 0.05$ ), la différence des moyennes est hautement significative ( $p=0.000002$ ). Nous assumons ici la normalité des données même si la rigueur exige la vérification. Maintenant pour trouver quel fertilisant utiliser, il suffit de prendre celui dont la moyenne est la plus élevée. Nous trouverons le fertilisant 1.

#### 4.4.4.2 Résolution selon le coffre à outils simplifié

Pour faire la vérification des tendances centrales d'échantillon, nous procédons par la comparaison de boîtes à moustaches selon le graphique suivant.

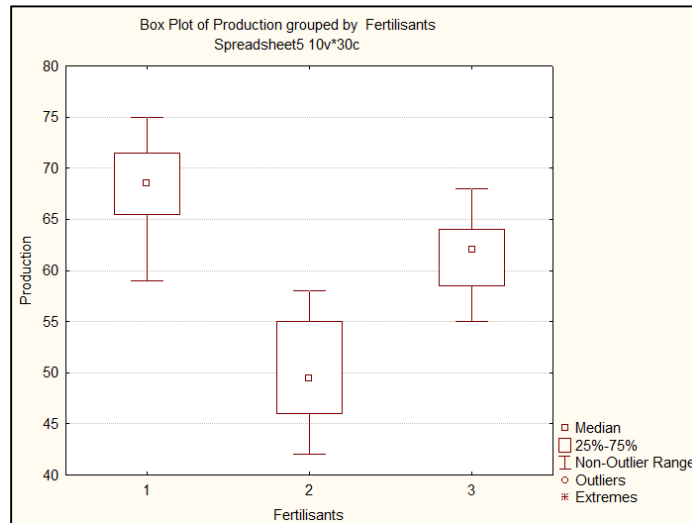


Figure 4.14 Cas 4, boîte à moustache multiple

Ce graphique n'indique nullement si les moyennes sont statistiquement différentes. D'ailleurs, les moyennes n'y sont pas affichées. Par contre, nous pouvons clairement comprendre que le fermier devrait étendre le fertilisant 1 à tout son champ pour augmenter sa production. La médiane de production du premier fertilisant est largement plus profitable. Dans les deux types d'analyse, nous arrivons au même résultat.

## **4.5 Discussions sur les résultats**

Lors du sondage des experts, ces derniers ont émis plusieurs commentaires pertinents que nous résumons sous forme synthétisée. Ces commentaires ouvrent certaines des pistes de discussions et de réflexions à explorer.

À qui s'adresse cette formation? Selon les commentaires des experts, il semblerait plus pertinent d'adresser cette formation à des PME. Cette réflexion repose sur l'idée que plus le niveau de maturité en amélioration continue est grand, plus l'entreprise contrôle ses procédés avec précision. De plus, dans ce contexte, les systèmes de mesures sont normalement en place pour capter les données relatives à l'analyse des variances des indicateurs de performance. Ceci met la table à des analyses plus poussées. Dans une perspective d'amélioration continue, si l'entreprise est déjà très performante il faudra sans doute utiliser des méthodes d'analyses qui permettent de capter les moindres détails et ceci est facilité avec la formation classique. Ceci dit, il serait intéressant d'avancer le sujet à savoir si une hiérarchie hybride pourrait coexister. C'est-à-dire, que dans une même entreprise nous pourrions retrouver différents professionnels de l'amélioration continue comme des BB et des gens formés avec le coffre simplifié par exemple.

Cette réflexion est essentielle à l'élaboration d'une formation. Généralement, les entreprises qui débutent dans la gestion de la qualité et de la performance n'auront pas un grand nombre d'employés dédiés à ce travail. Dans ce contexte, il est préférable d'élaborer une formation visant l'autonomie et d'intégrer davantage de notions de gestion de projets de la qualité et d'approfondir sur la gestion du changement, les plans de communication, formation d'équipe, etc. Tandis qu'un employé qui s'intègre dans une hiérarchie d'employés dédiés à l'amélioration continue pourrait peut-être seulement apprendre les méthodes et techniques proposées dans le prototype du coffre à outils simplifié. Autrement dit, les inclus et exclus restent à définir dépendant de la stratégie d'entreprise pour élaborer une formation basée sur le prototype de ce mémoire.

