UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

RÉDUCTION DU TAUX DE REJET ET DE LA VARIATION DES DÉGAGEMENTS DANS LE COMPRESSEUR HAUTE-PRESSION LORS DE L'ASSEMBLAGE DE MOTEURS TURBOPROPULSEURS PAR L'UTILISATION DE L'ASSEMBLAGE SÉLECTIF

PIERRE-LUC ZAHARIA

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2012

© Pierre-Luc Zaharia, 2012.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

RÉDUCTION DU TAUX DE REJET ET DE LA VARIATION DES DÉGAGEMENTS DANS LE COMPRESSEUR HAUTE-PRESSION LORS DE L'ASSEMBLAGE DE MOTEURS TURBOPROPULSEURS PAR L'UTILISATION DE L'ASSEMBLAGE SÉLECTIF

présenté par : ZAHARIA Pierre-Luc

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph.D., président

M. BASSETTO Samuel, Doct., membre et directeur de recherche

M. RIVETTE Mickaël, Doct., membre et codirecteur de recherche

M. TRÉPANIER Martin, Ph.D., membre

DÉDICACE

Cet ouvrage est dédié à tous ceux, parents et amie, qui m'ont supporté durant ces trois années de dur labeur.

« La persévérance est la clé du succès »

REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier l'École Polytechnique de Montréal et Pratt & Whitney Canada, deux organisations de première classe, pour m'avoir donné cette opportunité et sans qui la réalisation de ce projet n'aurait pu être possible.

Plus spécifiquement, je me dois de souligner la contribution de certains employés de Pratt & Whitney Canada qui ont accepté généreusement de partager leurs connaissances et de m'aiguiller dans la bonne direction. Des employés tels qu'André Bergeron, Dominique Dugay, Charles Bolduc, Allan Cameron, Benoît Vincent et mon patron, Maged Youssef. Je remercie également mon stagiaire, Jonathan Pinoul pour ces conseils au niveau programmation.

Du côté universitaire, mes remerciements vont à mon directeur de recherche, Samuel Bassetto. Malgré un parcours qui n'a pas été facile, je suis très fier du travail accompli et de notre collaboration.

RÉSUMÉ

Avec plus de 15 000 composants et des dizaines de caractéristiques clés à respecter, l'assemblage d'un moteur d'avion turbopropulseur présente bien des défis. Parmi eux se trouvent la maîtrise de deux dégagements critiques à l'intérieur de la section du compresseur haute-pression. Le taux de rejet des moteurs dû au non-respect de ces dégagements est présentement établi à 33%. L'objectif de ce mémoire est de trouver une solution permanente, facilement implantable dans un environnement de production et sans aucun investissement significatif, qui permet de réduire ce taux de rejet élevé. Une recherche de la cause fondamentale du problème met en évidence que la variation dimensionnelle des pièces composant le compresseur haute-pression en est la source. À défaut de ne pas pouvoir maîtriser la variation des dimensions des pièces lors de leur fabrication sans devoir recourir à des investissements importants, la meilleure alternative disponible est de se concentrer sur la maîtrise de la propagation de la variation à travers l'assemblage. L'utilisation de l'assemblage sélectif est proposée pour y arriver. Par contre, contrairement aux travaux antérieurs référant à cette technique, l'assemblage en question est de nature longitudinale et non radiale, comporte un nombre important de composants, au lieu de seulement deux, et surtout, certains composants possèdes plusieurs dimensions qui sont liées aux deux dégagements à contrôler. Traditionnellement, les composants n'ont qu'une seule dimension impliquée dans la maîtrise d'un dégagement. Pour bien comprendre l'impact de ces composants multiparamétriques, une analyse de la chaîne de cotes de l'assemblage est réalisée. Cette étape permet d'identifier clairement quelles sont les dimensions « pièce » clés qui doivent être retenues pour l'analyse. Par la suite une méthode basée sur une étude du comportement statistique du procédé de fabrication de chaque dimension « pièce » ainsi que sur l'aspect de facilité d'implantation en milieu industriel est proposée afin d'établir la classification des pièces pour l'assemblage sélectif. Chaque procédé est assimilé à un type de distribution statistique et caractérisé par son indice de performance, le Ppk. Par la suite, un programme est créé pour construire une population virtuelle et effectuer une simulation d'assemblage. Cette population d'assemblages virtuels permet de tester l'efficacité de la solution en la comparant avec la situation réelle. Les résultats confirment que l'utilisation de l'assemblage sélectif a effectivement un effet positif sur la maîtrise de la variation à travers l'assemblage, mais qu'il y a encore des opportunités d'améliorations possibles.

ABSTRACT

With over 15 000 components containing multiple key characteristics to respect, the assembly of a turbopropeller plane engine presents several challenges. Among them is the control of two critical clearances inside the high-pressure compressor section. Currently, the engine rejection rate resulting from the failure to comply with these clearances is 33%. The objective of this paper is to find a permanent method to reduce this rejection rate, that can also be easily implemented within an assembly line environment and that does not require significant investments. Following a root cause analysis of this issue, the dimensional variation of the components was identified as the main contributor. Since trying to control the variation of the components can hardly be achieved without any significant investments, the best available alternative is to focus on controlling the variation propagation throughout the assembly itself. The use of selective assembly is proposed to achieve this goal. Contrary to previous papers published on selective assembly, this paper differs in many aspects, namely the clearances discussed are lengthwise and not radial, the assembly contains many parts instead of two, and most importantly, some components have more than one dimension which affects each clearance. Traditionally, each component has only one dimension that impacts only one clearance. To fully understand the impact of these multiparametric parts, a stack-up study of the assembly is performed. This analysis allows to clearly identify the key dimensions of each component that interact with the clearances. Subsequently, a method based on the statistical analysis of each of the key dimensions and their manufacturing processes, and the ease of implementation in a production environment requirement, is proposed to classify the parts for the selective assembly process. Each of the manufacturing processes is linked to a probability distribution function and characterized by its performance index, the Ppk. A computer program is then built to create a virtual population of parts and to create an assembly population. This virtual population is used to test the validity and efficiency of the proposed method by comparing it to the actual situation. The results of the simulation demonstrate that the use of selective assembly does have a positive effect on the control of the variation propagation, but that there is also still room for improvement.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES TABLEAUX IX

LISTE DES FIGURES X

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XII

LISTE DES ANNEXES XIII

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 PROBLÉMATISATION 5

1.1 Origine du problème industriel 5

1.2 Lien avec les approches théoriques 7

1.3 Revue de littérature 9

1.4 Positionnement de la recherche par rapport aux travaux existants et en cours 14

CHAPITRE 2 MÉTHODE DE TRAVAIL 16

2.1 Analyse dimensionnelle des paramètres d'assemblages et des composants 16

2.2 Hypothèses de travail 21

2.3 Démarche scientifique 22

CHAPITRE 3 PROPOSITION ET SIMULATION 24

3.1 Proposition 24

3.2 Modélisation 28

3.2.1 Recueil des données 28

3.2.2 Analyse des échantillons de données 29

3.2.3 Établissements des classes pour l'assemblage sélectif.....41

3.2.4 Simulation 41

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION..... 44

4.1 Présentation des résultats 44

4.2 Discussion 45

CONCLUSION 49

BIBLIOGRAPHIE 51

ANNEXES 56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Synthèse de la revue de littérature....13

Tableau 2.1 : Dimensions clés par pièce....19

Tableau 2.2 : Calculs des paramètres d'assemblage....20

Tableau 3.1 : Exemple de classification d'une pièce....27

Tableau 3.2 : Descriptions des échantillons de pièces....28

Tableau 3.3 : Résumé des résultats....40

Tableau 3.4 : Dimensions dominantes....40

Tableau 3.5 : Classification de la population virtuelle....41

Tableau 4.1 : 5 meilleures combinaisons....45

Tableau 4.2 : Comparaison simulation et actuelle....46

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Moteur PT6 1

Figure 2 : Dégagement #1 2

Figure 3 : Dégagement #2 3

Figure 1.1 : Diagramme d'Ishikawa 7

Figure 1.2 : Exemple d'assemblage sélectif 8

Figure 1.3 : Exemple de jeu radial 14

Figure 2.1 : Schéma de chaîne de cotes 17

Figure 3.1 : Principe du Ppk 25

Figure 3.2 : Analyse de la dimension "a" 30

Figure 3.3 : Analyse de la dimension "b" 31

Figure 3.4 : Analyse de la dimension "c" 31

Figure 3.5 : Analyse de la dimension "d" 32

Figure 3.6: Analyse de la dimension "e" 32

Figure 3.7 : Analyse de la dimension "f" 33

Figure 3.8 : Analyse de la dimension "g" 33

Figure 3.9 : Analyse de la dimension "h" 34

Figure 3.10 : Analyse de la dimension "i" 34

Figure 3.11 : Analyse de la dimension "j" 35

Figure 3.12 : Analyse de la dimension "k" 36

Figure 3.13 : Analyse de la dimension "m" 36

Figure 3.14 : Analyse de la dimension "p" 37

Figure 3.15 : Analyse de la dimension "q" 38

Figure 3.16 : Analyse de la dimension "r" 38

Figure 3.17: Algorithme de création et d'évaluation des combinaisons.....43

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

La liste des sigles et abréviations présente, dans l'ordre alphabétique, les sigles et abréviations utilisés dans le mémoire ou la thèse ainsi que leur signification. En voici quelques exemples :

PWC	Pratt & Whitney Canada
HP	Haute-pression
AS	Assemblage sélectif
TOL	Table of limits
pces	pièces

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : LISTE DES DISTRIBUTIONS ÉVALUÉES PAR « INDIVIDUAL DISTRIBUTION IDENTIFICATION »…….56

ANNEXE B : CALCUL DU PPK……57

ANNEXE C : ANDERSON-DARLING ET « P-VALUE »……61

ANNEXE D : TEST D'HYPOTHÈSE STATISTIQUE……..63

ANNEXE E : COMBINAISONS……65

ANNEXE F : RÉSULTATS DE LA SIMULATION……..68

INTRODUCTION

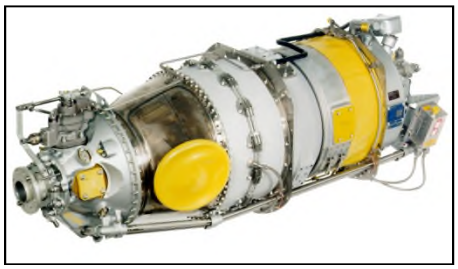


Figure 1 : Moteur PT6

La compagnie Pratt & Whitney Canada, partie de la corporation américaine United Technologies, fabrique des moteurs d'avions depuis bientôt 60 ans. Malgré sa fondation au début des années '30, ce n'est pas avant la fin des années '50 que cette compagnie aux origines modestes décide de se lancer dans la production de moteurs en série. Le premier modèle mis sur le marché, et toujours extrêmement populaire, fût le PT6, illustré à la figure 1. Cette première aventure dans le monde des turbines à gaz a connu un succès tellement important que le PT6 n'a jamais cessé d'évoluer depuis ce jour. En passant par des adaptations marine, ferroviaire et même automobile (Formule 1 Lotus et Corvette), le PT6 compte aujourd'hui plus de 60 différentes versions et au-dessus de 350 millions d'heures de vol[1].

Évidemment, le PT6 n'est pas la seule famille de moteur dans la gamme de produits de PWC. La compagnie offre un choix de 13 types de moteur à ses clients, dont les turbosoufflantes, turbomoteurs (hélicoptère), unité de puissance auxiliaire (APU – Boeing 747 et Airbus A380) ainsi que sa spécialité, les turbopropulseurs.

Cette dernière famille, celle des turbopropulseurs, contient évidemment les PT6, mais également les PW100 et 150, deux autres modèles plus gros et plus puissants. L'assemblage de ces deux derniers modèles, particulièrement pour le PW100, présente plusieurs défis de taille étant donné qu'un seul moteur contient plus de 15 000 composants à assembler. Un des problèmes majeurs auquel fait face la compagnie est au niveau du contrôle et respect de certains dégagements critiques dans le moteur. En effet, afin d'assurer le bon fonctionnement et le rendement optimal des moteurs, le département d'ingénierie a élaboré une table des limites (TOL) qui dicte plusieurs paramètres et consignes clés, tel que définis par Anna Thorton (Thornton, 1999), qui doivent être respectés durant l'assemblage, dont les serrages et ajustements ainsi que les dégagements requis à certains endroits.

---

[1] http://www.pt6nation.com

Dans le cas du moteur PW100, deux de ces dégagements se retrouvent dans la section du compresseur haute-pression. Le premier (fig. 2) a pour but d'assurer que le fond du compresseur centrifuge ne soit en aucun point plus bas que la partie la plus haute de l'entrée d'air vers la chambre à combustion. Si jamais ceci était le cas, alors l'écoulement fluide de l'air entrant dans la chambre à combustion serait perturbé, en plus d'être partiellement obstrué, et aurait un impact négatif sur le fonctionnement du moteur et ses performances.

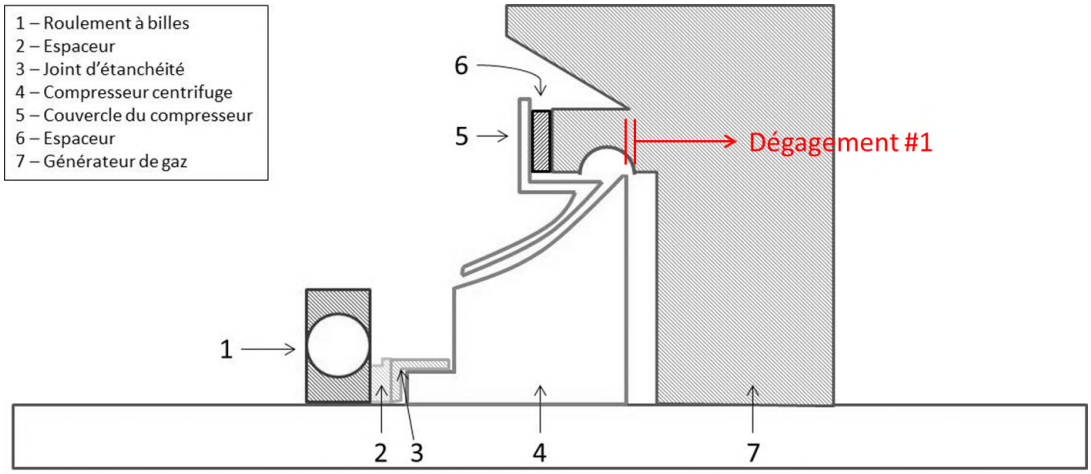


Figure 2 : Dégagement #1

Le deuxième dégagement (fig. 3) consiste à donner un espace suffisant entre le compresseur centrifuge et la pièce qui le protège afin d'éviter tout contact entre les deux et ce, même en prenant en considération l'expansion thermique des pièces. La sévérité des conséquences d'un dégagement insuffisant est relativement facile à prédire. À noter que les figures 2 et 3 ne sont qu'une représentation partielle de l'assemblage du compresseur et n'incluent pas toutes les pièces.

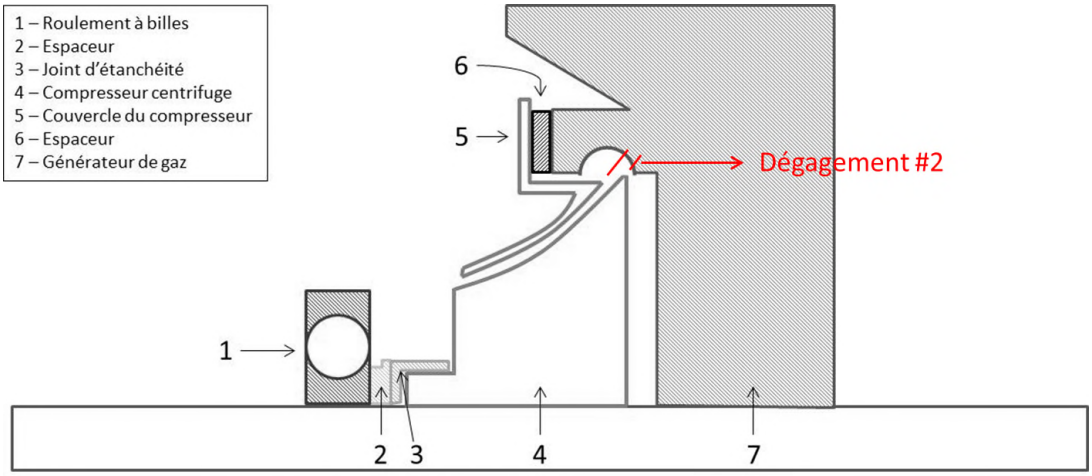


Figure 3 : Dégagement #2

Comme mentionné plus haut, le contrôle de ces dégagements représente un grand défi pour PWC. La situation présente est telle que le taux de rejet des moteurs à l'étape d'inspection de ces dégagements se maintien autour de 33%, donc 1 moteur sur 3. Lorsqu'un moteur est signalé défectueux, il faut le désassembler, changer des pièces et le réassembler par la suite. Ce travail supplémentaire engendre évidemment une augmentation des coûts de production dû au temps supplémentaire imputé au moteur. Il y a également un potentiel d'augmentation du coût causé par le remplacement de pièces endommagées, car à chaque fois qu'il y a une opération de désassemblage, le risque d'endommager ces pièces au cours de l'opération est très élevé. C'est donc dans ce contexte, et avec le mandat de résoudre ce problème récurrent, que s'inscrit le présent mémoire.

La cause fondamentale du problème de contrôle des dégagements est encore inconnue. C'est pourquoi une enquête est menée afin d'établir formellement cette dernière. Par la suite, cette cause est transformée sous forme de problème de recherche scientifique et suivie d'une revue de littérature identifiant les concepts susceptibles de pouvoir aider à sa résolution. C'est ce à quoi le premier chapitre de ce mémoire est consacré. Le deuxième chapitre développe la méthode de travail utilisée à travers le projet. C'est dans ce chapitre que se retrouvent une analyse dimensionnelle complète de l'assemblage du compresseur haute-pression ainsi que de ses composants, les hypothèses servant de prémices au travail accompli et finalement, la démarche scientifique appliquée pour tenter de résoudre la problématique à l'étude. La suite logique de ce

cheminement mène à la section où la proposition, ou hypothèse scientifique originale, est proposée et accompagnée d'une description de la méthode employée pour la tester et tenter de la valider. Le chapitre suivant est dédié à l'analyse des résultats obtenus et à une discussion entourant la signification de ceux-ci. Le mémoire se termine par une récapitulation globale en partant de l'origine du problème industriel étudié jusqu'aux conclusions tirées des résultats obtenus, en passant à travers les étapes intermédiaires du processus.

CHAPITRE 1 PROBLÉMATISATION

Avant de pouvoir établir un lien solide entre le problème d'assemblage des turbopropulseurs et les différents concepts théoriques susceptibles de pouvoir aider à sa résolution, une compréhension détaillée du phénomène est nécessaire ainsi que l'identification de sa cause fondamentale. La suite logique de cette démarche mène vers une revue de littérature et les divers travaux présentement en cours qui traitent de sujets similaires. La dernière section de ce chapitre est consacrée à illustrer les principales différences entre le cas de PWC et les travaux revus à travers la littérature et sert donc de justification pour le présent mémoire.

1.1 Origine du problème industriel

En réalisant l'assemblage du compresseur haute-pression en utilisant seulement les composants essentiels, il est théoriquement et pratiquement impossible d'obtenir les dégagements requis. Afin de contrer ce problème, les procédures d'assemblage font appel à deux pièces qui permettent de contrôler le déplacement des composants et par le fait même, de respecter les dégagements requis. Ces deux pièces sont semblables à des rondelles utilisées lors d'un assemblage avec une vis ou un boulon, mais sont beaucoup plus grandes. Elles sont désignées par l'appellation « espaceurs » dans le mémoire. Chacun de ces espaceurs est responsable de un des deux dégagements. Le premier, pièce #6 de la figure 2, détermine l'espace qu'il y aura entre le compresseur centrifuge et le couvercle qui le protège. Le deuxième, pièce #2 de la figure 3, quant à lui, est responsable du mouvement longitudinal du compresseur, donc de son positionnement par rapport à l'entrée d'air du générateur de gaz et de la chambre à combustion. Le dimensionnement des espaceurs, tout particulièrement leur épaisseur, est d'une importance primordiale étant donné que les positionnements dont ils sont responsables sont de l'ordre de 0,0254 mm (0,001 in). Ces épaisseurs sont déterminées en cours d'assemblage et diffèrent selon les particularités de chaque moteur. Pour les calculer, une série de mesures sont prises à travers les opérations d'assemblages et de sous-assemblages précédentes et sont par la suite utilisées dans une suite de formules qui sont en fait la représentation mathématique des chaînes de cotes de l'assemblage du compresseur. Les différentes épaisseurs des espaceurs, appelées « classe », sont standardisées et préfabriquées à l'avance. Elles sont tenues en inventaire directement sur ligne d'assemblage afin que l'assembleur puisse sélectionnée la taille la plus appropriée. Malgré

toute cette rigueur, le taux de rejet de cette portion de l'assemblage reste à 33%, et donc bien loin de l'objectif désiré.