Comment tester la performance du prototype? Les résultats obtenus indiquent qu'un potentiel intéressant existe pour l'élaboration d'une formation et ceci serait l'étape initiale pour tester la performance des agents de changements ayant suivi ce genre de formation. La façon de valider l'efficacité du coffre à outils simplifié est donc d'en faire le test dans plusieurs entreprises et de capter, à travers le temps, les rétroactions et d'en faire l'analyse. Il serait risqué de comparer les professionnels de la formation simplifiée aux BB et même au GB, car ils n'ont pas le même niveau de connaissances, d'expériences, ont souvent des bagages scolaires diversifiés et n'ont pas nécessairement les mêmes aptitudes sociales. À travers le temps, il serait possible de comparer plusieurs indicateurs, à définir, sur la performance de l'ensemble des BB et l'ensemble des GB et l'ensemble des professionnels de la formation simplifiée en stratifiant par secteurs d'activités et grandeur d'entreprise. De cette façon, nous pourrions avoir un meilleur aperçu de l'efficacité individuelle de chacun des groupes, mais aussi une comparaison des groupes. Ainsi, nous pourrions positionner la formation simplifiée relativement aux deux autres les plus populaires. Selon cette méthode, nous pourrions valider l'efficacité de la formation simplifiée dans différents contextes avec un niveau de certitude.

Quel logiciel utiliser pour mettre en pratique le prototype? L'ASQ suggère l'utilisation de Minitab comme logiciel d'analyse et nous arrivons à la même conclusion. Par contre, Minitab reste un logiciel qui ne s'adapte pas à tous les outils du prototype, son coût est élevé et beaucoup d'outils sont superflus dans ce logiciel pour les besoins de notre prototype. Cette dernière spécification ajoute en confusion pour l'utilisateur et ceci n'est pas souhaitable pour un débutant. Une réflexion autour du développement d'un logiciel sur mesure semble essentielle. L'idéal serait d'inclure uniquement les outils vus dans ce travail en intégrant de fortes capacités de visualisation, de stratification des données comme Minitab sans l'aspect statistique de sorte que l'utilisateur utilise un logiciel qui lui rappelle sa formation. D'ailleurs, le développement logiciel et de la formation devraient se faire de pair. L'intégration de la gestion de projets d'amélioration continue pourrait être un élément intéressant dans un tel logiciel. Ceci ne semble pas exister pour l'instant.



#### **4.6       Recommandations**

- Cibler des PME dont le niveau de maturité en amélioration continue permettrait l'intégration d'agent de changement formé avec le coffre à outils simplifié;
- Développer une formation en se basant sur ce prototype en intégrant aussi d'autres outils simples et pertinents du Lean;
- Choisir ou développer un logiciel de support permettant de réaliser les graphiques et analyses du coffre à outils simplifiés;
- Définir un système de mesure pour capter l'efficacité de cette formation.
- À long terme, positionner cette formation selon son efficacité et les contextes d'utilisation de manière relative aux formations Green Belt et Black Belt;

## CONCLUSION

La discipline du génie industriel a connu ses débuts par l'analyse statistique et a évolué à travers ces principes. Nous trouvons de nombreuses références pesantes en statistiques sur la méthodologie Six Sigma où la quantité d'outils est faramineuse. C'est ce qui fait sa force, mais aussi sa faiblesse. Ce projet a vu le jour grâce à notre partenaire industriel qui a constaté une rétention faible des connaissances transmises lors de ses formations sur le sujet. Ce qui a été, d'ailleurs une des causes d'échecs recensés dans la littérature et qui en a fait le sujet principal de ce travail. Les causes d'échecs liés à l'éducation sont multiples. Nous trouvons d'abord une difficulté d'apprentissage étant donné le caractère hautement analytique de SS, l'utilisation de la statistique ainsi qu'une confusion liée aux nombreux outils et techniques existants pour résoudre des problèmes. Plusieurs analystes sont démotivés face à l'utilisation de cette démarche et ceci limite grandement son potentiel.

L'opinion des professionnels est partagée à savoir si l'analyse statistique est essentielle à la réalisation de projets d'amélioration continue et ce travail a présenté un point central entre les deux lignes de pensée. Nous intégrons les données et en faisons l'analyse de sorte à dégager les éléments de variance, mais sans calculs rigoureux pour trouver la signification statistique. Cet élément est laissé au jugement de l'analyste. Il doit faire l'observation visuelle de la variance et doit déterminer si elle lui semble suffisante pour intervenir et démarrer un projet d'amélioration continue.

Nous avons vu au premier chapitre que la force de SS réside dans sa méthodologie d'amélioration qui découpe les projets en phases comparativement à d'autres démarches comme TQM par exemple. Cet élément est important et reste inchangé dans l'application de la démarche avec le prototype. Nous avons fait l'analyse exhaustive des outils statistiques contenus dans la formation BB au deuxième chapitre pour identifier les objectifs de résolutions et des connaissances requises de ces outils. Ils ont été sélectionnés, éliminés ou simplifiés au chapitre trois de sorte à répondre à nos prémisses d'apprentissage pour favoriser

la rétention des connaissances. Ces dernières obligent la limitation à des concepts acquis par un diplômé de cinquième secondaire au Québec, mais aussi fait abstraction des lois de distribution statistique, privilégie une analyse de nature visuelle et la réutilisation d'un outil pour d'autres cas de figure.

Nous nous sommes préoccupés des outils de nature calculatoire, mais tous les outils de gestion ou de nature qualitative qui sont normalement dans le corpus des connaissances sont essentiels à la gestion de la qualité et devraient alors être conservés. Il est primordial que l'analyste soit habilité à effectuer un remue-méninge et un diagramme de causes à effet avant de procéder à un design d'expérience par exemple.

Nous avons fait l'hypothèse que le prototype du coffre à outils simplifié sera préférable pour permettre une meilleure intégration de la démarche à travers l'industrie tout en fournissant les résultats escomptés du coffre à outils classique. L'hypothèse est soutenue considérant l'évaluation faite par le panel d'expert. Effectivement, selon notre modèle AHP, le prototype simplifié est préféré d'environ 45%. D'ailleurs, un échantillon d'étudiants spécialisés en amélioration continue a accueilli favorablement la venue d'outils simplifiés. Ils voient d'un bon œil l'utilité d'un coffre à outils simplifié pour des utilisations dans leurs futurs emplois. De plus, les études de cas présentés au chapitre 4 indiquent que la résolution de problème est faisable avec le prototype.

Ce projet consistait à ouvrir une voie vers l'analyse sans statistique tout en se basant sur des données et les résultats affichent un potentiel certain. Une réflexion s'impose avant d'en faire l'essai en industrie en ce qui concerne les limites du contenu de la formation, l'achat ou développement d'un logiciel de soutien et finalement, la méthode pour capter la performance d'une telle initiative comparativement aux autres formations existantes.

## ANNEXE I

### QUESTIONNAIRE DE COMPARAISON DES COFFRES À OUTILS À L'INTENTION DES EXPERTS

**Directives** : Répondez aux quatre questions suivantes selon votre jugement en intégrant vos commentaires et/ou justifications s'il y a lieu. Vous pouvez vous référer au fichier « boîteàOutilsÉval.pptx » pour plus de détail sur les outils en question.

**Question 1-** Selon vous, est-ce que la simplification permet une meilleure compréhension des outils?

A- Non

B- Oui. D'environ combien? 2 fois, 3 fois, 4 fois, 5 fois

*Explications/Hypothèses : Les outils simplifiés se basent seulement sur des notions acquises à l'école secondaire. La complexité ainsi que le nombre de savoirs relatifs de la boîte à outils simplifiée sont moins grands. Ce qui devrait se traduire par une meilleure compréhension au moment de l'enseignement.*