À titre informatif, il est intéressant de mentionner que les mesures utilisées dans le dimensionnement des espaceurs proviennent de deux sources différentes :

1) La première source est le logiciel de support à l'assemblage utilisé chez PWC, eCates. Quelques pièces ont des dimensions clés gravées sur leur surface lorsqu'elles arrivent au centre d'assemblage. Ces données sont ensuite entrées dans eCates et conservées pour une utilisation future.

2) La deuxième source de données provient des étapes d'assemblage qui précèdent celle du compresseur haute-pression. En effet, les dimensions ne provenant pas directement des pièces sont en fait des dimensions d'assemblage qui sont enregistrées durant ce dernier. Les monteurs utilisent divers fixations qui permettent de mesurer ces paramètres et ceux-ci sont également enregistrés et conservés dans eCates.

Une des méthodes standards utilisées chez PWC pour déterminer la cause fondamentale d'une situation est la création d'un diagramme d'Ishikawa (« arêtes de poisson »). La figure 1.1 illustre le diagramme reflétant le problème en question. L'objectif principal de ce type de graphique est de permettre une identification claire et visuelle de toutes les causes pouvant contribuer au problème étudié. Les causes potentielles sont regroupées sous six différentes bannières, soit main d'œuvre, machine, matériel, méthode, mesure et milieu. Chaque cause doit être évaluée individuellement afin de déterminer si elle représente une cause fondamentale du problème ou non. Par exemple, l'item « prise de mesure » ne peut être retenu comme une cause fondamentale du problème à l'étude. Ces prises de mesures sont nécessaires car il est impossible de connaître à l'avance l'épaisseur requise de l'espaceur. Celle-ci est déterminée à l'aide de mesures prises lors des opérations précédentes. Mais pourquoi est-il impossible de connaître l'épaisseur requise en début d'assemblage? Parce que les pièces utilisées dans un moteur varient d'un moteur à l'autre, elles varient dimensionnellement, rendant ainsi l'utilisation d'un espaceur unique impossible. La cause « variation dimensionnelle » est donc l'origine de la cause « prise de mesure ». Il est possible d'effectuer une analyse similaire pour toutes les autres causes du diagramme de la figure 1.1, sauf pour celle de « variation dimensionnelle ». Celle-ci se doit donc forcément d'être la cause fondamentale du problème.

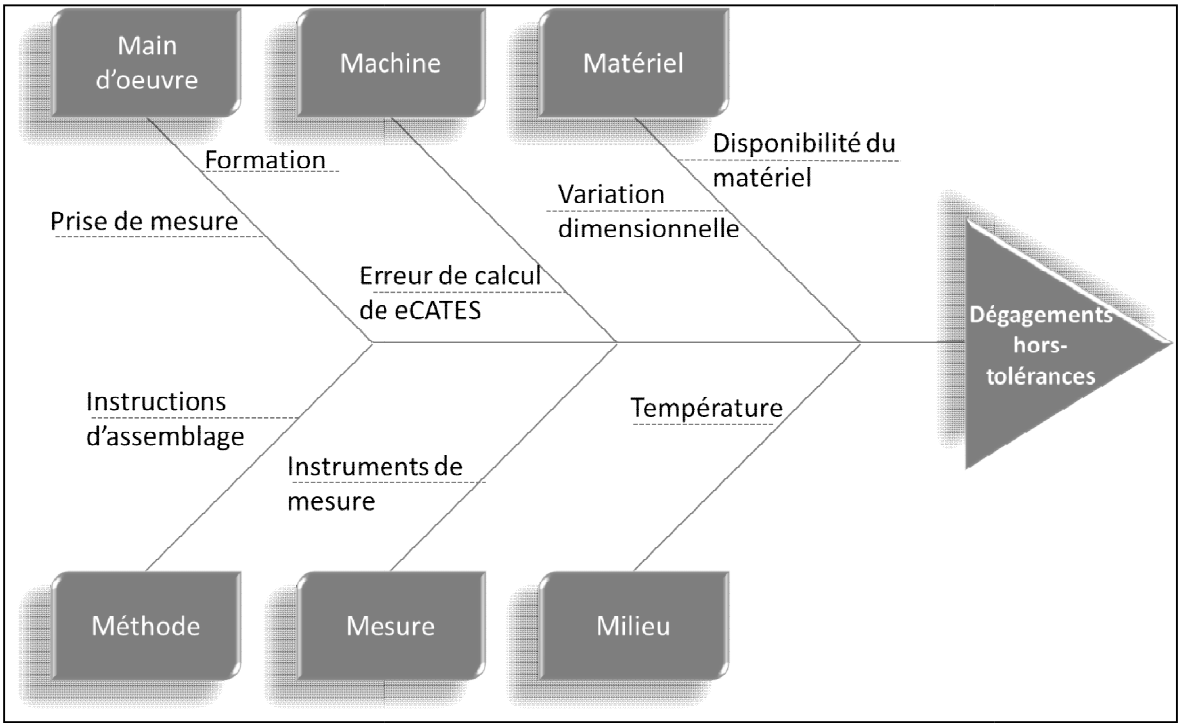


Figure 1.1 : Diagramme d'Ishikawa

Une piste de résolution du problème à l'étude serait donc d'essayer, si possible, d'éliminer, ou au moins de réduire au minimum, cette variation dimensionnelle. Cependant, en considérant que le tolérancement des pièces est déjà serré et que plusieurs initiatives sont déjà mises en place pour contrôler cette variation, le programme *ProCert* (similaire à 6sigma) par exemple, une initiative supplémentaire viendrait certainement avec un coût élevé. Il serait donc très intéressant de voir s'il y a un moyen de pouvoir atténuer les effets de cette variation à défaut de l'éliminer. Heureusement, un tel concept existe. Il s'agit de l'assemblage sélectif.

1.2 Lien avec les approches théoriques

Si le nom « assemblage sélectif » est peut-être méconnu, le principe qu'il représente, quant à lui, est chose courante. L'exemple le plus classique d'assemblage sélectif, qui sera appelé « AS » dans la suite du texte, est sans doute lorsqu'on assemble des axes dans des alésages. Évidemment, on essaye toujours d'assembler les plus grands axes avec les plus grands alésages et vice-versa (Bourgeois, 2007). Le principe d'assemblage sélectif se résume donc à essayer d'augmenter le rendement d'un processus quelconque en minimisant la variation des résultats de ce processus

sans toutefois recourir à des investissements significatifs. Pour y arriver, il faut tout d'abord mesurer les pièces, établir des « classes dimensionnelles », trier les pièces par classe et finalement, effectuer un jumelage des pièces selon leurs dimensions et classes. Il se peut également que l'assemblage sélectif soit le seul moyen de rencontrer les exigences fonctionnelles d'un assemblage. Tel est le cas dans les nano-assemblages où les tolérances sont plus serrées que n'importe quel degré de précision atteignable par un procédé de fabrication conventionnel actuel. Un exemple d'utilisation de l'AS est illustré à la figure suivante :

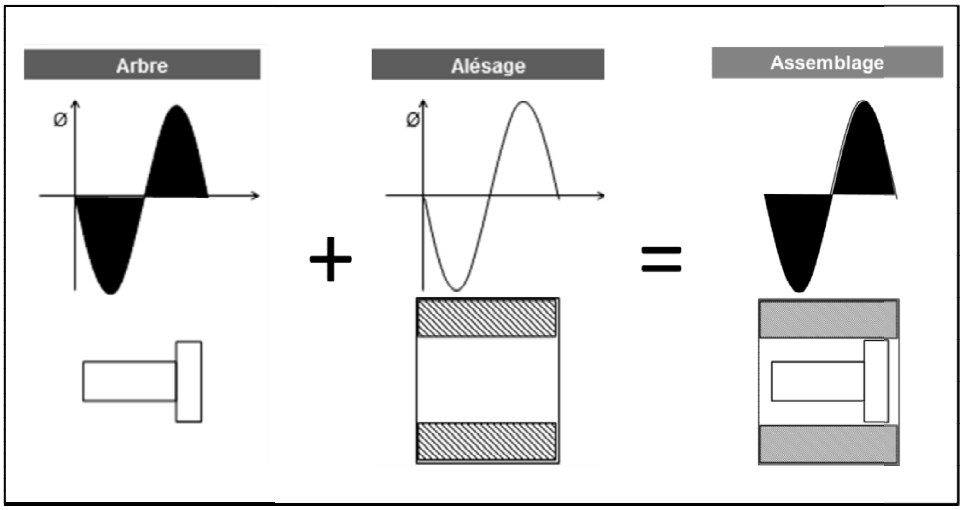


Figure 1.2 : Exemple d'assemblage sélectif

Les deux graphiques de la figure 1.2 représentent les profils dimensionnels d'une population de chacune des pièces d'un assemblage, soit un piston et un cylindre. Chaque pièce faisant partie d'une des deux populations respecte ses spécifications dimensionnelles et donc, l'assemblage aléatoire des n'importe quel piston et cylindre résultera en un assemblage sera également à l'intérieur de sa plage de tolérance. Par contre, le jeu entre composants de l'assemblage sera variable, car l'assemblage d'un petit piston et d'un grand cylindre ne retournera certainement pas le même jeu que l'assemblage d'un grand piston avec un petit cylindre. L'objectif recherché avec l'utilisation de l'assemblage sélectif est de jumeler chaque paire de composants de manière à ce que le jeu reste toujours constant. Le produit final d'un tel procédé est donc de meilleure qualité que celui d'un assemblage aléatoire, et ce, sans engendrer d'important coûts supplémentaires.

La procédure d'assemblage du compresseur haute-pression d'un moteur PW100 s'apparente déjà à un AS. La variation dimensionnelle de l'assemblage, causée par celle des composants et une chaîne de cotes non-maîtrisée, oblige la sélection de deux pièces, les espaceurs, en fonction des

dimensions relevées à travers celui-ci. Cette tentative d'ajustements en cours de l'assemblage, dans le but de minimiser le taux de rejet du processus, est une prise de décision sur les composants à utiliser et donc, un assemblage sélectif.

1.3 Revue de littérature

Si tel que mentionné plus haut le concept d'assemblage sélectif peut être appliqué de façon intuitive, ce n'est pas avant les années '20 que ce dernier fait son apparition dans la littérature. Dans son œuvre intitulée « *The Principles of Interchageable Manufacturing* », Buckingham établit la définition formelle du procédé d'AS ainsi que ses bases théoriques (Buckingham, 1921). Par la suite, ce n'est que dans l'après-guerre que recommencent les publications sur l'AS. On en retrouvera à intervalle régulier jusqu'au début des années '90 où il y a eu un nombre important de publications qui s'estompa par la suite. On peut classer les publications en 3 catégories :

1) Méthodes utilisées pour faire de l'AS
2) Impact sur l'attribution des tolérances de fabrication des composants dû à l'AS
3) Optimisation du processus d'AS

C'est Gaillard (Gaillard, 1945) qui est le premier à publier dans la première catégorie avec sa recherche sur les effets positifs et négatifs de l'AS, suivi de Conway (Conway, 1948) qui suit des lignes similaires. Un des principaux inconvénients de l'AS est la forte possibilité de se retrouver avec un grand nombre de pièces en surplus. Mansoor (MANSOOR, 1961) est l'un des premiers à se pencher sur le problème. En même temps, Desmond et Setty (Desmond & Setty, 1961) s'attaque à la problématique de l'implantation de l'AS dans les lignes manufacturières. Subséquemment, plusieurs auteurs proposeront de nouvelles méthodes pour procéder à l'AS, soit Glover avec les graphiques de réseaux bipartis (Glover, 1976), Rubenchik et al. avec une méthode de tri mécanique (Rubenchik, Mentov, & Novikov, 1979), Markov (Markov, 1987) et son algorithme d'association pour les composants électriques, Berzak (Berzak, 1992) avec l'inspection et le tri robotisé des pièces de l'AS, Fang et Zhang (Fang & Zhang, 1996) qui utilisent la théorie de l'union des ensembles pour obtenir un jumelage très performant, Duenyas et al. (Duenyas, Keblis, & Pollock, 1997) qui transforment l'AS en problème décisionnel de

Markov et finalement, Thesen et Jantayavichit (Thesen & Jantayavichit, 1999) qui proposent la création d'un stock pré-assemblage pour soutenir le procédé d'AS.

Le deuxième sujet mis en évidence dans les publications sur l'assemblage sélectif est la possibilité d'utiliser ce dernier afin d'améliorer l'allocation des tolérances de fabrication des composants d'un assemblage (Kulkarni & Garg, 1985). Chen reprends la même idée, mais cette fois-ci en transformant le problème en une optimisation à plusieurs variables dont l'une d'entre elles est le coût de fabrication des pièces (Chen, 1996). Cet ouvrage est d'un grand intérêt pour le monde des opérations, car il démontre qu'il est possible d'ouvrir les tolérances de fabrication des pièces, donc d'en réduire le coût de production, jusqu'à un certain point sans nécessairement impacter la qualité de l'assemblage final. Ce principe peut également s'appliquer dans le monde des micro-assemblages. En effet, la précision des outils de fabrications actuels n'a pas complètement emboîté le pas avec la miniaturisation des systèmes (Bourgeois, 2007). Cependant, si on peut utiliser l'AS pour relaxer les tolérances de fabrication, on peut également l'utiliser afin d'augmenter la précision d'un assemblage sans toutefois avoir à augmenter la précision de fabrication des composants (Koelemeijer Chollet, 2001).

La troisième, et définitivement la plus volumineuse, catégorie de publications sur l'AS est celle où l'on discute de l'optimisation des divers procédés d'AS. Cette catégorie se veut tellement riche en publications qu'elle doit être subdivisée en 4 sous-catégories :

1) Création des « classes » de pièces
2) Efficacité du processus (pièces en surplus, taux de rejet, rapidité, etc.)
3) Réduction du coût de fabrication des pièces
4) Ajustement en cours de fabrication et séquencement des opérations

Le premier à s'être intéressé à la génération de classe est Pugh. Ses travaux portèrent majoritairement sur la création d'algorithmes permettant l'optimisation de la création des classes (Pugh, 1986). Il s'intéressa par la suite, comme Chan et Linn (Chan & Linn, 1999), à la création des classes pour des composants avec des distributions non-normales et non-similaires (Pugh, 1992). Chan et Linn proposent une nouvelle méthode qui a également comme avantage de grandement réduire le nombre de pièces en surplus, soit d'établir les classes des différentes pièces de manière à ce que chaque classe correspondante contienne le même nombre de composants, par

opposition à des classes basées sur une division égale du tolérancement. D'autres auteurs, comme Arai et Takeuchi (Arai & Takeuchi, 1992) se penchèrent sur l'importance des améliorations engendrées par l'AS sur un procédé en fonction du nombre de classes créées.

Du point de vue optimisation de l'AS, Markov (Markov, 1964) et Bonch-Osmolovski et Vechtomova (Bonch-Osmolovskii & Vechtomova, 1971) s'intéressèrent tout d'abord à l'impact que peuvent avoir les instruments de mesures utilisés dans le processus. Bonch-Osmolovski et Vechtomova arrivèrent à l'intéressante conclusion que même si la précision de la mesure servant au tri des pièces en différentes classes est un facteur important dans le rendement de l'AS, il n'est pas nécessaire, sauf dans quelques cas particuliers, d'exiger une précision de mesure extrême pour obtenir de bons résultats. Par la suite, d'autres auteurs tels que Robinson et Mazharsolook (Robinson & Mazharsolook, 1993), Coullard et al. (Coullard, Gamble, & Jones, 1998) et Mease et al. (Mease, Nair, & Sudjianto, 2004) proposent différents nouveaux algorithmes qui ont pour but d'optimiser le jumelage des classes lors d'un assemblage sélectif afin d'en améliorer son rendement.

Un autre volet de recherche pour l'optimisation de l'AS se concentre uniquement sur la réduction du nombre de pièces en surplus après l'assemblage. Tel que mentionné plutôt, un des principaux problèmes de l'AS est le fait que de par la nature du processus de jumelage, il y a des fortes chances que des composants ne puissent être jumelés correctement et soit donc rebutés (MANSOOR, 1961). Pour y remédier, plusieurs chercheurs mettent à bonne escient les progrès dans le domaine de l'informatique et dans la puissance des ordinateurs pour créer des algorithmes génétiques capable d'adresser ce problème. Kannan et Jayabalan lancent leur algorithme au début des années 2000 (Kannan S. & Jayabalan V.,2001). En même temps, Wang et al. (Wang, Li, & Chen, 2011) proposent qu'un meilleur contrôle de la variation des caractéristiques résultant de l'assemblage, le jeu entre un piston et son cylindre par exemple, permettraient également de réduire le nombre de pièces en surplus. Cette piste est poursuivie par Asha et al. (Asha, Kannan, & Jayabalan, 2008) en 2008 pour finalement aboutir avec les travaux de Raj et al. (Raj, Sankar, & Ponnambalam, 2011) qui publient un algorithme permettant d'atteindre un optimum entre le contrôle de la variation de l'assemblage et le nombre de pièces en surplus.

Vers la fin des années '90 quelques auteurs, dont Kwon et al. (Kwon, Kim, & Chandra, 1999) et Keblis et Duenyas (Keblis & Duenyas, 1999), se penchèrent plus particulièrement sur la question

du coût de l'AS. L'œuvre de Keblis et Duenyas étudie la meilleure option entre attendre d'obtenir les pièces ayant le meilleur jumelage possible, et le coût de gestion d'inventaire associé, ou procéder simplement à un assemblage avec une combinaison de pièces non-optimales, tout en considérant le taux d'échec potentiel.

Parallèlement à tous les travaux mentionnés ci-haut, d'autres chercheurs ont plutôt exploré les différents mécanismes d'ajustement de la production en cours et le séquencement des opérations afin d'obtenir le meilleur AS possible. Ce concept est particulièrement intéressant pour les industries à faible volume et haute complexité, telle que l'industrie aérospatiale, qui ne peuvent se permettre de générer et stocker une grande quantité de pièces pour accommoder l'AS. Ce courant de philosophie fût piloté par Bjørke (Bjørke, 1978) qui a su mettre à profit les avancements dans le domaine des machines à contrôle numérique pour permettre d'orienter la production afin de produire les classes de pièces requises. Par la suite, Lee et al. (Lee, Hausman, & Gutierrez, 1990) et Iwata et al. (Iwata, Matsui, & McCormick, 1998) suivirent un cheminement similaire.

Le tableau 1.1 présente une synthèse de tous les ouvrages cités plus haut en plus d'apporter une précision sur le type d'assemblage utilisé pour tester leurs concepts.

Tableau 1.1: Synthèse de la revue de littérature

Thème de recherche	Type de problème étudié	# de composants	Auteurs
Méthode pour réaliser l'AS	Assemblage radial	2	Buckingham
			Gaillard
			Conway
			Mansoor
			Fang and Zhang
		>2	Glover
			Rubenchik et al.
	Assemblage électrique	>2	Desmond et Setty
			Markov
	Autre	2	Berzak
			Duenyas et al.
			Thesen and Jantayavichit
Attribution des tolérances des composants	Assemblage longitudinal	>2	Chen
	Autre	>2	Koelemeijer Chollet
			Kulkarni et Garg
Optimisation de l'AS			
Création des classes de pièces	Assemblage radial	2	Chan et Linn
			Zhang et Fang
	Autre	>2	Pugh
			Arai et Takeuchi
Efficacité du processus	Impact des instruments de mesure	>2	Markov
		2	Bonch-Osmolovski et Vechtomova
	Assemblage radial	2	Fang et Zang
			Asha et al.
			Victor Raj et al.
		>2	Coullard et al.
	Assemblage longitudinal	>2	Wang et al.
	Autre	>2	Kannan et Jayabalan
			Mease et al.
Réduction du coût de l'assemblage	Assemblage radial	2	Kwon et al.
	Coût des inventaires pour l'AS	1	Keblis et Duenyas
Ajustement en cours de la production	Autre	2	Bjorke
			Lee et al.
	Séquencement des opérations	>2	Iwata et al.

1.4 Positionnement de la recherche par rapport aux travaux existants et en cours

Le projet présentement à l'étude se différencie des travaux cités plutôt ainsi que des autres travaux actuellement en cours en quatre points :

1) L'assemblage du moteur PW100 donne lieu à un problème de nature longitudinale et non radiale comme celle étudiée dans la plupart des travaux cités plus haut.
2) Le nombre de composants est plus élevé que dans les travaux déjà publiés.
3) Les composants ont plusieurs dimensions clés qui ont un impact sur les mêmes caractéristiques clés, les dégagements, contrairement aux autres cas où chaque dimension clé n'a d'influence que sur une caractéristique clé.
4) La solution retenue à la fin de ce projet doit être facilement implantable dans un environnement de production à faible volume et sans investissement significatif, tandis que les solutions présentement disponibles sont difficilement implantables et nécessite un volume de production élevée.

En premier lieu, la vaste majorité des publications existantes traitent uniquement de l'assemblage sélectif avec des composants cylindriques tel qu'illustré à la figure 1.2. L'exemple classique, tel que mentionné dans l'introduction, est l'assemblage sélectif d'un arbre avec un alésage. La plupart des différentes techniques d'AS ou d'optimisation de l'AS ont été construites sur mesure pour ce problème, mais ne s'applique pas aussi bien au cas étudié dans ce mémoire étant donné la nature longitudinale et non axiale de ce dernier.

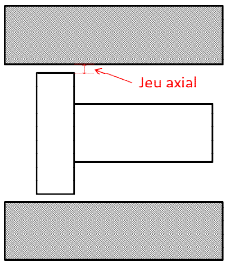


Figure 1.3 : Exemple de jeu radial

Ce caractère radial des problèmes précédemment étudiés ouvre la porte au deuxième point différenciateur, le nombre de dimensions impliquées. En effet, l'assemblage arbre-alésage se fait

plus souvent qu'autrement avec seulement deux pièces, soit l'arbre et le morceau contenant l'alésage, et donc ne contient qu'une seule dimension à optimiser, le jeu entre les deux composants. L'assemblage du compresseur haute-pression d'un moteur PW100 contient quant à lui 10 (8 plus 2 espaceurs) pièces critiques résultant en 2 dégagements à respecter et à optimiser. Ce niveau de complexité supérieur ne permet pas l'utilisation tel quel des solutions proposées auparavant.

Cependant, il y a quand même quelques auteurs qui se sont récemment penchés sur l'optimisation multiparamétrique de l'assemblage sélectif. MM. Asha (Asha et al., 2008) et Victor Raj (Victor Raj et al., 2011) ont tous deux publiés une technique d'optimisation multiparamétrique pour l'assemblage sélectif en utilisant un algorithme génétique. Ces 2 travaux sont d'un grand intérêt étant donné qu'ils sont ce qui se rapprochent le plus du cas du PW100. Le problème à l'étude dans leurs articles est l'assemblage piston-cylindre d'un moteur à combustion. Bien qu'il s'agit quand même d'un problème de type « arbre-alésage », cette fois-ci le piston comporte plus d'une caractéristiques clés et donc plus d'un jeux ou dégagements à considérer. Malgré tout, lorsqu'on regarde l'assemblage, même si le piston possède plusieurs dimensions importantes, chacune de ces dimensions n'a d'influence que sur un dégagement en particulier. Ce faisant, chaque dimension peut donc être classée indépendamment des autres et le problème d'optimisation en devient un d'optimum de Pareto où l'algorithme devra trouver le meilleur compromis entre chaque optimum des différents dégagements. À l'opposé, dans la situation du PW100, au moins 3 pièces contiennent plusieurs dimensions critiques et chacune de ces dimensions a une influence directe sur les mêmes 2 dégagements, rendant la situation encore plus complexe et unique que ceux trouvées dans la littérature.

Finalement, presque toutes les publications citées précédemment proposent des techniques d'AS ou des algorithmes d'optimisation assez complexe se basant sur des principes mathématiques avancés et un volume de production plutôt élevé. Rare sont ceux qui proposent une solution facilement implantable dans une chaîne de montage et dans un environnement à faible volume de production, surtout à moindre coût. C'est précisément l'objectif visé par ce mémoire.

CHAPITRE 2 MÉTHODE DE TRAVAIL

Tel que mentionné dans le chapitre 1, une des techniques privilégiées chez PWC pour déterminer la ou les cause(s) fondamentale(s) d'un problème est l'utilisation du diagramme d'Ishikawa (Fig. 4). Ce diagramme permet de mettre en évidence plusieurs items contribuant au problème d'assemblage du PW100, dont un en particulier : la variation dimensionnelle des pièces. En effet, c'est cette variation qui oblige l'utilisation des espaceurs et donc, la prise de plusieurs mesures pour en déterminer l'épaisseur requise. La section qui suit est consacrée à illustrer quel est l'impact réelle de cette variation au niveau de l'assemblage, lister les hypothèses utilisées durant l'analyse de la situation et se termine par la proposition d'une démarche scientifique permettant, dans le meilleur des cas, d'apporter une résolution définitive du problème.

2.1 Analyse dimensionnelle des paramètres d'assemblages et des composants

L'assemblage du compresseur haute-pression d'un moteur PW100 comporte plus d'une centaine de pièces. Par contre, seulement 8 d'entre elles ont un impact direct sur les 2 dégagements à contrôler. Chacune de ces pièces est fabriquée à partir d'un procédé de fabrication unique qui inclut, entre autre, plusieurs caractéristiques dimensionnelles à respecter (les dimensions de la pièce). Malgré tous les efforts déployés par le département des méthodes et fabrication pour contrôler ces procédés et produire des pièces sans variation, cette dernière est encore présente dans toutes les dimensions des pièces. Cette variation au niveau « pièce » est donc transmise au niveau « assemblage » et finalement au niveau des dégagements à contrôler. Si le fait qu'il y ait une transmission de la variation est facile à comprendre, le mécanisme par lequel elle se propage, lui, ne l'est pas. Il y a effectivement deux éléments qui posent problème à sa compréhension. Le premier obstacle à surmonter est que les dimensions « pièce » qui sont à la base de cette propagation de variation ne sont pas connues. Chaque pièce contient évidemment des dizaines de dimensions, mais celles qui ont un impact direct sur la maîtrise des dégagements ne sont pas encore identifiées. Le deuxième obstacle est que même si elles étaient connues, le système eCates n'enregistre pas ces données lors des opérations d'assemblage. Ces deux difficultés font qu'il est impossible de pouvoir tracer un lien direct entre la variation des dégagements, celle des dimensions d'assemblages et celle des dimensions « pièce ». La solution pour surmonter ces

deux obstacles est d'utiliser le concept de chaîne de cotes pour être en mesure de « traduire » les dégagements et les dimensions d'assemblage en termes de dimensions « pièces ». Une fois cet exercice complété, les dimensions « pièce » clés seront clairement identifiées. L'étape suivante est de recueillir assez de données sur ces dimensions clés pour qu'elles puissent être analysées et servir de base pour les travaux à venir. L'étude de ces chaînes de cotes permet de conclure qu'au total, il y a 15 dimensions provenant de 8 pièces qui ont un rôle à jouer dans le contrôle de 14 paramètres d'assemblage et de deux dégagements. Évidemment, le meilleur moyen d'illustrer tous les items mentionnés ci-haut serait de créer un schéma les représentant. Malheureusement, pour des raisons de protection de la propriété intellectuelle de PWC, un tel schéma n'est pas publiable. Le concept de traduction énoncé plus haut est donc représenté par un schéma plus général (Figure 2.1).

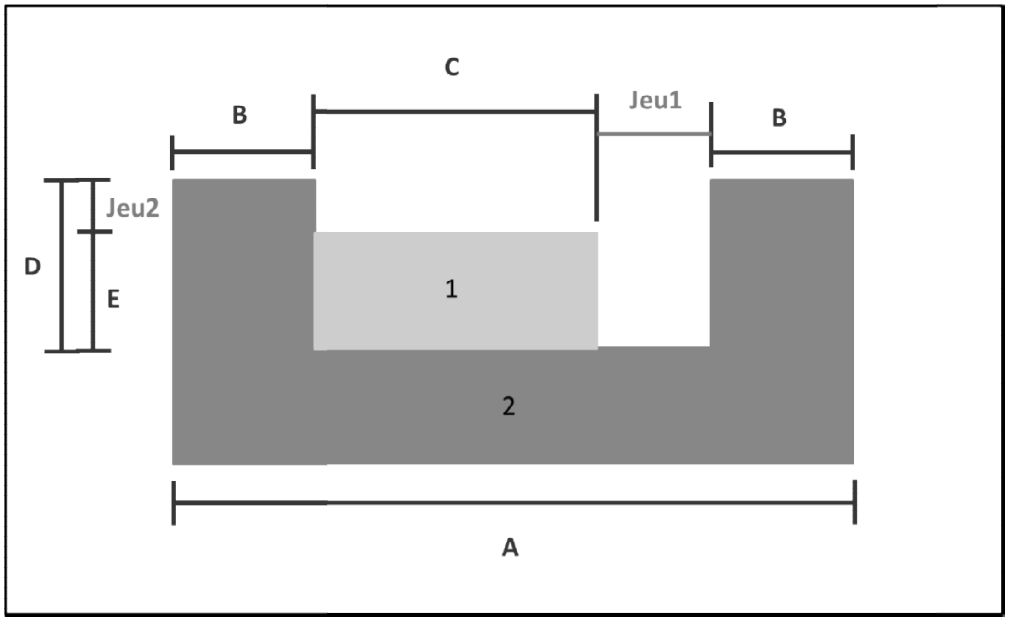


Figure 2.1 : Schéma de chaîne de cotes

Le schéma ci-dessus représente un assemblage simple de deux pièces et de deux jeux à contrôler. Les chaînes de cotes ou formules pour calculer les jeux sont donc :

$$A - 2B - C = Jeu1$$

$$D - E = Jeu2$$

Ces deux chaînes de cotes identifient que les dimensions « pièces » clés qui sont impliquées dans le calcul des paramètres d'assemblage, « Jeu1 » et « Jeu2 » sont les dimensions A, B et C pour le « Jeu1 », tandis que D et E le sont pour « Jeu2 ». Cet assemblage est effectivement plus simple que celui du compresseur haute-pression d'un moteur PW100, mais il illustre quand même les deux problématiques qui composent le problème à l'étude ainsi que le principe à appliquer pour le solutionner :

Problématique #1 : Les deux pièces formant l'assemblage ont chacune une influence sur les deux paramètres d'assemblage, soit « Jeu1 » et « Jeu2 ».

Problématique #2 : Il est impossible de modifier les dimensions « pièce » dans l'espoir d'améliorer la maîtrise d'un des deux jeux sans avoir un impact sur l'autre. Par exemple, si la pièce #1 est remplacée pour avoir un meilleur « Jeu1 », il faut s'attendre à ce que le « Jeu2 » soit également différent étant donné la variation dimensionnelle de chaque pièce.

Principe : Décomposer à l'aide des chaînes de cotes les paramètres d'assemblage pour les traduire en dimensions « pièce ». Cela permet d'identifier quelles sont les dimensions « pièce » qui sont impliquées dans la maîtrise des dégagements.

L'exemple de la figure 2.1 est simple en comparaison avec l'assemblage du compresseur haute-pression d'un moteur PW100, mais il reflète quand même fidèlement le concept de « traduction » des paramètres d'assemblages en dimensions « pièce ». Le tableau 2.1 ci-dessous résume le nombre de dimensions clés par pièces, les équivalents des dimensions A, B, C, D et E de l'exemple de la figure 2.1 et le tableau 2.2 présente les résultats de l'exercice de « traduction » des paramètres d'assemblage. Les dimensions « pièces » clés sont notées « a » à « r », tandis que les paramètres d'assemblages sont représentés par les lettres « A » à « S ».

Tableau 2.1 : Dimensions clés par pièce

Pièce	Dimension clé
Générateur de gaz	a
	b
	c
	d
Compresseur centrifuge	e
	f
	g
	h
Joint d'air	i
Support Flexible	j
Roulement à billes No.4	k
	m
Couvercle compresseur centrifuge	p
Boîtier inter-compresseur	q
Couvercle pour roulement No.4	r

Le tableau 2.1 indique donc que le générateur de gaz et le compresseur centrifuge comporte 4 dimensions « pièce » clés chacun. Les joint d'air, support flexible, couvercle du compresseur, boîtier inter-compresseur et couvercle du roulement No.4 en ont chacun une, et finalement, le roulement à billes No.4 en a deux.

Tableau 2.2 : Calculs des paramètres d'assemblage

Dimension d'assemblage normalisée	Formule normalisée
A	r - j
B	(h + i) - (d - a)
D	(L - cste1) - (O - I)
E	k - m/2
F	(f + i) - (f - e + I + o - p)
Espaceur #1 (H)	(q + a + cste1) - (F + I)
I	Non-mesurable en terme de dimension pièce - Représenter par moyenne historique
K	(d - a) - (f - h)
L	(g + e - h) - (c - d)
M	A + E
N	K - b + cste2
O	e + g + i - F - Q - (c - d)
P	e + g + i + H + M - q - c
Espaceur #2 (Q)	(B + N + cste1) - (F + I)
Dégagement # (R)	(P - O + I)
Dégagement #2 (S)	N - D

Tel que mentionné à l'intérieur du le tableau 2.2, le paramètre d'assemblage I, de par sa nature, ne peut être traduit en termes de dimensions « pièce ». Pour les calculs et analyses à venir, il sera donc représenter par sa moyenne historique.

2.2 Hypothèses de travail

La proposition et la modélisation du prochain chapitre sont basées sur 3 hypothèses de départ. Ces hypothèses ont pour but de pouvoir bien centrer le travail sur l'étude de la propagation de la variation à l'intérieur de l'assemblage et comment la contrôler en éliminant d'autres facteurs qui pourraient détourner les travaux de l'objectif final.

1) 100% des pièces qui se rendent au centre d'assemblage sont bonnes

   Sans cette affirmation de base, il serait possible de conclure que le manque de contrôle des dégagements est causé par l'utilisation de composants hors-tolérances et cela nuirait à l'étude de la variation. De plus, en considérant tous les contrôles déjà en place pour s'assurer que chaque pièce respecte son dimensionnement, il est très raisonnable de poser cette hypothèse.

2) Chaque dimension « pièce » clé d'une même pièce est indépendante des autres

   Cette hypothèse permet d'évaluer chaque dimension « pièce » clé d'une façon complètement indépendante les unes des autres. Le concept d'assemblage sélectif consiste à trier les pièces selon leurs dimensions en différentes classes. Lors de l'assignation des classes, si les dimensions n'étaient pas indépendantes les unes des autres, il faudrait donc tenir compte de ce lien inter-dimensionnelle et cela pourrait limiter le choix de classe pour chacune des dimensions. Par exemple, si les dimensions « a » et « b » du générateur de gaz étaient dépendantes, cela voudrait dire que la classe de « b » serait déterminée à l'avance par la classe de « a », ou vice-versa. Ce faisant, cela empêcherait de pouvoir explorer toutes les combinaisons de classes possibles et donc, réduirait la possibilité de trouver une solution optimale au problème étudié. De plus, une revue antérieure de la gamme de fabrication des 8 composants de l'assemblage montre qu'il est acceptable de poser une telle hypothèse.

3) Le procédé de fabrication pour chaque dimension est statistiquement sous contrôle

Afin de pouvoir appliquer la proposition soumise au chapitre suivant, il faut procéder à des analyses de *capabilité* des procédés de fabrication pour chaque dimension « pièce » clé. Hors, selon la théorie du contrôle statistique des procédés, il est inutile de réaliser une étude de *capabilité* si le procédé étudié n'est pas statistiquement sous contrôle car elle n'aurait pas de signification. À défaut de pouvoir de réaliser une telle étude sur toutes les dimensions étudiées, il est logique et raisonnable de considérer cette hypothèse étant donné que le procédé de fabrication pour chaque pièce est mature et que plusieurs autres dimensions sont déjà contrôlées statistiquement.

2.3 Démarche scientifique

La première étape de cette démarche scientifique est de formuler une proposition, ou hypothèse scientifique originale, qui a pour objectif la résolution du problème à l'étude. Cette proposition doit évidemment s'appuyer sur les informations et résultats découlant des sections précédentes, soit la revue de littérature, l'analyse dimensionnelle et les hypothèses de bases.

Par la suite, une fois l'hypothèse émise, la construction d'un modèle pour la tester et ensuite la valider, ou la rejeter, est nécessaire. Ce modèle doit être construit de manière à refléter le plus fidèlement possible la réalité. Le meilleur moyen de s'en assurer est donc de le construire à partir de données réelles. Idéalement, le modèle devrait représenter les moteurs qui ont été rejetés lors de l'inspection après l'assemblage du compresseur haute-pression. Cela permettrait de pouvoir évaluer l'efficacité de la proposition directement au cœur du problème. La validation serait facile, car il ne suffirait que d'évaluer combien de moteurs elle a permis de sauver. Malheureusement, ce scénario idéal n'est pas réalisable. Bien qu'eCates enregistre certains paramètres, tel que mentionné à la section 2.1, il n'enregistre pas toutes les données nécessaires à la construction du modèle. En particulier, il n'enregistre pas les dimensions « pièces » des composants du moteur. Il est donc impossible d'obtenir un historique de ces dimensions clés qui pourraient servir de base à la construction d'un modèle. L'autre option possible serait de faire mesurer les pièces avant qu'elles ne soient installées dans un moteur et de surveiller ces moteurs

lors de l'inspection finale. Par contre, cela demanderait beaucoup trop de temps pour être en mesure d'établir une représentation significative. La seule autre alternative présente qui permettra de construire un modèle est donc de faire mesurer des pièces qui ne sont pas encore installées et de construire un modèle uniquement à partir de ces données. La cadence de production des pièces étant beaucoup plus rapide que celle des moteurs, pour alimenter les besoins du marché des pièces de rechange entre autre, le temps requis pour obtenir un bon échantillon de pièces s'en trouve fortement diminué.

N'ayant pas accès à l'historique des moteurs rejetés, l'autre façon de pouvoir valider, ou rejeter, l'hypothèse émise est de la tester à l'aide d'une simulation. À partir d'une population de pièces créée avec le modèle construit précédemment, il possible de procéder à un assemblage « virtuel » de ces pièces et ainsi d'obtenir une population de moteur. La validité de l'hypothèse pourra être vérifiée par l'analyse des dégagements observés dans ces moteurs virtuels. Cependant, les formules utilisées pour déterminer les espaceurs qui seront utilisés dans ces assemblages virtuels sont telles que par défaut, les dégagements seront à l'intérieur des tolérances requises. La seule variable qui demeure disponible pour être analysée est donc l'épaisseur des espaceurs virtuels. Cette variable est d'autant plus intéressante que les valeurs réelles des espaceurs sont enregistrées dans eCates et donc, il sera possible de comparer les résultats virtuels et réels.

Le taux d'efficacité du procédé d'assemblage est présentement évalué sur une période annuelle, donc, par souci de fidélité, la simulation devra également reflétée une production annuelle. Le volume de production annuelle pour les moteurs PW100 est d'approximativement 200 unités par année. La simulation devra donc fournir au minimum 200 assemblages virtuels afin d'établir une base de comparaison réaliste.

Les données disponibles dans eCates permettent d'établir combien d'épaisseurs différentes sont utilisées pour les deux espaceurs dans les moteurs au courant d'une année, ainsi que la variation (écart-type) à l'intérieur de cette population d'espaceurs. Ces mêmes statistiques seront donc calculées pour la population d'espaceurs virtuels. La proposition sera donc validée si les résultats de la population virtuelle montre une réduction significative du nombre d'épaisseurs utilisées ainsi que de la variation cette population, sinon elle sera rejetée.