*Exemple 1 : une analyse de la variance a pour but de comparer des tendances centrales pour affirmer si elles sont semblables ou pas. Dans la démarche classique nous faisons un tableau « one way ANOVA » et dans la démarche simplifiée des boîtes à moustache multiple. Je pense que les boîtes à moustaches sont beaucoup plus faciles à comprendre qu'un tableau « one way ANOVA » parce que nous n'avons pas à nous préoccuper de l'apprentissage : du risque alpha, de la signification statistique « p-value », du ratio-F, des degrés de liberté, test de normalité, etc. Ces concepts, en plus d'être nombreux, font appel à un savoir de haut niveau. Les boîtes à moustache, quant à elles, permettent de visualiser les sous-groupes directement sur un graphique pour comparer les tendances centrales sans utiliser de notions statistiques. Avec ces dernières, il y a beaucoup moins d'étapes intermédiaires pour arriver au but de l'analyse.*

*Votre réponse pour la question 1 est une agrégation de ce genre de réflexion pour les 6 outils simplifiés. L'échelle est subjective. C'est simplement pour obtenir un ordre de grandeur et c'est pour cette raison que je vous demande de justifier le plus possible (sans faire un dénombrement des savoirs pour chaque outil).*

**Question 2** - selon vous, est-ce que le coffre à outils simplifié permet de faciliter la sélection d'un ou des outils pour résoudre un problème?

A- Non

B- Oui. D'environ combien? 2 fois, 3 fois, 4 fois, 5 fois

*Explications/Hypothèses : Le coffre à outils simplifié comprend un nombre moins grand d'outils. Ce qui devrait faciliter le choix de l'analyste pour résoudre un problème. On fait l'hypothèse ici que l'analyste n'utilisera pas un outil mal adapté au problème qu'il doit résoudre.*

*Exemple 2 : un analyste veut s'assurer que sa production de chaise respecte le nombre de défauts acceptés par client sur les lots qu'il envoie. Dans la démarche classique, nous avons le choix entre les cartes p, np, c, u sachant qu'il s'agit du contrôle qualitatif. Dans la démarche simplifiée, une seule carte est disponible et c'est la carte qualitative.*

*Votre réponse pour la question 2 est une comparaison à haut niveau du nombre d'outils disponibles pour résoudre un problème précis. Voir les diapos 3 et 4 de la présentation pour aborder votre réflexion. Encore une fois, il s'agit d'un ordre de grandeur recherché.*

**Question 3** - selon vous, en comparant les deux coffres à outils, quelle proportion de problèmes peut être résolue avec le coffre à outils simplifié?

A- plus de 80%, mais moins de 90%

B- plus de 70%, mais moins de 80%

C- plus de 60%, mais moins de 70%

D- moins de 60%

*Explications/Hypothèses : Nous admettons ici déjà qu'au moins 10% des problèmes ne peuvent être résolus avec le coffre à outils simplifié. Des problèmes où la signification statistique serait essentielle, ou il faut absolument une analyse discriminante. Vous pouvez réfléchir à cette question de la façon suivante : dans l'ensemble des problèmes que vous avez déjà résolus, pensez-vous que ces outils auraient pu faire le travail? Dans quelle proportion environ?*

**Question 4-** Selon vous, en comparant les outils simplifiés et classiques, le temps de formation requis pour la compréhension et l'application des outils sont-ils:

A- Équivalent

B- Plus court pour les outils simplifiés. D'environ combien? 2 fois, 3 fois, 4 fois, 5 fois

*Explications/Hypothèses : La réflexion pour cette question s'apparente à celle de la question 1. Sauf que cette fois-ci, nous analysons les temps de formation. Une notion moins complexe devrait normalement s'apprendre plus vite. Vous pouvez relire l'exemple 1 en ayant en tête la comparaison des temps d'enseignements requis. Nous recherchons ici un ordre de grandeur, de manières agrégées pour les 6 outils simplifiés.*

## **ANNEXE II**

### **QUESTIONNAIRE À L'INTENTION DES ÉTUDIANTS**

- 1- Combien de crédits avez-vous réussis jusqu'à maintenant?
  - A- Moins de 30
  - B- Entre 30 et 60
  - C- Entre 60 et 90
  - D- Plus de 90
  
- 2- Quel est le nombre de stages que vous avez réalisés jusqu'à maintenant?
  - A- 1
  - B- 2
  - C- 3
  
- 3- Si vous avez eu des expériences d'emploi ou de stage dans le domaine de l'amélioration continue, avez-vous eu recours à l'utilisation d'outils statistiques pour résoudre des problèmes?
  - A- Oui
  - B- Non

Si oui, pensez-vous que les outils simplifiés auraient pu faire le travail? Justifier brièvement svp.
  