CHAPITRE 3 PROPOSITION ET SIMULATION

La faible performance du procédé d'assemblage du PW100 étant un réel problème industriel, il est important de se rappeler que la proposition suivante doit non-seulement être en mesure d'améliorer l'efficacité du procédé, mais doit également être implantable dans la chaîne de production et ce, au moindre coût possible. Le but de ce projet est d'une partie de trouver une solution au problème de contrôle des dégagements, mais d'également d'en trouver une facilement implantable sur la ligne de production et à moindre coût. Pour ce faire, il faut éviter d'utiliser une méthode de classification des pièces compliquée qui ne peut être faite directement sur la ligne ou encore qui a besoin d'un niveau de stock élevé pour fonctionner. La méthode proposée dans ce travail en est donc une qui répond aux deux critères ci-haut. La méthode de classification suggérée est de n'utiliser que deux classes de pièce avec la moyenne historique du procédé de fabrication de chaque dimension comme limite de classification.

3.1 Proposition

Dans sa plus simple expression, la proposition de ce mémoire se résume à utiliser le concept d'assemblage sélectif afin de classer les différentes composants du compresseur haute-pression et ainsi réduire la variation des espaceurs, et des dégagements, et donc le taux de rejet des moteurs. Le problème majeur que pose cette situation est que contrairement aux autres cas étudiés précédemment, cet assemblage comporte plusieurs pièces complexes ayant chacune plusieurs dimensions qui impactent les dégagements en question. Même les travaux de MM. Asha (Asha et al., 2008) et Victor Raj (Victor Raj et al., 2011) ne résolvent pas cette problématique étant donné que les multiples dimensions des pièces n'ont un impact que sur un dégagement à la fois, ce qui ramène le tout à de l'optimisation « 1 pour 1 » et à l'optimum de Pareto. De plus, comme mentionné auparavant, ces techniques ne sont pas facilement implantables dans un environnement de production à haute-complexité et faible volume.

Parmi les 8 pièces déterminées critiques à l'assemblage du compresseur HP, 5 d'entre elles ne poseront pas de problème quant à leur classification, car elles ne possèdent qu'une seule dimension critique. Le problème de classification réside parmi les 3 autres pièces multi-caractéristiques.

Comment faire pour « étiqueter » une pièce avec une classe lorsque celle-ci comporte plusieurs caractéristiques qui doivent être classées? Le but de ce projet est de diminuer la variation à travers l'assemblage, alors pourquoi ne pas se baser sur la variation des dimensions « pièce » pour établir leur classe. En effet, tel que mentionné dans les hypothèses de bases, toutes les dimensions « pièce » clés sont indépendantes les unes des autres. Il en va de même pour leur procédé de fabrication. Ce faisant, il est possible de caractériser ces processus selon une série de tests qui détermineront leur comportement statistique. Le premier test administré est le test d'Anderson-Darling et « p-value » qui a pour but de déterminer à quel type de distribution appartiennent les dimensions générées par le procédé de fabrication. Par la suite, une fois la distribution appropriée identifiée, un second test, celui de l'analyse de performance du processus, ou calcul du Ppk, est effectué. C'est ce second test qui est d'une grande importance. Le calcul du Ppk permet d'évaluer tous les procédés de fabrication sur une base égale. Le résultat de ce test permet de dire si un procédé de fabrication est en mesure de rencontrer les exigences critiques à la qualité du client de ce procédé, dans le cas présent, une dimension de fabrication et sa tolérance. Plus précisément, le test mesure la variation de la dimension par rapport à sa plage de tolérance allouée. La figure 3.1 illustre cette précision.

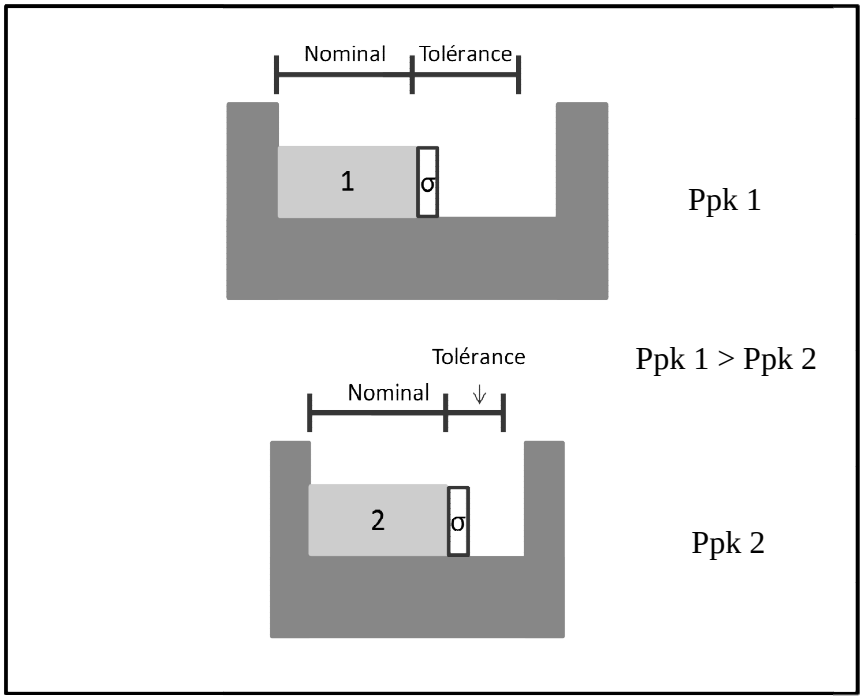


Figure 3.1 : Principe du Ppk

Les pièces #1 et #2 de la figure précédente ont exactement la même dimension nominale ainsi que le même écart-type. Par contre, étant donné l'espace plus restreint alloué à la pièce #2, sa plage de tolérance est plus petite. L'impact de la variation dimensionnelle, ou écart-type, est donc plus important pour la pièce #2 que pour la #1, et c'est cet impact relatif à la plage de tolérance que l'indicateur Ppk mesure. Le Ppk de la #1 est donc plus élevé que celui de la pièce #2. Un exemple de calcul du Ppk est disponible à l'Annexe B. Plus le chiffre du Ppk est élevé, plus le procédé est en mesure de rencontrer les requis. En d'autres termes, plus il est maîtrisé. Une fois tous les Ppk calculés pour les processus de chaque dimension clés des pièces multi-caractéristiques, il est donc possible d'établir laquelle de ces dimensions clés est la moins maîtrisée, c'est-à-dire celle avec le plus petit Ppk. L'idée défendue dans cette proposition est que pour les pièces multi-caractéristiques, c'est la dimension clé avec la pire variation dimensionnelle par rapport à sa tolérance, donc le plus petit Ppk, qui aura l'effet le plus important sur la propagation de la variation à travers l'assemblage. De ce fait, c'est la classe de cette dimension qui doit prendre préséance sur les autres, et donc sur la classe de la pièce elle-même.

Comme mentionné au début de cette section, la méthode de classification suggérée est de n'utiliser que deux classes de pièce avec la moyenne historique du procédé de fabrication de chaque dimension comme limite de classification. Les dimensions clés font parties de ceux, ou pourront le devenir, qui sont contrôler lors de l'inspection finale des pièces. L'enregistrement de ces mesures n'engendrera donc pas de coût, ni de manipulation supplémentaire. Selon la mesure obtenue, chaque pièce sera classée selon cette mesure en comparaison de la moyenne historique du processus. C'est-à-dire qu'une pièce ayant une mesure plus petite que la moyenne sera classée « Inférieure », tandis qu'une mesure plus élevée sera classée « Supérieure ». Les pièces seront par la suite acheminées au centre d'assemblage ayant été préalablement identifiées de leur classe en attente d'être utilisées.

Pour résumé, chaque dimension « pièce » est triée en classe inférieure ou supérieure basée sur sa dimension actuelle comparé avec la moyenne du processus de fabrication. Cette classification sera également celle de la pièce au complet, à l'exception des pièces comportant plusieurs dimensions clés. Pour ces pièces, toutes les dimensions sont également triées selon la même logique que celle mentionnée ci-haut, mais pour chacune d'entre elles, une analyse supplémentaire du paramètre de contrôle statistique Ppk sera réalisée. La dimension exhibant le plus petit Ppk sera identifiée comme la dimension la moins maîtrisée, et donc dominante sur les

autres. La pièce prendra la classe de cette dimension, inférieure ou supérieure, pour le processus d'assemblage sélectif.

Le compresseur centrifuge est un bon exemple pour illustrer la proposition. Le compresseur comporte 4 dimensions « pièce » importantes pour le contrôle des jeux, soit les dimensions e,f,g et h. Chacune de ces dimensions à un tolérancement spécifique à respecter ainsi qu'une moyenne historique de fabrication. Supposons que la dimension « e » de la pièce en question est inférieure à la moyenne historique, elle est donc classée « inférieure ».Ensuite, son procédé de fabrication est caractérisé selon les deux tests mentionnés plus haut. Le résultat donne un Ppk égale à 0,75. Une démarche similaire est entreprise pour les trois autres dimensions clés du compresseur haute-pression. Les résultats de ces analyses sont résumés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Exemple de classification d'une pièce

Dimensions pièce	Classe de la dimension clé	Ppk du processus de fabrication	Classe de la pièce
e	inférieure	0,75	Supérieure
f	supérieure	0,56	
g	supérieure	1,37	
h	inférieure	0,6	

Selon les résultats du tableau, le procédé de fabrication de la dimension « f » exhibe le plus petit Ppk, et est donc celui qui est le moins maîtrisé. En suivant la démarche soumise plutôt, étant donné que la dimension « f » est la moins maîtrisée, c'est la classe associée à cette dimension qui sera projetée sur la classification de la pièce au complet. La dimension « f » étant classée dans la catégorie « supérieure », parce qu'elle est plus élevée que sa moyenne, cela veut dire que la classification globale de cette pièce est donc « supérieure » également.

3.2 Modélisation

3.2.1 Recueil des données

La construction d'un modèle réaliste tel que mentionné dans la section 2.3 exige d'obtenir une série de données pour servir de base. Pour certaines dimensions clés, le processus de fabrication actuel fournit déjà les mesures. Pour ces dimensions, il est alors très facile d'obtenir un échantillon représentatif, donc équivalent environ à une année de production (200 unités). C'est le cas pour a, b et q. Par contre, pour les autres dimensions, même si certaines d'entre elles sont mesurées lors des inspections finales, il n'y a aucune exigence qui demande de les conservées, et donc il est impossible d'obtenir un échantillon historique. Les données de ces dimensions clés devront donc être obtenues à partir de mesure sur demande, ce qui explique pourquoi la taille de ces échantillons est plus petite et non constante. Le tableau 3.2 résume la collecte de données.

Tableau 3.2 : Descriptions des échantillons de pièces

Pièce	Dimension	Taille de l'échantillon (pièces)	Commentaire
Générateur de gaz	a	200	Dimension enregistrée
	b	200	Dimension enregistrée
	c	10	Mesurée sur demande
	d	10	Mesurée sur demande
Compresseur centrifuge	e	10	Mesurée sur demande
	f	10	Mesurée sur demande
	g	10	Mesurée sur demande
	h	10	Mesurée sur demande
Joint d'air	i	10	Dimension gravée sur la pièce, mais pas enregistrée électroniquement
Support Flexible	j	15	Mesurée sur demande
Roulement à billes No.4	k	12	Mesurée sur demande
	m	11	Mesurée sur demande
Couvercle compresseur centrifuge	p	7	Mesurée sur demande
Boîtier inter-compresseur	q	200	Dimension enregistrée
Couvercle pour roulement No.4	r	30	Mesurée sur demande

3.2.2 Analyse des échantillons de données

Toujours dans le but d'obtenir une simulation reflétant le plus fidèlement la réalité et tel que mentionné à la section 2.3, il est important de pouvoir déterminer le comportement de chaque dimension afin de pouvoir le simuler le plus adéquatement possible. Pour ce faire, une série de tests doivent être administrés sur chaque échantillon de dimensions « pièce » afin de déterminer en premier lieu quel est le type de distribution qui peut lui être associé, et par la suite, quel est l'index de performance du procédé de fabrication de cette dimension (Ppk). Il y a plusieurs logiciels de statistiques qui sont capables de réaliser de telles analyses, mais celui qui est employé chez PWC, et donc celui qui est utilisé dans ce travail, est Minitab v16.

Le logiciel offre une fonction nommée « Individual Distribution Identification ». Cette fonction calcule le nombre d'Anderson-Darling (nombre AD) et la « p-value » pour l'échantillon en question et pour différents types de distributions (normale, lognormale, weibull, etc.) La liste complète des distributions évaluées se retrouvent à l'Annexe A. Afin de déterminer quel type de distribution représente le mieux l'échantillon évalué, il faut tout d'abord regarder laquelle des distributions évaluées retourne la plus petite « p-value ». C'est l'indicateur primaire. Si la « p-value » n'est pas disponible ou encore non-significative, donc plus petite que 0,05[2], il faut alors choisir la distribution qui détient le plus petit nombre d'Anderson-Darling. C'est l'indicateur secondaire. Si ce dernier est plus élevé que 1[2], il est alors lui aussi jugé non-significatif. Par contre, le but de l'analyse étant de déterminer quel type de distribution représente le mieux l'échantillon utiliser, ou « best-fit » comme dit l'expression anglaise, si jamais le nombre d'Anderson-Darling est plus grand que 1, il faut quand même choisir le type de distribution qui exhibe le plus petit nombre d'Anderson-Darling. Un exemple de calcul du « p-value » et du nombre d'Anderson-Darling, ainsi que de l'information supplémentaire sur ces tests, se trouvent à l'Annexe C.

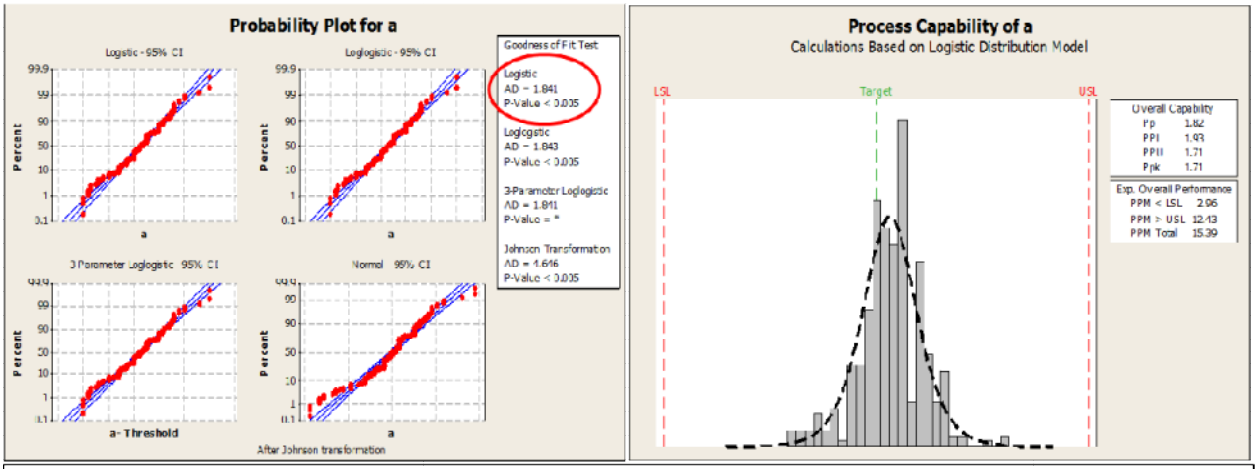
Une fois la distribution identifiée, la deuxième étape est d'évaluer la *capabilité*, ou performance, du procédé de fabrication en calculant son index de performance, Ppk. Minitab possède également une fonction capable de calculer cet index selon le type de distribution choisie. Un exemple de calcul d'un Ppk est disponible à l'Annexe B. Les résultats de ces deux tests sont

---

[2] Les valeurs 0,05 pour « p-value » et 1 pour AD sont les standards utilisés dans le programme ProCert de PWC

présentés ci-dessous[3]. Le premier graphique est le test « Best Fit » qui a pour but de déterminer à quelle distribution appartient l'échantillon. Le deuxième présente l'index de performance du graphique, Ppk.

3.2.2.1 Dimension « a »



Ppk = 1.71

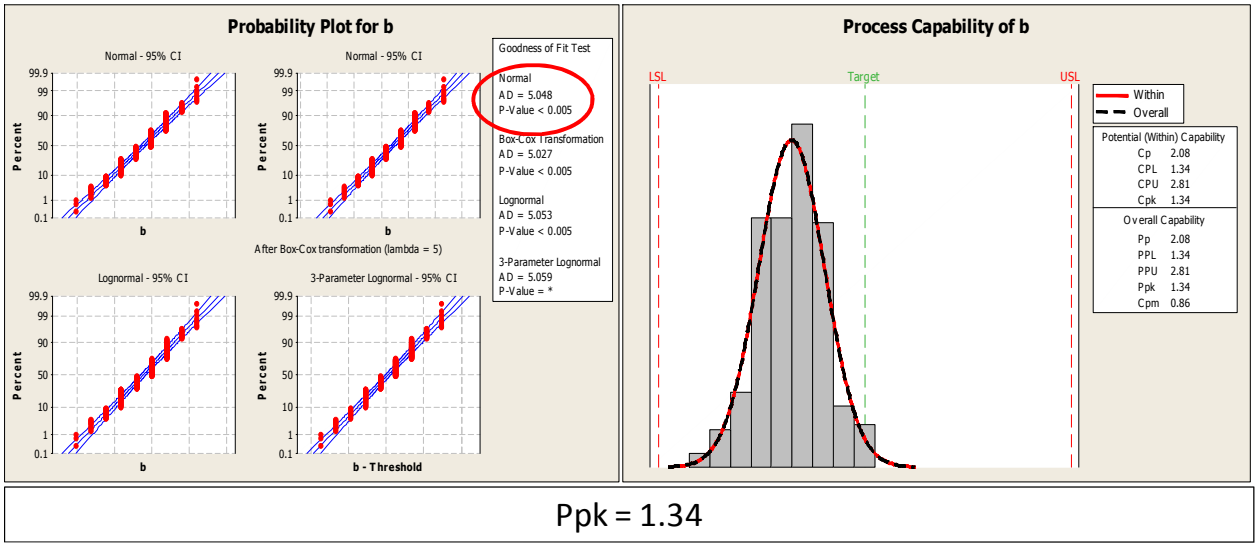
Figure 3.2 : Analyse de la dimension "a"

Pour toutes les distributions essayées, la « p-value » de la dimension est « a » est négligeable. Selon la procédure d'analyse mentionnée précédemment, il faut passer au nombre d'Anderson-Darling. Celui-ci étant plus grand que 1 pour tous les types de distributions disponibles, il faut conclure qu'aucune de ces distributions ne représente parfaitement l'échantillon « a ». Par contre, il faut tout de même choisir celle qui la représente le mieux, soit la distribution de type « Logistique » avec un nombre AD de 1,841. En se basant sur ce type de distribution, on obtient un Ppk pour le procédé de fabrication égale à 1,71 ce qui est satisfaisant.

---

[3] Les données représentées sur les graphiques sont dans le système d'unité impériale étant donné que c'est ce système que PWC utilise. Par contre, conformément aux normes de rédaction du mémoire, les données mentionnées dans le corps du texte et les tableaux ont été transformées dans le système international.

3.2.2.2 Dimension « b »

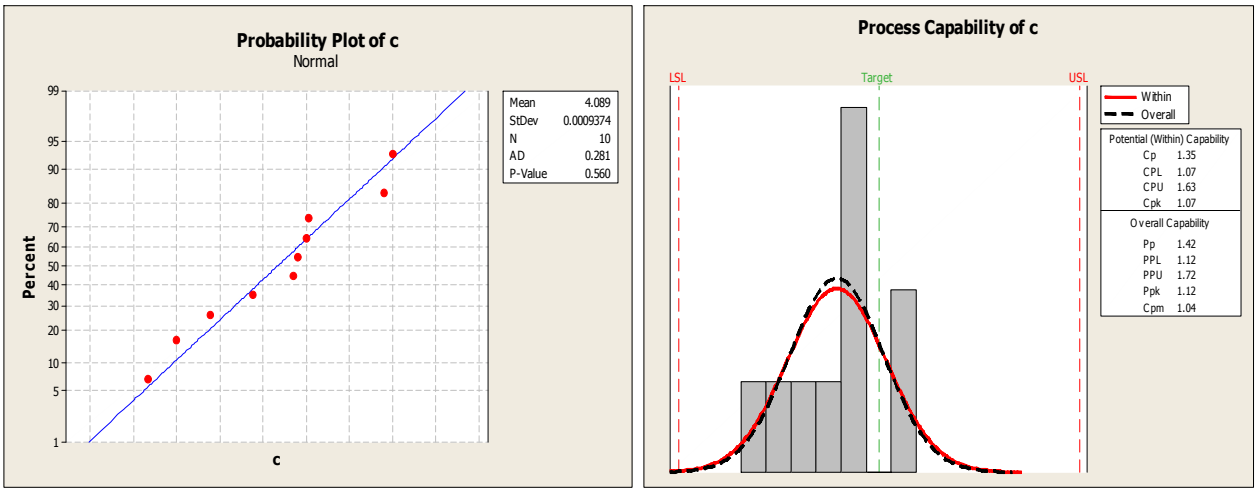


Ppk = 1.34

Figure 3.3 : Analyse de la dimension "b"

Similairement à la dimension « a », ni la « p-value », ni le AD ne sont significatifs. En utilisant donc la distribution ayant le plus petit AD, la distribution de type « Normale » est choisie. Le calcul du Ppk retourne une valeur de 1,34, ce qui est également acceptable.

3.2.2.3 Dimension « c »



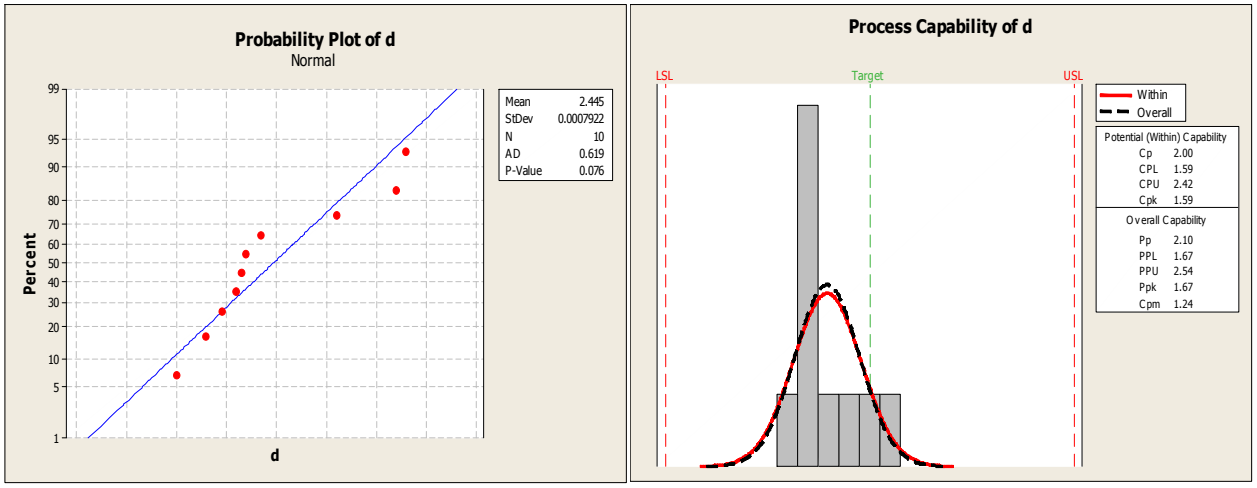
Ppk = 1.12

Figure 3.4 : Analyse de la dimension "c"

Cette fois-ci le calcul de la « p-value » donne une valeur supérieure à 0,05, soit 0,560, pour une distribution de type « Normale ». Cette valeur élevée de la « p-value » indique que l'échantillon

étudié se comporte très similairement à une distribution de type « Normale ». Le Ppk du procédé est de 1,12.

3.2.2.4 Dimension « d »

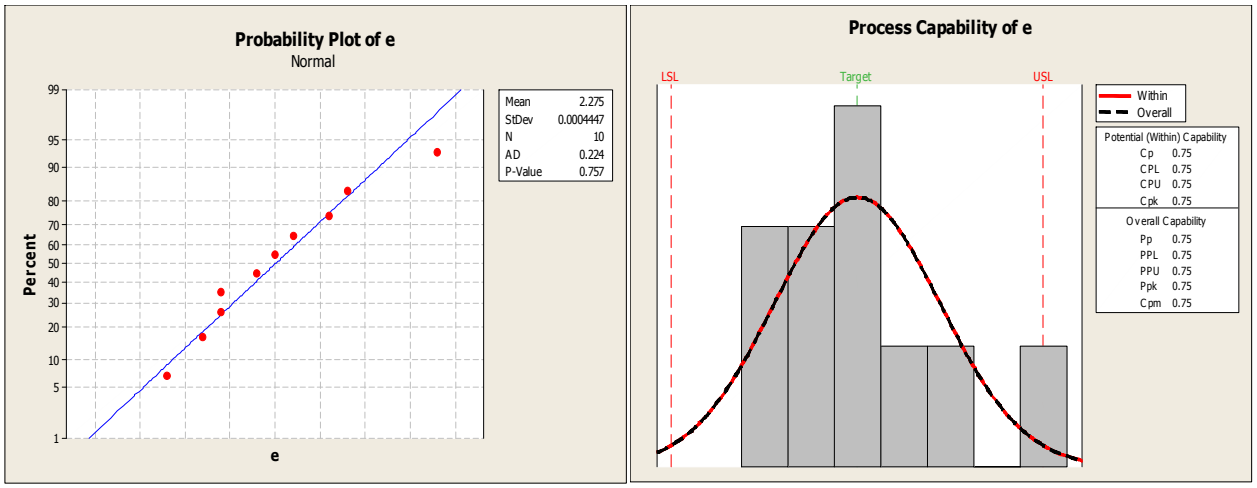


Ppk = 1.67

Figure 3.5 : Analyse de la dimension "d"

Cette dimension, bien que plus faiblement, se comporte également selon une distribution de type « Normale » selon le résultat de la « p-value », égale à 0,076. Le Ppk pour ce procédé est par contre meilleure que le précédent avec une valeur de 1,67.

3.2.2.5 Dimension « e »

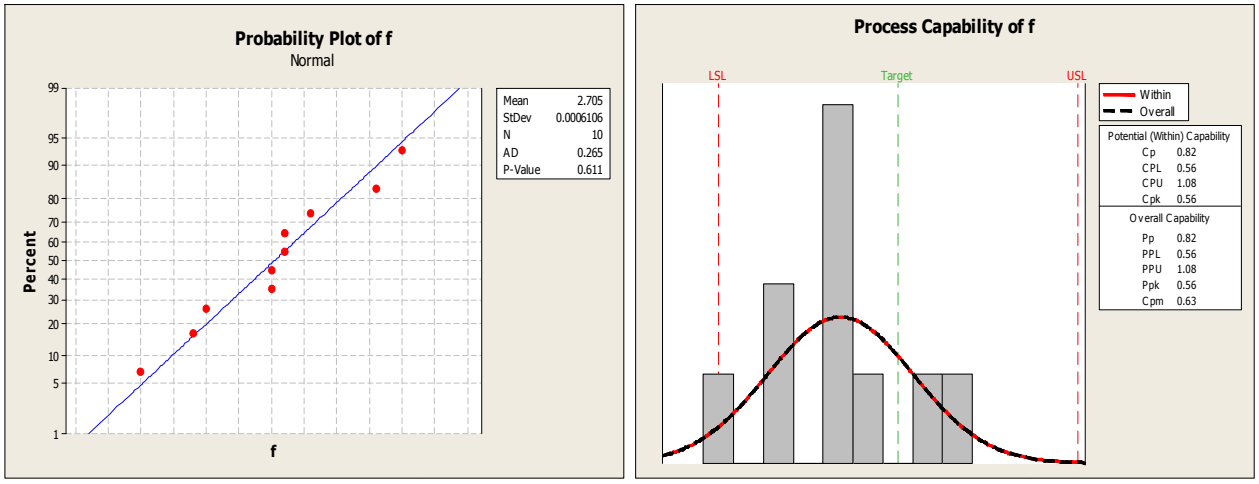


Ppk = 0.75

Figure 3.6: Analyse de la dimension "e"

La dimension reflète un comportement de type « Normale » dû à la « p-value » élevée. Par contre, l'index de performance de son procédé est très faible à 0,75.

3.2.2.6 Dimension « f »

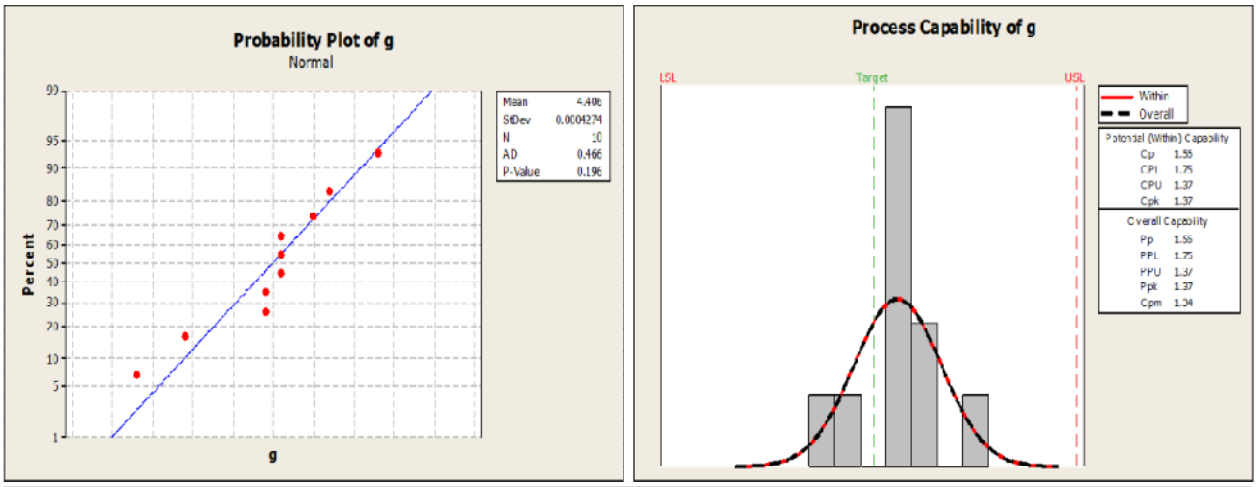


Ppk = 0.56

Figure 3.7 : Analyse de la dimension "f"

Cette dimension exhibe un fort comportement « Normale », mais une performance très faible (« p-value = 0,611 ; Ppk =0,56).

3.2.2.7 Dimension « g »



Ppk = 1.37

Figure 3.8 : Analyse de la dimension "g"

La « p-value » étant égale à 0,196, le comportement de cette dimension peut être considéré comme de type « Normale ». Le Ppk calculé à partir de ce type de distribution est de 1,37.

3.2.2.8 Dimension « h »

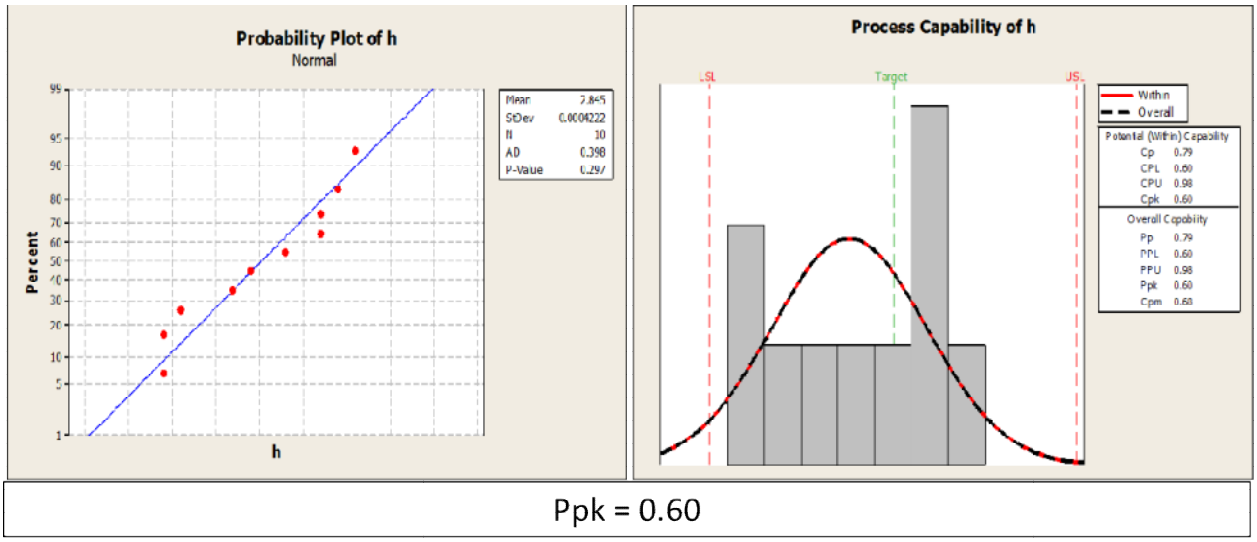


Figure 3.9 : Analyse de la dimension "h"

La dimension « h » s'assimile à une distribution de type « Normale » et son Ppk est extrêmement faible à 0,60.

3.2.2.9 Dimension « i »

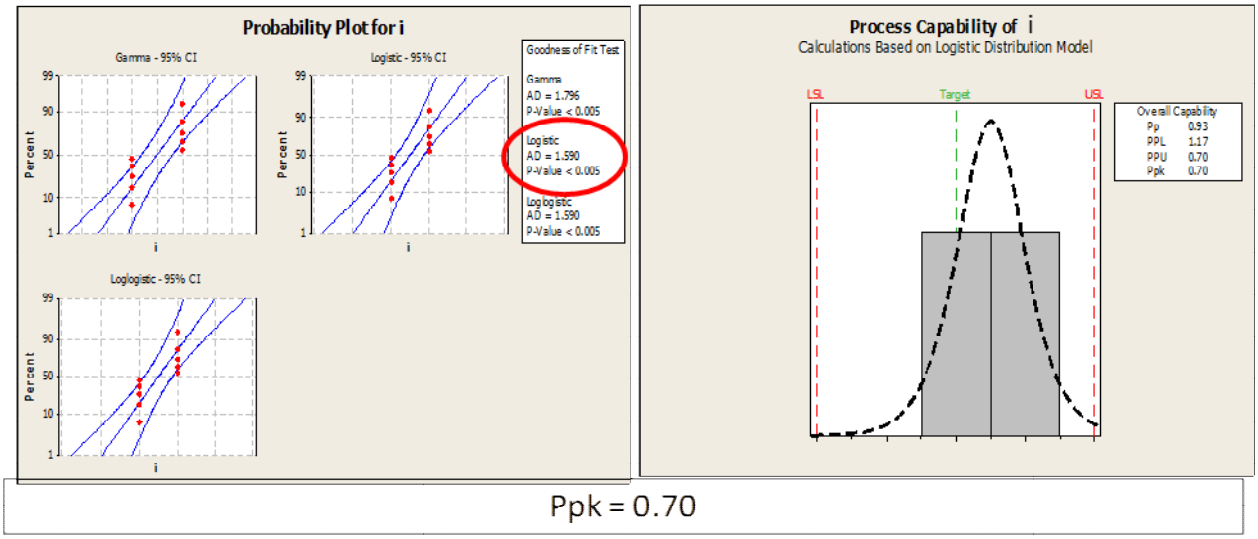
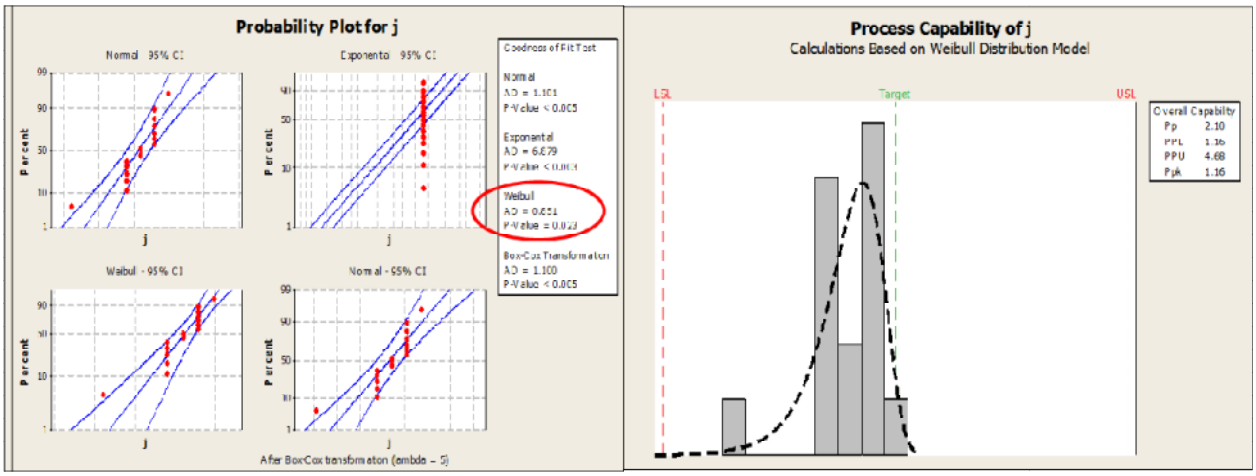


Figure 3.10 : Analyse de la dimension "i"

Cette distribution s'apparente à une distribution de type logistique et le Ppk de son procédé de fabrication est égale à 0,70.

3.2.2.10 Dimension « j »

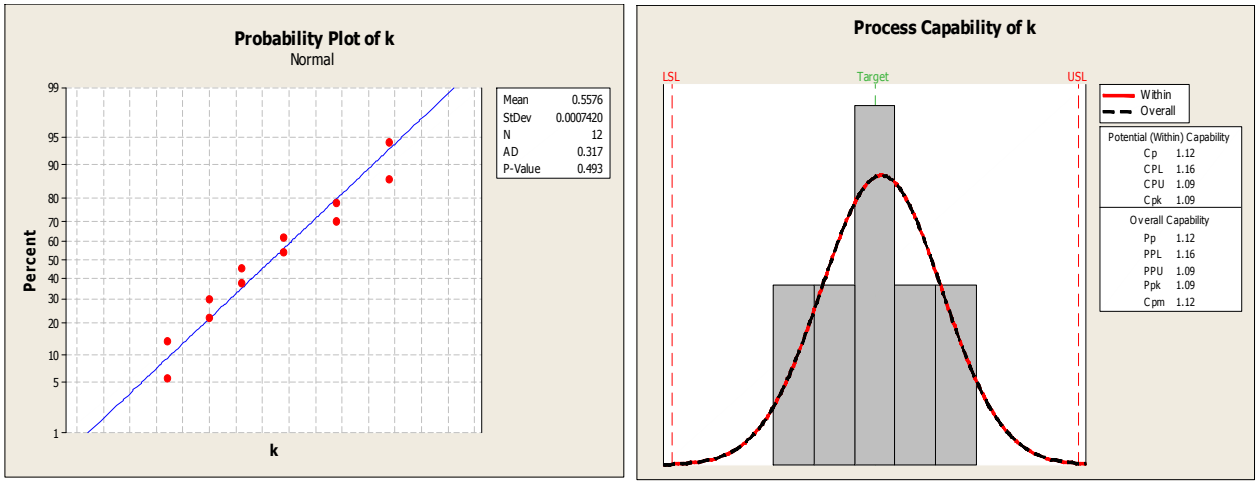


Ppk = 1.16

Figure 3.11 : Analyse de la dimension "j"

Cette dimension exhibe un comportement particulier, celui d'une distribution « Weibull ». Cette distribution est typiquement utilisée dans l'étude d'un phénomène particulier qui est mesuré en fonction du temps, comme le temps moyen avant une défaillance par exemple. Ce n'est pas le cas ici par contre. Le Ppk retournée pour une distribution « Weibull » est ici de 1,16.