- 4- Selon votre perception, quelle proportion de problèmes reliés à la qualité peut être résolue sans l'utilisation de calculs statistiques? Environ :
  - A- 0 à 25%
  - B- 25 à 50%
  - C- 50 à 75%
  - D- 75 à 95%

- 5- Tenant compte de votre formation, est-ce que vous vous sentez en confiance face à l'utilisation des outils statistiques du coffre à outils Six Sigma? Oui ou non, justifier brièvement svp.
- 6- Tenant compte de votre formation, est-ce que vous pensez que le coffre à outils simplifiés pourrait vous être utile? Écrivez une réponse de 1 à 5 (1 = inutile et 5 très utile)



## ANNEXE III

### GRILLE D'ÉVALUATION DES LOGICIELS DE SOUTIEN

Éléments d'évaluation/ Logiciels		Minitab 17	Statistica 8.0	StatGraphics 16.2.04	SigmaXL v.6	JMP 11.1	R 3.0.3	phStat 2.7
Critères fonctionnement (50%)	Graphiques de base	4	4	4	4	4	3	4
	Carte contrôle quantitative et analyse d'aptitude	4	3	3	3	3,5	3	3
	Analyse R & R	4	2	3	2	3,5	3	2
	Analyse Multi- Varié	4	2	3	2,5	3,5	2	0
	Design d'expérience simplifié	2	2	2,5	2,5	2	2	0
	Anavar simplifiée (boite à moustache multiples)	4	4	4	4	4	4	3
	Régression simplifiée (matrice de nuage de points)	4	4	4	3,5	4	4	1
critères convivialité (32%)	Interface graphique et menus intuitifs (10 points)	9	7	9	8	9	0	5
	Quantité pertinente d'options (5 points)	4	2	3	5	3	0	5
	Assistant "étape par étape" intégré (3 points)	2	1	2	1	2	0	1
critère de coût (18%)	prix acquisition (10 points)	3	5	3	7	3	10	10
Total		44	36	40,5	42,5	41,5	31	34



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdolshah, Mohammad, Md Yusof B. Ismail, Rosnah Mohd Yusuff et Tang Sai Hong. 2009. « Overcoming the challenges of implementating six sigma in service industries ». In *2009 International Conference on Information Management and Engineering, ICIME 2009, April 3, 2009 - April 5, 2009*. (Kuala Lumpur, Malaysia), p. 191-195. Coll. « Proceedings - 2009 International Conference on Information Management and Engineering, ICIME 2009 »: IEEE Computer Society. < <http://dx.doi.org/10.1109/ICIME.2009.120> >.
- Alexis, Jacques, et Philippe Alexis. 1999. *Pratique industrielle des plans d'expériences : la qualité à moindre coût : l'approche Taguchi*. Paris: AFNOR, xi, 276 p. p.
- Andersson, Roy, Henrik Eriksson et Hkan Torstensson. 2006. « Similarities and differences between TQM, six sigma and lean ». *TQM Magazine*, vol. 18, n° Compendex, p. 282-296.
- Angel, R. Martínez-Lorente, Dewhurst Frank et G. Dale Barrie. 1998. « Total quality management: origins and evolution of the term ». *The TQM Magazine*, vol. 10, n° 5, p. 378-386.
- Arumugam, V., Jiju Antony et Maneesh Kumar. 2013. « Linking learning and knowledge creation to project success in Six Sigma projects: An empirical investigation ». *International Journal of Production Economics*, vol. 141, n° 1, p. 388-402.
- ASQ. 2007. « Certified Six Sigma Black Belt ». < <http://cert.asq.org/certification/resource/pdf/certification/inserts/cssbb-insert-2007.pdf> >. Consulté le 02-11-2014.
- ASQ. 2014. « Six Sigma Belts, Executives and Champions – What Does It All Mean? ». < <http://asq.org/learn-about-quality/six-sigma/overview/belts-executives-champions.html> >. Consulté le 07-02-2014.
- Babin, Tom, Tim Brenton, Tracee Cramer et Mirian Dodson. 2007. *Certified Six Sigma Black Belt Primer* (1 august). Quality Council of Indiana.
- Baillargeon, Gérald. 2001. *Statistique appliquée et outils d'amélioration de la qualité*, 2e éd. Trois-Rivières, Québec: Éditions SMG, xviii, 571 p. p.
- Barbeau, Denise, Angelo Montini et Claude Roy. 1997. *La motivation scolaire*. Association Québécoise de Pédagogie Collégiale, 535 p.