3.2.2.11 Dimension « k »

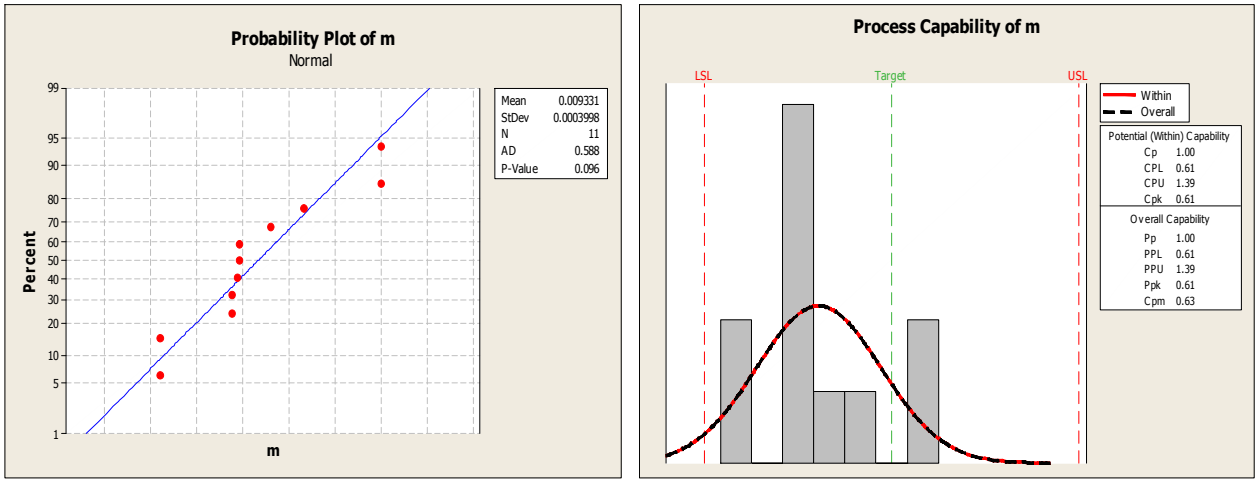


Ppk = 1.09

Figure 3.12 : Analyse de la dimension "k"

Avec la dimension, l'analyse retourne vers les dimensions avec un comportement typique d'une distribution de type « Normale ». Le Ppk de ce procédé de fabrication est de 1,09 et relativement faible.

3.2.2.12 Dimension « m »

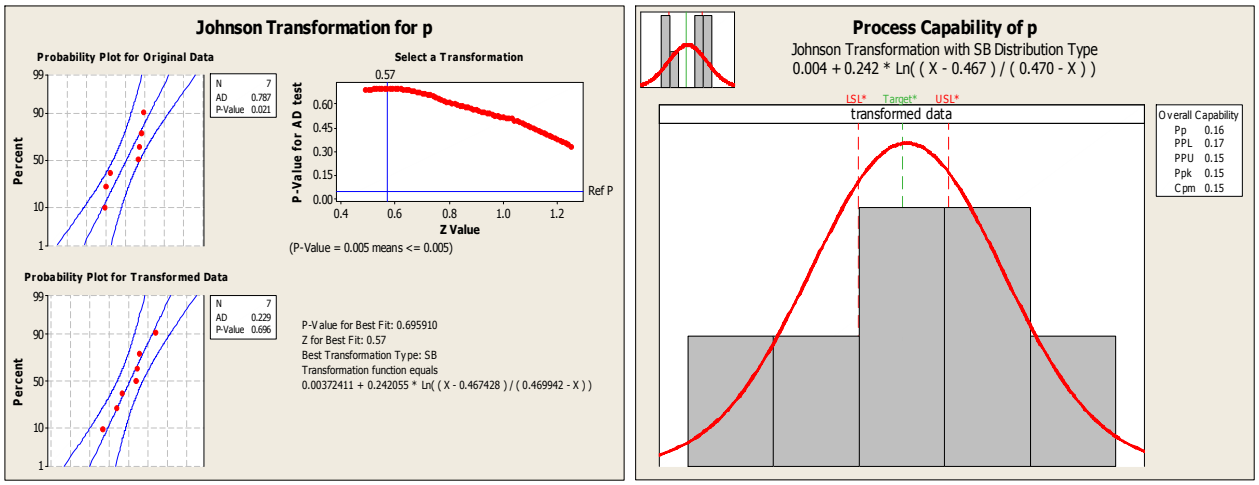


Ppk = 0.61

Figure 3.13 : Analyse de la dimension "m"

Cette dimension a une « p-value » très proche de 0,05, donc très rapprochée de la limite d'acceptation pour une distribution de type « Normale ». Néanmoins, le résultat est quand supérieur à cette limite et c'est cette distribution qui est retenue. Le Ppk est très faible par contre à 0,61.

3.2.2.13 Dimension « p »

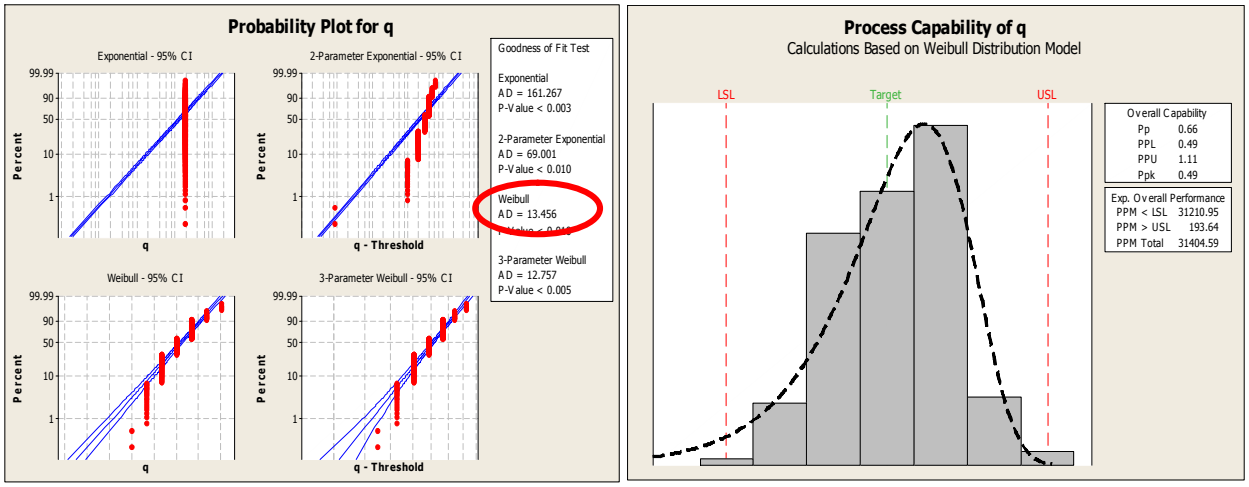


Ppk = 0.15

Figure 3.14 : Analyse de la dimension "p"

Pour cette dimension, les valeurs du « p-value » et du AD étaient tellement non-significatives qu'une transformation a dû être appliquée afin d'obtenir un résultat intéressant. Cette transformation fait partie d'une famille de deux transformations qui ont pour objectif de transformer un échantillon de données afin que celui-ci se comporte comme une distribution de type Normale. L'autre transformation de cette famille se nomme « Box-Cox ». Ces techniques sont couramment utilisées dans le monde du contrôle statistique des procédés, car elles permettent de pourvoir utiliser les outils d'analyse standards (étude de *capabilité*, etc.) sur des distributions irrégulières. Cependant, le Ppk de cette distribution reste extrêmement faible.

3.2.2.14 Dimension « q »

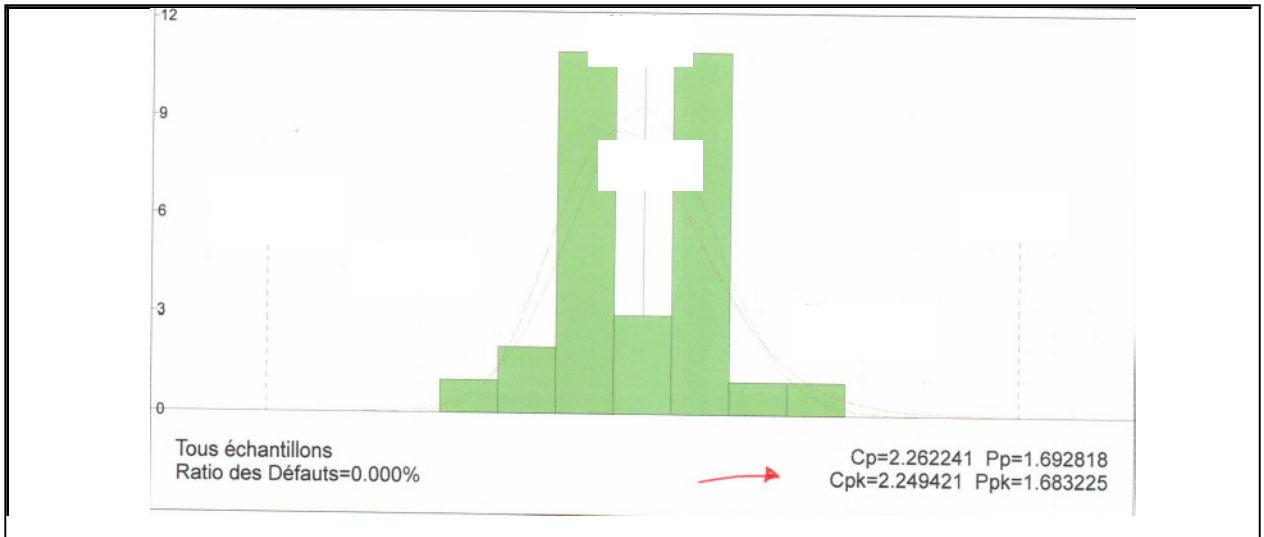


Ppk = 0.49

Figure 3.15 : Analyse de la dimension "q"

Cette dimension se rapproche le plus d'une distribution de type « Weibull », pareillement à la dimension « j ». Les valeurs de la « p-value » et du nombre AD ne sont pas significatives, mais la distribution « Weibull » est quand même celle qui représente le plus l'échantillon de la dimension « q » et donc, c'est elle qui est retenue. Le Ppk est très faible par contre.

3.2.2.15 Dimension « r »



Ppk = 1.68

Figure 3.16 : Analyse de la dimension "r"

L’analyse de cette dimension est différente des autres car la pièce est fabriquée par un fournisseur de PWC qui n’a pas voulu partager les données brutes de l’échantillon, seulement le graphique finale. Néanmoins, il est quand même possible d’observer que la distribution est de type « Normale » et tel qu’indiqué, son Ppk est de 1,68.

3.2.2.16 Dimensions « l », « n » et « o »

Ces dimensions ne figurent pas parmi les dimensions clés et donc, n’ont pas été analysées.

3.2.2.17 Résumé

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus à la section précédente. Il est important de noter que pour tous échantillons qui n’ont pu être caractérisés de manière fiable, c’est-à-dire avec des distributions où les « p-values » et nombre AD ne sont pas représentatifs, il serait intéressant d’effectuer des analyses plus poussées pour comprendre leur comportement irrégulier. Dans certains cas, lorsque ces genres d’irrégularités sont constatés, cela peut vouloir dire que l’échantillon contient deux types de distributions différentes ou encore qu’une cause extérieure agit de façon à biaiser le comportement de l’échantillon. Dans les deux cas, il faut pousser l’enquête plus loin afin d’essayer d’éliminer ces perturbations. Par contre, dans le cadre de l’étude en cours, ces résultats sont jugés satisfaisants car ils permettent de générer une population de pièces virtuelle qui a un comportement similaire à celui de la population réelle.

Tableau 3.3 : Résumé des résultats

Pièce	Dimension clé	Comportement	Ppk
Générateur de gaz	a	Logistique	1,71
	b	Normale	1,34
	c	Normale	1,12
	d	Normale	1,67
Compresseur centrifuge	e	Normale	0,75
	f	Normale	0,56
	g	Normale	1,37
	h	Normale	0,60
Joint d'air	i	Logistique	0,70
Support Flexible	j	Weibull	1,16
Roulement à billes No.4	k	Normale	1,09
	m	Normale	0,61
Couvercle compresseur centrifuge	p	Transformation de Johnson	0,15
Boîtier inter-compresseur	q	Weibull	0,49
Couvercle pour roulement No.4	r	Normale	1,68

Par la suite, comme mentionné à la section 3.1, il faut déterminer pour chaque pièce multi-caractéristique quelle est la dimension générée par le procédé de fabrication avec le pire Ppk. Ces dimensions seront désignées « dominantes ». Le tableau 3.4 illustre ces dimensions.

Tableau 3.4 : Dimensions dominantes

Pièce	Dimension dominante	Ppk
Générateur de gaz	c	1,12
Compresseur centrifuge	f	0,56
Roulement à billes No.4	m	0,61

Les dimensions listées dans le tableau 3.4 sont donc, selon la proposition avancée à la section 3.1, celles qui représenteront la classe des pièces multi-caractéristiques. Lors de la simulation, ce sont sur ces dimensions que sera basée la classification d'une pièce.

3.2.3 Établissements des classes pour l'assemblage sélectif

La dernière étape de la modélisation consiste à créer les classes qui seront utilisées pour l'assemblage sélectif. Tel que mentionné dans la proposition, la dimension non-maîtrisée, ou dominante, sera utilisée pour établir la classe des pièces multi-caractéristiques. Les classes sont établies en fonction de la valeur historique de la moyenne pour chacune d'entre elles. Donc une pièce virtuelle ayant une dimension plus petite ou égale à la moyenne réelle de l'échantillon de cette dimension sera classée « Inférieure ». Elle sera classée « Supérieure » si ce n'est pas le cas.

3.2.4 Simulation

La création de la population pour l'exercice de simulation se fait à partir des résultats obtenus à la section précédente. L'analyse des échantillons a permis d'établir à quel type de distribution ils sont associés, leurs moyennes ainsi que leurs écart-type. Ce faisant, encore une fois avec l'aide de Minitab, il devient facile de générer une population pour chaque dimension qui est représentative de la réalité, c'est-à-dire qui se comporte similairement aux échantillons recueillis. Chaque population est générée en utilisant quatre paramètres : la moyenne de l'échantillon, son écart-type, son type de distribution ainsi que ses limites de spécification. La taille de population générée est de 500 pièces. Cela devrait être suffisant pour assurer au moins 200 assemblages, donc environ 1 an de production, pour tester la proposition. Par la suite, toutes les pièces sont triées et classées à l'aide d'un programme fait sur mesure dans un tableur Excel.

Tableau 3.5 : Classification de la population virtuelle

	Classe	
Pièce	Inférieure (pces)	Supérieure (pces)
Générateur de gaz	260	240
Compresseur centrifuge	268	232
Joint d'air	413	87
Support Flexible	228	272
Roulement à billes No.4	239	261
Couvercle compresseur centrifuge	312	188
Boîtier inter-compresseur	207	293
Couvercle pour roulement No.4	135	365

L’assemblage étudié comporte 8 pièces, chacune avec 2 configurations possibles, inférieure ou supérieure. Un calcul rapide permet d’établir qu’il y a un grand total de 256 combinaisons d’assemblage différentes à tester (Annexe E). Encore une fois avec Excel, la simulation est réalisée avec l’aide d’un programme qui génère un maximum d’assemblages pour chacune des 256 combinaisons en pigeant aléatoirement parmi les 500 pièces de la population virtuelle. Une fois les assemblages complétés, le programme calcule tous les paramètres d’assemblages ainsi que les 2 dégagements critiques et les espaceurs requis. Afin de faciliter la génération des combinaisons, chacune des classes est représentée sous forme binaire, donc la classe inférieure est égale à « 0 » et la supérieure à « 1 ». Les combinaisons sont donc la représentation des chiffres 0 – 255 en forme binaire.

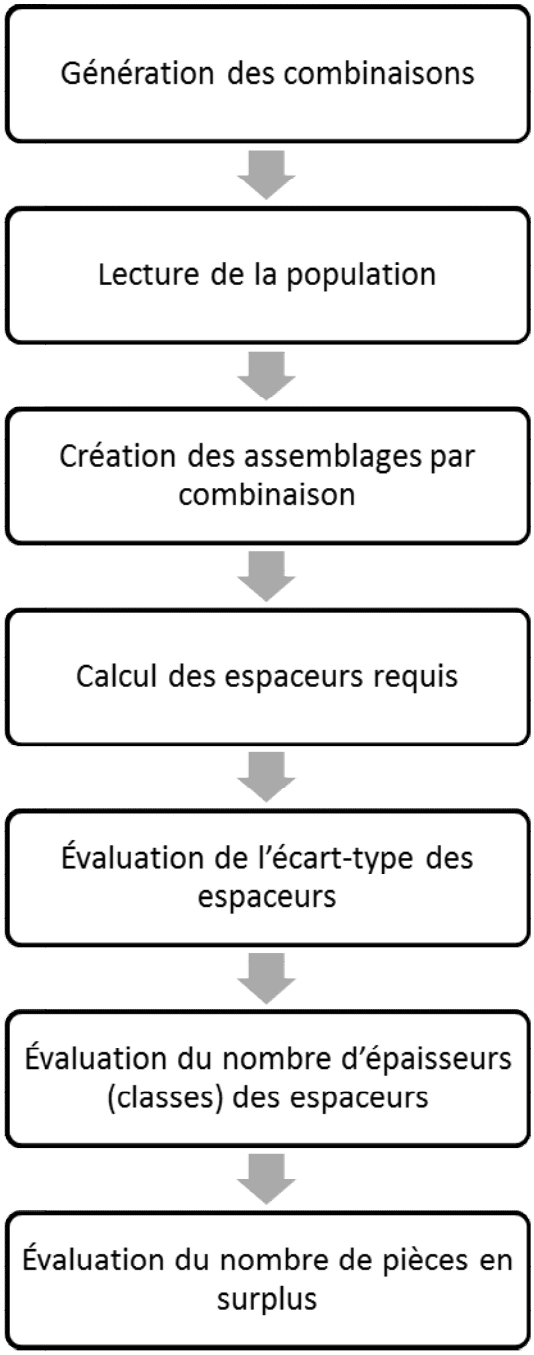


Figure 3.17: Algorithme de création et d'évaluation des combinaisons

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section contient la présentation des résultats obtenus lors de la simulation précédente ainsi que leur évaluation. Cette évaluation a pour but de déterminer quelle est la meilleure combinaison obtenue selon les critères mentionnés plus bas.

4.1 Présentation des résultats

Pour bien faire le lien avec le contexte industriel présenté en introduction, il est important de rappeler quelques éléments :

1) L'industrie de laquelle origine le problème, l'industrie aérospatiale, en est une de faible volume de production et de pièces qui ont un coût de fabrication élevées.
2) La solution retenue doit s'implanter facilement dans un environnement de production
3) Le coût d'implantation de la solution retenue doit être minime, tant au niveau des investissements en capitaux (machines, logiciel, etc.) qu'au niveau de l'inventaire. Une solution engendrant donc une augmentation significative des stocks sera donc rejetée.

Pour chacune des 256 combinaisons générées par l'algorithme de la simulation précédente, quatre indicateurs seront calculés. C'est à l'aide de ces indicateurs que les différentes combinaisons sont évaluées et classées. Les indicateurs sont listés ci-dessous et en ordre d'importance :

1) Plus petit écart-type de l'espaceur Q
2) Plus petit nombre d'épaisseurs différentes pour Q
3) Plus petit écart-type de l'espaceur H
4) Plus petit nombre d'épaisseurs différentes pour H

Le choix de prioriser l'espaceur Q sur l'espaceur H vient du fait qu'historiquement, l'espaceur Q est beaucoup plus problématique et doit être remplacé plus souvent que l'espaceur H. Par souci de concision, seulement les 5 meilleurs résultats sont affichés dans le tableau ci-dessous. Le reste se retrouve à l'Annexe F.

Tableau 4.1 : 5 meilleures combinaisons

Résultats de la simulation						
ID	Combinaison	Déviation standard Q (mm)	Déviation standard H (mm)	# de classes Q	# de classes H	# d'assemblages
92	01011011	0,040	0,050	9	11	232
84	01010011	0,040	0,052	9	11	232
74	01001001	0,040	0,051	9	12	207
82	01010001	0,040	0,052	9	11	207
66	01000001	0,040	0,052	9	11	207

Le tableau ci-haut se lit comme suit :

> La meilleure solution, selon les critères établis précédemment, est la solution #92, soit l'assemblage consistant d'un générateur de gaz de classe inférieure, un compresseur centrifuge de classe supérieure, un joint d'étanchéité d'air de classe inférieure, d'un support flexible et d'un roulement à bille no.4 de classes supérieures, d'un couvercle de compresseur de classe inférieure et finalement, d'un boîtier inter-compresseur et d'un couvercle pour roulement de classes supérieures. Pour les 232 assemblages réalisés, la distribution de l'espaceur Q a un écart-type de 0,040 mm et il y a 9 épaisseurs différentes utilisées. Pour l'espaceur H, l'écart-type des de 0,050 mm également, mais il y a 11 épaisseurs différentes d'utilisées.

4.2 Discussion

Un survol du tableau 4.1 montre qu'il y a une égalité entre les 5 premières combinaisons pour ce qui est des résultats de l'espaceur Q. En effet, ces 5 combinaisons ont le même écart-type ainsi que le même nombre d'épaisseurs différentes utilisées. Par contre, lorsqu'on introduit les résultats de l'espaceur H une solution optimale émerge. Cependant, lorsqu'un cinquième indicateur, le nombre d'assemblage réalisés, est pris en considération, cette solution a priori optimale devient moins intéressante. À partir d'une population de 500 pièces, donc 500 assemblages potentiels, la meilleure solution au niveau de la variation n'est capable de produire que 232 assemblages, le facteur limitant étant le nombre de compresseur centrifuge de classe supérieure disponible. Cela donne une quantité de pièces en surplus très importante et qui, en

considérant le coût de certaines pièces, notamment le générateur de gaz, pourrait grandement mettre en péril la rentabilité de cette solution.

Telle que mentionné à la section 2.3, les critères d'acceptation de la proposition sont la réduction de la variation (écart-type) et du nombre d'épaisseurs (classes) utilisées pour la population d'espaceurs virtuelles comparées à la population réelle. Le tableau 4.2 ci-dessous compare les résultats de la meilleure combinaison, #92, aux résultats réels.

Tableau 4.2 : Comparaison simulation et actuelle

Tableau comparatif		
	Combinaison #92 (mm)	**Actuelle (mm)**
Écart-type Q	0,040	0,062
# d'épaisseurs Q	9	14
Écart-type H	0,050	0,068
# d'épaisseurs H	11	15

À première vue, les résultats de la comparaison s'avèrent très intéressants. Effectivement, il y a une amélioration de constatée pour chacun des points de comparaison. L'écart-type pour l'espaceur Q diminue de 35% de 0,062 mm à 0,040 mm et son nombre d'épaisseur est également réduit par 36% en passant de 14 à 9. Les résultats sont du même ordre pour l'espaceur H, donc 26% de réduction au niveau de l'écart-type et 27% pour le nombre d'épaisseurs utilisées. Une amélioration de l'ordre de 30% sans n'avoir nécessité aucun investissement majeur en équipement, main d'œuvre ou temps supplémentaire est considérée comme très satisfaisante. Ces résultats sont soumis à un test d'hypothèse afin de démontrer qu'ils ne sont pas simplement une coïncidence. L'hypothèse nulle du test est que l'écart-type des espaceurs de la solution #92 est égale à celui de la population actuelle :

$$H_0 : \sigma_{\#92} = \sigma_{actuelle}$$

$$H_1 : \sigma_{\#92} < \sigma_{actuelle}$$

Les populations des espaceurs de la solution #92 sont également évaluées d'une manière similaire aux échantillons de données recueillies pour la simulation afin de déterminer à quel type de

distribution elles s’apparentent. La distribution de l’espaceur Q est de type Normale, tandis que celle de l’espaceur H ne l’est pas. Le test d’hypothèse pour Q est donc le test Chi-carré (population normale seulement) et pour l’espaceur H, c’est le test de Bonnett (toute autre distribution). Les résultats de ces deux tests sont identiques, c'est-à-dire que la « p-value » retournée dans les deux cas est égale à 0,000, donc inférieure à 0,05. L’hypothèse nulle est donc rejetée et les résultats obtenus sont jugés significatifs.

Par contre, si les résultats obtenus sont intéressants au niveau statistique, ce n’est pas la même chose au point de vue opérationnel. En effet, tel que mentionné dans la Section 1.1 – Origine du problème industriel, la variation dimensionnelle des composants est la cause fondamentale qui est à l’origine de toutes les autres causes illustrés dans le diagramme de la figure 1.1 et ainsi, de la propagation de la variation à travers l’assemblage au complet. L’objectif du projet était donc d’enrayer le plus possible l’impact de la variation des pièces sur l’assemblage, donc sur les dégagements, à l’aide de l’assemblage sélectif.

Au mieux, on peut dire que la méthode suggérée aide le processus d’assemblage, mais elle ne réglera pas le problème soulevé en introduction. Bien que l’objectif est partiellement atteint par la réduction de la variation de la population des espaceurs, le nombre élevé d’épaisseur différentes utilisées signifie que les assembleurs seront toujours obligés de mesurer pour déterminer l’épaisseur requise lors de l’assemblage. Ce faisant, ils s’exposent donc encore à toutes les autres causes potentielles du diagramme et a effectué un mauvais choix. L’idéal aurait été que l’assemblage sélectif permette l’utilisation d’un espaceur unique pour tous les moteurs. De cette façon, les mesures en cours d’assemblage n’auraient plus été plus requises et les chances de faire un mauvais choix, inexistantes.

Qui plus est, la dernière colonne du tableau 4.1 montre le nombre d’assemblages complets réalisés à partir d’une population de 500 pièces. La meilleure combinaison, #92, donne 232 assemblages. En considérant que le nombre d’assemblage potentiel est de 500, ce résultat n’est pas très intéressant. Au final on a donc que pour une modeste amélioration au niveau de la variation des dégagements, la compagnie s’exposerait à devoir absorber un grand nombre de pièces en surplus. Cela confirme donc ce qui était soupçonné un peu plutôt, soit que la solution proposée nécessite encore d’être retravaillée afin d’en améliorer la rentabilité. Pour contrer

l’effet des pièces de surplus, il faudrait que la solution obtenue garantisse un taux de réussite de 100%. À ce moment, les gains obtenus pourraient contrebalancer l’augmentation des stocks.

Cependant, il est clair, même avec les résultats mitigés obtenus précédemment, que l’assemblage sélectif peut être bénéfique à l’assemblage du compresseur haute-pression. La proposition de ce mémoire consiste à faire une projection de classe lorsque l’on fait face à une pièce multi-caractéristiques en se basant uniquement sur le Ppk des procédés de fabrication des dimensions. Cette projection de X dimensions à une seule est peut-être trop agressive et devrait être remplacée par une projection de X à Y dimensions, où 1<Y<X. Le Ppk n’est peut-être pas non plus le bon indicateur pour déterminer la caractéristique dominante de la pièce et devrait être remplacé par une analyse empirique de l’impact réelle de chacune des dimensions sur l’assemblage. Il y a aussi le nombre de classes qui pourraient être augmenté selon une logique différente. En retravaillant les principes de bases énoncés dans ce mémoire, il est raisonnable de penser pouvoir améliorer significativement les résultats obtenus.

D’un autre côté, il serait aussi possible d’orienter la production des pièces de manière à ce qu’elles tombent toutes dans les classes nécessaires à la meilleure combinaison. Cela aurait au moins l’avantage d’éliminer les pièces de surplus.

Une prochaine étude pourrait être réalisée sur une combinaison de tous les facteurs énoncés ci-haut. Par exemple, une augmentation du nombre de classe jumelée avec orientation du procédé de fabrication des pièces serait une excellente façon de réduire la variation encore plus significativement et d’éliminer les pièces en surplus.

CONCLUSION

Le problème étudié à travers ce mémoire est celui de l'assemblage du compresseur haute-pression d'un moteur PW100. Cet assemblage complexe comporte plusieurs paramètres à respecter, notamment deux dégagements qui sont critiques pour le bon fonctionnement du moteur. Le respect de la plage de tolérancement de ces 2 dégagements a toujours été problématique lors de l'assemblage des moteurs et est la cause d'un taux de rejet assez élevé (33%) de ces derniers. Une recherche de la cause fondamentale du problème a révélé que la transmission de la variation dimensionnelle des pièces à travers l'assemblage résulte en une variation des dégagements critiques. La solution proposée dans ce mémoire est donc de minimiser l'impact de cette variation des composants à l'aide d'un concept nommé « assemblage sélectif ».

La revue de littérature a permis de mettre en évidence que bien qu'il y ait une multitude de publications à propos de l'AS, les concepts qui y sont démontrés ne sont pas directement applicable à la situation présente. L'assemblage du PW100 présente 3 particularités qui le distinguent des autres exemples d'AS : le nombre de pièces élevés, la nature longitudinale et non radiale du problème et plus particulièrement, le fait que certains composants contiennent plus d'une dimension critique par rapport à l'assemblage, contrairement aux autres situations où chaque élément n'a qu'une seule dimension importante.

Pour remédier à cette situation, et cela constitue l'élément novateur de ce mémoire, le concept de projection de classe est introduit. Cette approche consiste à caractériser le comportement des dimensions importantes à l'aide d'indicateurs statistiques (type de distribution et Ppk), déterminer quelle dimension est la moins bien maîtrisée, la classer et projeter cette classe sur celle de la pièce au complet.

Par la suite, une simulation d'assemblages virtuels a été réalisée afin d'évaluer cette proposition. Les résultats obtenus démontrent clairement un effet positif de l'utilisation de l'assemblage sélectif avec projection de classe sur la propagation de la variation des composants à travers l'assemblage du moteur. En effet, une réduction de l'écart-type de la population des espaceurs qui contrôlent les 2 dégagements de l'ordre de 30% est obtenue.

Par contre, si du point de vue théorique la solution semble très intéressante, du point de vue pratique, elle présente certaines faiblesses. Premièrement, le nombre de « classes » d'espaceurs

utilisés, bien que fortement réduit, demeure toujours élevé. Cela a pour effet que les assembleurs seront quand même forcés de mesurer l'assemblage afin de sélectionner les espaceurs requis, les exposant ainsi à la possibilité de commettre des erreurs et utiliser les mauvais espaceurs. Deuxièmement, sur une possibilité de 500 assemblages possibles, la meilleure combinaison de pièces ne permet d'en réaliser que 232, soit un peu moins que 50%. En considérant la valeur très élevée de certaines pièces, notamment le générateur de gaz, il n'est pas rentable pour la compagnie d'absorber un tel coût de pièces en surplus.

Ce travail est un premier pas dans l'utilisation de l'assemblage sélectif pour améliorer le rendement d'assemblages multiparamétriques composés de pièces avec plus d'une dimension clés. Les résultats obtenus sont intéressants, mais démontrent que la proposition pourrait être retravaillée et améliorée. Cela ouvre la porte à plusieurs sujets de recherches potentielles pour le futur tel qu'une nouvelle méthode pour effectuer la projection de classe, un ajustement au niveau du nombre de classes utilisées ou encore, un ajustement des procédés de fabrication des composants afin de les orienter vers les classes requises.

BIBLIOGRAPHIE

Arai, T., & Takeuchi, K. (1992). A simulation system on assembly accuracy. *CIRP Annals* (Vol. 41, pp. 37–40).

Asha, A., Kannan, S., & Jayabalan, V. (2008). Optimization of clearance variation in selective assembly for components with multiple characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *38*(9), 1026–1044. doi:10.1007/s00170-007-1136-3

Berzak, N. (1992). Selective robotic assembly. *4th International Conference on Design Theory and Methodology, September 13, 1992 - September 16, 1992*, American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division (Publication) DE (Vol. 48, pp. 71–75). Publ by ASME.

Bjørke, Ø. (1978). *Computer-aided tolerancing*. Tapir.

Bonch-Osmolovskii, M. A., & Vechtomova, D. G. (1971). Rejection of articles in selective assembly owing to measurement errors. *Measurement Techniques*, *14*(10), 1479–1482. doi:10.1007/BF00981830

Bourgeois, F. (2007, juin). *Vers la maîtrise de la qualité des assemblages de précision*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse.

Buckingham, E. (1921). *PRINCIPLES OF INTERCHANGEABLE MANUFACTURING* (1st ed.). New York: The Industrial Press.

Chan, K. C., & Linn, R. J. (1999). A grouping method for selective assembly of parts of dissimilar distributions. *Quality Engineering*, *11*(2), 221–234.

Chen, M.-S. (1996). Optimising tolerance allocation for mechanical components correlated by selective assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *12*(5), 349–355. doi:10.1007/BF01179810

Conway, H. G. (1948). *Engineering tolerances: a study of tolerances, limits and fits for engineering purposes, with full tables of all recognized and published tolerance systems*. London: Pitman. Retrieved from http://catalog.hathitrust.org/Record/001512530

Coullard, C. R., Gamble, A. B., & Jones, P. C. (1998). Matching problems in selective assembly operations. *Annals of Operations Research*, *76*(0), 95–107. doi:10.1023/A:1018960924601

Desmond, D. J., & Setty, C. A. (1961). SIMPLIFICATION OF SELECTIVE ASSEMBLY. *International Journal of Production Research*, *1*(3), 3–18. doi:10.1080/00207546108943085

Duenyas, I., Keblis, M. F., & Pollock, S. M. (1997). Dynamic type mating. *Management Science*, *43*(6), 751–763.

Fang, X. D., & Zhang, Y. (1996). Assuring the Matchable Degree in Selective Assembly via a Predictive Model Based on Set Theory and Probability Method. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, *118*(2), 252–258. doi:10.1115/1.2831018

Gaillard, J. (1945). Selective Fits Are Easily Specified If Simple Instructions Are Followed. *American Machinist*, *89*(5), 108–111.

Glover, F. (1976). Effects of race-matching method for ball bearing manufacture. *Naval Research Logistics Quartely*, *14*, 313–316.

Iwata, S., Matsui, T., & McCormick, S. T. (1998). A fast bipartite network flow algorithm for selective assembly. *Operations Research Letters*, *22*(4–5), 137–143. doi:10.1016/S0167-6377(98)00017-0

Kannan S., & Jayabalan V. (2001). A new grouping method to minimize surplus parts in selective assembly for complex assemblies. *International Journal of Production Research*, *39*(9), 1851–1863.

Keblis, M. F., & Duenyas, I. (1999). Control of an Assembly System with Processing Time and Subassembly-type Uncertainty. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, *11*(4), 353–370.

Koelemeijer Chollet, S. (2001). *Méthodologie pour la conception de micro-systèmes et de leur équipement d'assemblage* (Phd). École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse.

Kulkarni, S. V., & Garg, T. K. (1985). Optimal allocation of tolerances in engineering design using selective assembly. *Journal of the Institution of Engineers, India. Mechanical Engineering Division*, *63*(4), 137–143.

Kwon, H.-M., Kim, K.-J., & Chandra, M. J. (1999). An economic selective assembly procedure for two mating components with equal variance. *Naval Research Logistics (NRL)*, *46*(7), 809–821. doi:10.1002/(SICI)1520-6750(199910)46:7<809::AID-NAV4>3.0.CO;2-Y

Lee, H. L., Hausman, W. H., & Gutierrez, G. J. (1990). Optimal machine settings of imperfect component production processes for assembly operations. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, *6*(6), 652 –658. doi:10.1109/70.63268

MANSOOR, E. M. (1961). SELECTIVE ASSEMBLY — ITS ANALYSIS AND APPLICATIONS. *International Journal of Production Research*, *1*(1), 13–24. doi:10.1080/00207546108943070

Markov, G. N. (1987). Selective assembly of precision multiparametric devices. *Measurement Techniques*, *30*(9), 914–916. doi:10.1007/BF00865910

Markov, N. N. (1964). Selection of measuring equipment for the automation and mechanization of control. *Measurement Techniques*, *7*(6), 467–470. doi:10.1007/BF00980544

Mease, D., Nair, V. N., & Sudjianto, A. (2004). Selective Assembly in Manufacturing: Statistical Issues and Optimal Binning Strategies. *Technometrics*, *46*(2), 165–175. doi:10.1198/004017004000000185

Pugh, G.A. (1992). Selective assembly with components of dissimilar variance. *Computers and Industrial Engineering*, *23*(1-4), 487–491.

Pugh, G.Allen. (1986). Partitioning for selective assembly. *Computers & Industrial Engineering*, *11*(1–4), 175–179. doi:10.1016/0360-8352(86)90073-2

Raj, M. V., Sankar, S. S., & Ponnambalam, S. G. (2011). Ant colony optimization to improve precision of complex assembly. Communications in Computer and Information Science (Vol. 152 CCIS, pp. 86–93). Zhengzhou, China: Springer Verlag. doi:10.1007/978-3-642-21402-8_14

Robinson, D. C., & Mazharsolook, E. (1993). Optimised selective assembly using model-based quality control. *Quality forum London*, *19*(1), 20–25.

Rubenchik, V. Y., Mentov, K. V., & Novikov, V. V. (1979). Automatic sorting of rings by size prior to selective assembly. *Measurement Techniques*, *22*(1), 71–73. doi:10.1007/BF00821586

Thesen, A., & Jantayavichit, A. (1999). Design and evaluation of a selective assembly station for high precision scroll compressor shells. *Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation—a bridge to the future - Volume 1*, WSC '99 (pp. 694–700). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/324138.324460

Thornton, A. C. (1999). A Mathematical Framework for the Key Characteristic Process. *Research in Engineering Design*, *11*(3), 145–157. doi:10.1007/s001630050011

Victor Raj, M., Saravana Sankar, S., & Ponnambalam, S. (2011). Minimizing clearance variations and surplus parts in multiple characteristic radial assembly through batch selective assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *57*(9), 1199–1222. doi:10.1007/s00170-011-3367-6

Wang, W., Li, D., & Chen, J. (2011). Minimizing assembly variation in selective assembly for complex assemblies using genetic algorithm (pp. 1401 –1406). doi:10.1109/MACE.2011.5987207

ANNEXE A – LISTE DES DISTRIBUTIONS ÉVALUÉES PAR « INDIVIDUAL DISTRIBUTION IDENTIFICATION »

Lors d'un test « Individual Distribution Identification » effectué par le logiciel Minitab v16, les distributions suivantes sont évaluées :

1) Logistic
2) Loglogistic
3) 3-Parameter Loglogistic
4) John-Transformation
5) Smallext Extrme value
6) Largest Extreme value
7) Gamma
8) 3-Parameter Gamma
9) Exponential
10) 2-Parameter Exponential
11) Weibull
12) 3-Parameter Weibull
13) Normal
14) Box-Cox Transformation
15) Lognormal
16) 3-Parameter Lognormal

ANNEXE B – CALCUL DU Ppk

Données de la dimension « c »

4.08800	4.08950	4.09050	4.08940	4.09040
4.08839	4.08767	4.08936	4.08953	4.08888

N = 10

<u>MOYENNE</u>

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i$$

= $\left(\frac{1}{10}\right)$ x (4.08800 + 4.08950 + 4.09050 + 4.08940 + 4.09040 + 4.08839 + 4.08767 + 4.08936 + 4.08953 + 4.08888)

= $\left(\frac{1}{10}\right)$ x 40.89163

= 4.089163

<u>ÉCART-TYPE</u>

$$\sigma = \sqrt{\mathrm{E}[(X-\mu)^2]} = \sqrt{\mathrm{E}[X^2] - (\mathrm{E}[X])^2}.$$

$$= \sqrt{\frac{[\,(4.08800 - 4.089163)^2 + (4.08950 - 4.089163)^2 + (4.09050 - 4.089163)^2 + (4.08940 - 4.089163)^2 + (4.09040 - 4.089163)^2 + (4.08839 - 4.089163)^2 + (4.08767 - 4.089163)^2 + (4.08936 - 4.089163)^2 + (4.08953 - 4.089163)^2 + (4.08888 - 4.089163)^2\,]}{10}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.00000792021}{10}}$$

= 0.00088996

Écart-type (échantillon) = 0.000866389

Écart-type (population) = 0.000937434

<u>Pp</u>

En utilisant l'écart type obtenu manuellement pour calculer le Pp:

Pp = $\frac{(USL - LSL)}{(6\ x\ \sigma)} = \frac{(4.094 - 4.086)}{(6\ x\ 0.00088996)}$ = 1.49820205

Ppu = $\frac{(\ USL - Mean)}{(\ 3\ x\ \sigma)} = \frac{(\ 4.094 - 4.08916\ )}{(\ 3\ x\ 0.00088996)}$ = 1.81

Ppl = $\frac{(\ Mean - LSL\ )}{(\ 3\ x\ \sigma)} = \frac{(\ 4.08916 - 4.086\ )}{(\ 3\ x\ 0.00088996)}$ = 1.18

Ppk = min$(\ Ppl, Ppu)$ = 1.18

Minitab utilize l'écart-type (population) pour calculer Pp:

Pp = $\frac{(USL - LSL)}{(6\ x\ \sigma)} = \frac{(4.094 - 4.086)}{(6\ x\ 0.000937434)} =$ 1.42

Ppu = $\frac{(\ USL-Mean)}{(\ 3\ x\ \sigma)} = \frac{(\ 4.094 - 4.08916\ )}{(\ 3\ x\ 0.000937434)}$ = 1.72