- Brussee, Warren. 2004. *Statistics for Six Sigma made easy!* New York: McGraw-Hill, xiii, 250 p. p.
- Canada, Gouvernement du. 2012. « Principales statistiques relatives aux petites entreprises ». < <http://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/fra/02715.html#fnb1> >. Consulté le 02-04-2014.
- Catherine, Hagemeyer, K. Gershenson John et M. Johnson Dana. 2006. « Classification and application of problem solving quality tools: A manufacturing case study ». *The TQM Magazine*, vol. 18, n° 5, p. 455-483.
- De Mast, Jeroen, et Ronald J. M. M. Does. 2010. « Discussion of statistical thinking and methods in quality improvement: A look to the future ». *Quality Engineering*, vol. 22, n° Compendex, p. 130-132.
- Delgado, C., M. Ferreira et M. C. Branco. 2010. « The implementation of lean Six Sigma in financial services organizations ». *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 21, n° Copyright 2010, The Institution of Engineering and Technology, p. 512-23.
- Douglas, C. Montgomery. 2010. « A modern framework for achieving enterprise excellence ». *International journal of Lean Six Sigma*, vol. 1, n° 1, p. 56-65.
- Gardner, Howard. 1993. *Frames of mind : the theory of multiple intelligences*. New York: Basic Books.
- Griffiths, Dawn. 2009. *Head first statistics*. Coll. « Head first series ». Sebastopol, CA: O'Reilly Media, xxxviii, 677 p. p.
- Gryna, Frank M., Richard Chim Hai Chua, Joseph A. De Feo et J. M. Juran. 2007. *Juran's quality planning and analysis : for enterprise quality*, 5th. Coll. « McGraw-Hill series in industrial engineering and management science ». Boston: McGraw-Hill, xxvi, 774 p. p.
- Gupta, Praveen, et Arvin Sri. 2007. *Stat Free Six Sigma : Focusing on Intent for Quick Results*. Accelper Consulting, 116 p.
- Hambleton, Lynne. 2008. *Treasure chest of six sigma growth methods, tools, and best practices : a desk reference book for innovation and growth*. Coll. « Six Sigma for innovation and growth series ». Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, xiv, 995 p. p.

- Hamidreza, Eskandari, Sala-Diakanda Serge, Furterer Sandra, Rabelo Luis, Crumpton-Young Lesia et Williams Kent. 2007. « Enhancing the undergraduate industrial engineering curriculum: Defining desired characteristics and emerging topics ». *Education + Training*, vol. 49, n° 1, p. 45-55.
- Harry, Dr. Mikel J. 2004. « The days at Motorola ». < <http://www.mikeljarry.com/story.php?cid=8> >. Consulté le 07-16-2014.
- Harry, Mikel J. 2010. *Practitioner's guide for statistics and lean six sigma for process improvement*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, xxv, 800 p. p.
- Ingle, Sarah, et Willo Roe. 2001. « Six sigma black belt implementation ». *The TQM Magazine*, vol. 13, n° 4, p. 273-280.
- Ishikawa, Kaoru (435). 1990. *Introduction to quality control*. Tokyo: 3A corporation.
- Jiju, Antony. 2004. « Some pros and cons of six sigma: an academic perspective ». *The TQM Magazine*, vol. 16, n° 4, p. 303-306.
- Jiju, Antony. 2006. « Six sigma for service processes ». *Business Process Management Journal*, vol. 12, n° 2, p. 234-248.
- Jiju, Antony. 2009. « Six Sigma vs TQM: some perspectives from leading practitioners and academics ». *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 58, n° 3, p. 274-279.
- Jiju, Antony. 2011. « Six Sigma vs Lean: Some perspectives from leading academics and practitioners ». *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 60, n° 2, p. 185-190.
- Klefsjö, Bengt, Håkan Wiklund et Rick L. Edgeman. 2001. « Six sigma seen as a methodology for total quality management ». *Measuring Business Excellence*, vol. 5, n° 1, p. 31-35.
- Kubiak, T. M., et Donald W. Benbow. 2009. *The certified six sigma black belt handbook*, 2nd. Milwaukee, Wis.: ASQ Quality Press, xxvii, 620 p. p.
- Kumar, M., et J. Antony. 2009. « Multiple case-study analysis of quality management practices within UK Six Sigma and non-Six Sigma manufacturing small- and medium-sized enterprises ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - B*, vol. 223, n° 7, p. 925-934.

- Kwak, Young Hoon, et Frank T. Anbari. 2006. « Benefits, obstacles, and future of six sigma approach ». *Technovation*, vol. 26, n° 5–6, p. 708-715.
- Laureani, Alessandro, et Jiju Antony. 2011. « Standards for Lean Six Sigma certification ». *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 61, n° 1, p. 110-120.
- Maleyeff, John, et Daren E. Krayenvenger. 2004. « Goal setting with Six Sigma mean shift determination ». *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 76, n° 6, p. 577-583.
- McAdam, Rodney, et Shirley-Ann Hazlett. 2010. « An absorptive capacity interpretation of Six Sigma ». *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 21, n° Compendex, p. 624-645.
- Mehrjerdi, Yahia Zare. 2011. « Six-Sigma: Methodology, tools and its future ». *Assembly Automation*, vol. 31, n° Compendex, p. 79-88.
- Michálek, Jaroslav. 1990. « Applied regression analysis and experimental design ». *Acta Applicandae Mathematicae*, vol. 18, n° 1, p. 90-91.
- Monnot, L. 2004. « Simple tools improve complicated processes [Six Sigma] ». *Quality Progress*, vol. 37, n° Copyright 2005, IEE, p. 42-7.
- Montgomery, Douglas C. 2008. *Design and analysis of experiments*, 7th. Hoboken, NJ: Wiley, xvii, 656 p. p.
- Munro, Roderick A. 2008. *The certified six sigma green belt handbook*. Milwaukee, Wis.: ASQ Quality Press, xxxvi, 443 p. p.
- Neter, John, Michael H Kutner, Christopher J Nachtsheim et William Wasserman. 1996. *Applied linear statistical models*, 4. Irwin Chicago.
- Nonthaleerak, Preeprem, et Linda Hendry. 2008. « Exploring the six sigma phenomenon using multiple case study evidence ». *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 28, n° 3, p. 279-303.
- Organization, International Standard. 1994. *Management de la qualité et assurance de la qualité - Vocabulaire*. < <http://fr.scribd.com/doc/40047151/ISO-8402-1994-ISO-Definitions> >. Consulté le 05-15-2013
- Paton, Scott M. 2002. « Juran: A lifetime of quality ». *Quality Digest*.

- Pepper, M. P. J., et T. A. Spedding. 2010. « The evolution of lean Six Sigma ». *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 27, n° 2, p. 138-155.
- Pyzdek, Thomas, et Paul A. Keller. 2010. *The Six Sigma handbook : a complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels*, 3rd. New York: McGraw-Hill Companies, xii, 548 p. p.
- Québec, Gouvernement du. 2004. *programme de formation de l'école québécoise, enseignement secondaire, premier cycle*. < <http://www1.mels.gouv.qc.ca/sections/programmeFormation/secondaire1/pdf/chapitre061v2.pdf> >. Consulté le 01-27-2014.
- Québec, Gouvernement du. 2007. *programme de formation de l'école québécoise, enseignement secondaire deuxième cycle*. < [http://www1.mels.gouv.qc.ca/sections/programmeFormation/secondaire2/medias/PFE\\_Q\\_Mathematique.pdf](http://www1.mels.gouv.qc.ca/sections/programmeFormation/secondaire2/medias/PFE_Q_Mathematique.pdf) >. Consulté le 01-27-2014.
- Québec, Gouvernement du. 2014. « Facteurs de succès de l'amélioration continue ». < [http://www.travail.gouv.qc.ca/publications/gestion\\_de\\_la\\_production/amelioration\\_de\\_la\\_qualite/facteurs\\_de\\_succes\\_de\\_lamelioration\\_continue.html](http://www.travail.gouv.qc.ca/publications/gestion_de_la_production/amelioration_de_la_qualite/facteurs_de_succes_de_lamelioration_continue.html) >. Consulté le 01-27-2014.
- Raisinghani, M. S., H. Ette, R. Pierce, G. Cannon et P. Daripaly. 2005. « Six Sigma: concepts, tools, and applications ». *Industrial Management + Data Systems*, vol. 105, n° Copyright 2005, IEE, p. 491-505.
- Rakotomalala, Ricco. 2008. « Tests de normalité Techniques empiriques et tests statistiques ». *Université Lumière Lyon 2*, p. 59.
- Richard M. Franza, Satya S. Chakravorty. 2009. « An Implementation Model for Six Sigma Programs ». In *PICMET proceedings*. (August 2-6).
- Ronald, D. Snee. 2010. « Lean Six Sigma – getting better all the time ». *International journal of Lean Six Sigma*, vol. 1, n° 1, p. 9-29.
- Rooney, James J., T.M. Kubiak, Russ Wescott, R. Dan Reid et Keith Wagoner. 2009. « Building From The Basics ». *Quality Progress*, p. 72.
- Shainin, Richard D. 2008. « Multi-Vari Charts ». In *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*. John Wiley & Sons, Ltd..

- Stagliano, Augustine A. 2004. *Rath & Strong's Six sigma advanced tools pocket guide*. New York: McGraw-Hill, viii, 222 p. p.
- Stefan H. Steinera, R. Jock MacKaya, John S. Rambergb. 2008. « An Overview of the Shainin System™ for Quality Improvement ». *Quality Engineering*, vol. 20, n° 1.
- Stocken, Patrick Hummel; John Morgan; Phillip C. 2011. « A model of Flops ». p. 39. Consulté le 10 juillet.
- Sunil, Sharma, et R. Chetiya Anuradha. 2010. « Six Sigma project selection: an analysis of responsible factors ». *International journal of Lean Six Sigma*, vol. 1, n° 4, p. 280-292.
- Tjahjono, B., P. Ball, V. I. Vitanov, C. Scorzafave, J. Nogueira, J. Calleja, M. Minguet, L. Narasimha, A. Rivas, A. Srivastava, S. Srivastava et A. Yadav. 2010. « Six Sigma: a literature review ». *International journal of Lean Six Sigma*, vol. 1, n° 3, p. 216-233.
- Tobin, Kenneth George. 1993. *The Practice of constructivism in science education*. Hillsdale; Hove: Lawrence Erlbaum Associates.
- Watzlawick, Paul. 1990. *L'Invention de la réalité contribution au constructivisme*. Seuil.
- Wessel, Godecke, et Peter Burcher. 2004. « Six sigma for small and medium-sized enterprises ». *The TQM Magazine*, vol. 16, n° 4, p. 264-272.
- Wheeler, Donald J. 1990. *Understanding industrial experimentation*, 2. SPC Press inc., 380 p.
- Wheeler, Donald J., et David S. Chambers. 1992. *Understanding statistical process control*, 2nd. Knoxville, Tenn.: SPC Press, xx, 406 p. p.