Ppl = $\frac{(\ Mean - LSL\ )}{(\ 3\ x\ \sigma)} = \frac{(\ 4.08916-4.086\ )}{(\ 3\ x\ 0.000937434)}$ = 1.12

Ppk = min(Ppl, Ppu) = 1.12

<u>Cpk</u>

En utilisant l'écart type obtenu manuellement pour effectuer les calculs:

Cpu = $\frac{(\ USL-Mean)}{(\ 3\ x\ \sigma)} = \frac{(\ 4.094 - 4.08916\ )}{(\ 3\ x\ 0.00088996)}$ = 1.81

Cpl = $\frac{(\ Mean - LSL\ )}{(\ 3\ x\ \sigma)} = \frac{(\ 4.08916-4.086\ )}{(\ 3\ x\ 0.00088996)}$ = 1.18

Cpk = min(Cpl, Cpu) = 1.18

Minitab utilise l'écart-type (échantillon) pour calculer l'indice de capabilité du procédé :

Cpu = $\frac{(\ USL-Mean)}{(\ 3\ x\ \sigma)} = \frac{(\ 4.094 - 4.08916\ )}{(\ 3\ x\ 0.000866389)}$ = 1.86

Cpl = $\frac{(\,Mean - LSL\,)}{(\,3\ x\ \sigma)} = \frac{(\,4.08916 - 4.086\,)}{(\,3\ x\ 0.000866389)}$ = 1.22

Cpk = min(Cpl, Cpu) = 1.22

ANNEXE C – ANDERSON-DARLING ET « P-VALUE »

ANDERSON-DARLING

$$AD = -n - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(2i-1)[\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]$$

Weight	i	Sorted	$F(X_i)$	$1-F(X_i)$	$1-F(X_{n-i+1})$	S	z
4.088	1	4.08767	0.055746	0.944254	0.077046	-5.45031	-1.49615
4.0895	2	4.088	0.107535	0.892465	0.093647	-13.7945	-0.98033
4.0905	3	4.08839	0.204967	0.795033	0.347818	-13.2049	-0.64453
4.0894	4	4.08888	0.38145	0.61855	0.359708	-13.9037	-0.36979
4.0904	5	4.08936	0.583166	0.416834	0.400273	-13.094	-0.1208
4.08839	6	4.0894	0.599727	0.400273	0.416834	-15.2498	0.120804
4.08767	7	4.0895	0.640292	0.359708	0.61855	-12.0407	0.369791
4.08936	8	4.08953	0.652182	0.347818	0.795033	-9.85205	0.644532
4.08953	9	4.0904	0.906353	0.093647	0.892465	-3.60559	0.98033
4.08888	10	4.0905	0.922954	0.077046	0.944254	-2.61318	1.496147
					Sum	-102.809	

$$\text{AD} = \frac{N-S}{N} = \frac{10-(-102.809)}{10} = 0.281$$

$$\text{AD*} = AD\ x\ (1 + \frac{0.75}{N} + \frac{2.25}{N^2}) = 0.281\ x\ (1 + \frac{0.75}{10} + \frac{2.25}{10^2}) = 0.308$$

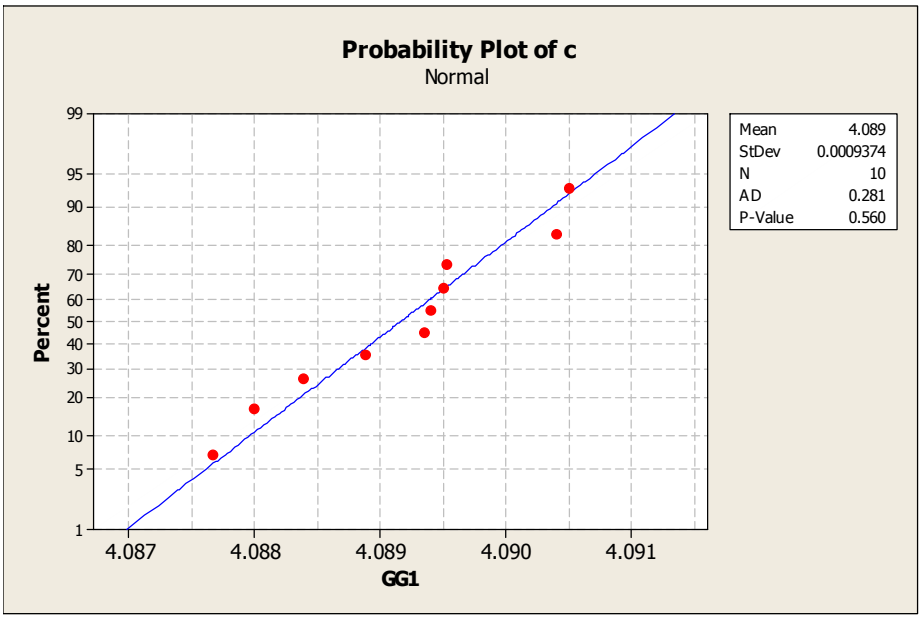
p-value

Critère	p-value
AD*=>0.6	$p = \exp(1.2937 - 5.709(AD^*) + 0.0186(AD^*)^2$
0.34 < AD* < .6	$p = \exp(0.9177 - 4.279(AD^*) - 1.38(AD^*)^2$
0.2 < AD* < 0.34	$p = 1 - \exp(-8.318 + 42.796(AD^*) - 59.938(AD^*)^2)$
AD* <= 0.2	$p = 1 - \exp(-13.436 + 101.14(AD^*) - 223.73(AD^*)^2)$

AD* = 0.308

$p = \exp(0.9177 - 4.279(AD^*) - 1.38(AD^*)^2$

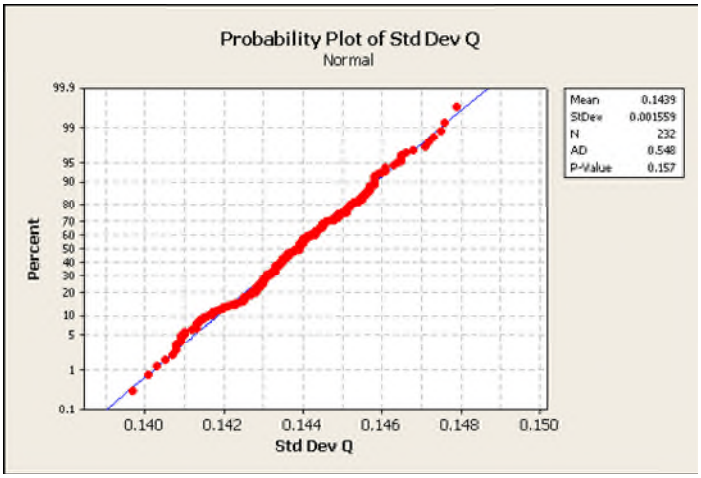
$P = \exp(0.9177 - 4.279(0.308) - 1.38(0.308)^2 = 0.560$



ANNEXE D – TEST D'HYPOTHÈSE STATISTIQUE

Espaceur Q :

Test sur le type de distribution donne une distribution Normale



Il est alors possible d'appliquer un test d'hypothèse Chi-carré avec un taux significatif évalué à 95%

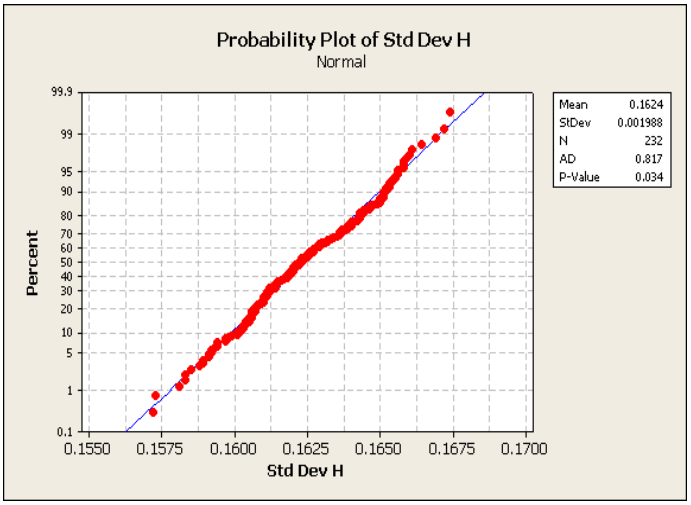
Test and CI for One Variance: Std Dev Q

```
Method

Null hypothesis         Sigma = 0.002739
Alternative hypothesis  Sigma < 0.002739

The chi-square method is only for the normal distribution.
The Bonett method is for any continuous distribution.


Statistics

Variable      N    StDev  Variance
Std Dev Q   232  0.00156  0.000002


99% One-Sided Confidence Intervals

                        Upper Bound   Upper Bound
Variable    Method        for StDev  for Variance
Std Dev Q   Chi-Square      0.00175      0.000003
            Bonett          0.00174      0.000003


Tests

                              Test
Variable    Method        Statistic   DF  P-Value
Std Dev Q   Chi-Square        74.85  231    0.000
            Bonett                -    -    0.000
```

La « p-value » étant 0.000, on peut rejeter l'hypothèse nulle.

Espaceur H :

Test sur le type de distribution donne une distribution non-normale



Étant donné que la distribution de H ne suit pas une distribution normale, on ne peut appliquer un test Chi-carré. Le test utilisé sera donc celui de Bonnett.

Test and CI for One Variance: Std Dev H

```
Method

Null hypothesis         Sigma = 0.002548
Alternative hypothesis  Sigma < 0.002548

The chi-square method is only for the normal distribution.
The Bonett method is for any continuous distribution.


Statistics

Variable      N    StDev  Variance
Std Dev H   232  0.00199  0.000004


95% One-Sided Confidence Intervals

                          Upper Bound   Upper Bound
Variable    Method          for StDev  for Variance
Std Dev H   Chi-Square        0.00215      0.000005
            Bonett            0.00214      0.000005


Tests

                                Test
Variable    Method        Statistic   DF  P-Value
Std Dev H   Chi-Square       140.58  231    0.000
            Bonett                -    -    0.000
```

La « p-value » étant égale à 0.000, l’hypothèse nulle est rejetée.

ANNEXE E – COMBINAISONS

L'assemblage est composé de 8 pièces, chacune ayant 2 configurations possibles. Le nombre de combinaisons différentes est donc de $2^8 = 256$.

Afin de faciliter la génération des combinaisons, on peut exprimer chacune des classes sous forme binaire, donc la classe inférieure est égale à « 0 » et la supérieure à « 1 ». Les combinaisons sont donc la représentation des chiffres 0 – 255 en forme binaire.

Décimal	Binaire	Décimal	Binaire	Décimal	Binaire	Décimal	Binaire
0	00000000	30	00011110	60	00111100	90	01011010
1	00000001	31	00011111	61	00111101	91	01011011
2	00000010	32	00100000	62	00111110	92	01011100
3	00000011	33	00100001	63	00111111	93	01011101
4	00000100	34	00100010	64	01000000	94	01011110
5	00000101	35	00100011	65	01000001	95	01011111
6	00000110	36	00100100	66	01000010	96	01100000
7	00000111	37	00100101	67	01000011	97	01100001
8	00001000	38	00100110	68	01000100	98	01100010
9	00001001	39	00100111	69	01000101	99	01100011
10	00001010	40	00101000	70	01000110	100	01100100
11	00001011	41	00101001	71	01000111	101	01100101
12	00001100	42	00101010	72	01001000	102	01100110
13	00001101	43	00101011	73	01001001	103	01100111
14	00001110	44	00101100	74	01001010	104	01101000
15	00001111	45	00101101	75	01001011	105	01101001
16	00010000	46	00101110	76	01001100	106	01101010
17	00010001	47	00101111	77	01001101	107	01101011
18	00010010	48	00110000	78	01001110	108	01101100
19	00010011	49	00110001	79	01001111	109	01101101
20	00010100	50	00110010	80	01010000	110	01101110
21	00010101	51	00110011	81	01010001	111	01101111
22	00010110	52	00110100	82	01010010	112	01110000
23	00010111	53	00110101	83	01010011	113	01110001
24	00011000	54	00110110	84	01010100	114	01110010
25	00011001	55	00110111	85	01010101	115	01110011
26	00011010	56	00111000	86	01010110	116	01110100
27	00011011	57	00111001	87	01010111	117	01110101
28	00011100	58	00111010	88	01011000	118	01110110
29	00011101	59	00111011	89	01011001	119	01110111

Décimal	Binaire	Décimal	Binaire	Décimal	Binaire	Décimal	Binaire
120	01111000	150	10010110	180	10110100	210	11010010
121	01111001	151	10010111	181	10110101	211	11010011
122	01111010	152	10011000	182	10110110	212	11010100
123	01111011	153	10011001	183	10110111	213	11010101
124	01111100	154	10011010	184	10111000	214	11010110
125	01111101	155	10011011	185	10111001	215	11010111
126	01111110	156	10011100	186	10111010	216	11011000
127	01111111	157	10011101	187	10111011	217	11011001
128	10000000	158	10011110	188	10111100	218	11011010
129	10000001	159	10011111	189	10111101	219	11011011
130	10000010	160	10100000	190	10111110	220	11011100
131	10000011	161	10100001	191	10111111	221	11011101
132	10000100	162	10100010	192	11000000	222	11011110
133	10000101	163	10100011	193	11000001	223	11011111
134	10000110	164	10100100	194	11000010	224	11100000
135	10000111	165	10100101	195	11000011	225	11100001
136	10001000	166	10100110	196	11000100	226	11100010
137	10001001	167	10100111	197	11000101	227	11100011
138	10001010	168	10101000	198	11000110	228	11100100
139	10001011	169	10101001	199	11000111	229	11100101
140	10001100	170	10101010	200	11001000	230	11100110
141	10001101	171	10101011	201	11001001	231	11100111
142	10001110	172	10101100	202	11001010	232	11101000
143	10001111	173	10101101	203	11001011	233	11101001
144	10010000	174	10101110	204	11001100	234	11101010
145	10010001	175	10101111	205	11001101	235	11101011
146	10010010	176	10110000	206	11001110	236	11101100
147	10010011	177	10110001	207	11001111	237	11101101
148	10010100	178	10110010	208	11010000	238	11101110
149	10010101	179	10110011	209	11010001	239	11101111

Décimal	Binaire
240	11110000
241	11110001
242	11110010
243	11110011
244	11110100
245	11110101
246	11110110
247	11110111
248	11111000
249	11111001
250	11111010
251	11111011
252	11111100
253	11111101
254	11111110
255	11111111

ANNEXE F – RÉSULTATS DE LA SIMULATION

Résultats de la simulation						
ID	Combinaison	Déviation standard Q	Déviation standard H	# de classes Q	# de classes H	# d'assemblages
92	01011011	0.00156	0.00198	9	11	232
84	01010011	0.00156	0.00206	9	11	232
74	01001001	0.00156	0.00201	9	12	207
82	01010001	0.00156	0.00204	9	11	207
66	01000001	0.00156	0.00205	9	11	207
90	01011001	0.00156	0.00200	10	12	207
76	01001011	0.00156	0.00201	9	10	228
68	01000011	0.00156	0.00208	9	11	228
91	01011010	0.00160	0.00196	9	11	135
75	01001010	0.00160	0.00198	9	11	135
89	01011000	0.00160	0.00199	9	11	135
73	01001000	0.00160	0.00201	9	11	135
81	01010000	0.00160	0.00208	9	11	135
83	01010010	0.00160	0.00210	9	10	135
65	01000000	0.00160	0.00211	9	11	135
67	01000010	0.00160	0.00212	9	10	135
28	00011011	0.00160	0.00201	10	11	260
59	00111010	0.00161	0.00204	10	11	87
60	00111011	0.00161	0.00204	10	10	87
43	00101010	0.00161	0.00206	10	10	87
44	00101011	0.00161	0.00206	10	10	87
57	00111000	0.00161	0.00207	10	12	87
58	00111001	0.00161	0.00209	10	11	87
41	00101000	0.00161	0.00209	10	11	87
42	00101001	0.00161	0.00211	10	11	87
51	00110010	0.00161	0.00221	10	12	87
52	00110011	0.00161	0.00223	10	11	87
49	00110000	0.00161	0.00223	10	11	87
33	00100000	0.00161	0.00223	10	11	87
35	00100010	0.00161	0.00223	10	12	87
36	00100011	0.00161	0.00224	10	11	87
50	00110001	0.00161	0.00224	10	12	87
34	00100001	0.00161	0.00226	10	11	87
20	00010011	0.00161	0.00210	10	11	239
12	00001011	0.00163	0.00204	10	10	228
4	00000011	0.00163	0.00213	10	11	228

26	00011001	0.00164	0.00202	10	11	207
10	00001001	0.00164	0.00204	10	12	207
18	00010001	0.00164	0.00208	10	11	207
2	00000001	0.00164	0.00209	10	12	207
27	00011010	0.00166	0.00206	10	11	135
25	00011000	0.00166	0.00206	10	10	135
11	00001010	0.00166	0.00207	10	10	135
9	00001000	0.00166	0.00208	10	12	135
17	00010000	0.00166	0.00214	10	11	135
1	00000000	0.00166	0.00216	10	11	135
19	00010010	0.00166	0.00218	10	12	135
3	00000010	0.00166	0.00220	10	11	135
123	01111010	0.00166	0.00202	9	11	87
124	01111011	0.00166	0.00203	9	11	87
107	01101010	0.00166	0.00205	9	11	87
108	01101011	0.00166	0.00205	9	11	87
121	01111000	0.00166	0.00207	9	11	87
105	01101000	0.00166	0.00209	9	11	87
122	01111001	0.00166	0.00210	9	10	87
106	01101001	0.00166	0.00211	9	11	87
115	01110010	0.00166	0.00223	9	10	87
99	01100010	0.00166	0.00223	9	10	87
116	01110011	0.00166	0.00224	9	11	87
100	01100011	0.00166	0.00225	9	11	87
113	01110000	0.00166	0.00225	9	11	87
97	01100000	0.00166	0.00225	9	12	87
114	01110001	0.00166	0.00228	9	12	87
98	01100001	0.00166	0.00228	9	11	87
129	10000000	0.00167	0.00224	9	12	135
145	10010000	0.00167	0.00226	9	13	135
139	10001010	0.00167	0.00228	9	11	135
137	10001000	0.00167	0.00229	9	11	135
131	10000010	0.00167	0.00229	9	12	135
153	10011000	0.00167	0.00230	9	12	135
155	10011010	0.00167	0.00231	9	11	135
147	10010010	0.00167	0.00231	9	12	135
171	10101010	0.00173	0.00229	9	11	87
169	10101000	0.00173	0.00230	9	11	87
187	10111010	0.00173	0.00231	9	11	87
185	10111000	0.00173	0.00231	9	11	87
172	10101011	0.00173	0.00232	9	11	87

188	10111011	0.00173	0.00233	9	11	87
170	10101001	0.00173	0.00233	9	12	87
186	10111001	0.00173	0.00235	9	12	87
161	10100000	0.00173	0.00240	9	13	87
177	10110000	0.00173	0.00242	9	13	87
163	10100010	0.00173	0.00243	9	12	87
162	10100001	0.00173	0.00243	9	13	87
179	10110010	0.00173	0.00243	9	12	87
164	10100011	0.00173	0.00244	9	11	87
178	10110001	0.00173	0.00245	9	13	87
180	10110011	0.00173	0.00246	9	11	87
203	11001010	0.00178	0.00230	10	11	135
193	11000000	0.00178	0.00230	10	12	135
219	11011010	0.00178	0.00232	10	11	135
209	11010000	0.00178	0.00232	10	13	135
195	11000010	0.00178	0.00232	10	11	135
201	11001000	0.00178	0.00233	10	11	135
211	11010010	0.00178	0.00234	10	12	135
217	11011000	0.00178	0.00235	10	11	135
235	11101010	0.00180	0.00229	9	11	87
251	11111010	0.00180	0.00230	9	11	87
233	11101000	0.00180	0.00231	9	11	87
236	11101011	0.00180	0.00232	9	10	87
249	11111000	0.00180	0.00232	9	11	87
252	11111011	0.00180	0.00233	9	11	87
234	11101001	0.00180	0.00234	9	11	87
250	11111001	0.00180	0.00236	9	11	87
225	11100000	0.00180	0.00243	9	13	87
227	11100010	0.00180	0.00244	9	12	87
241	11110000	0.00180	0.00245	9	11	87
243	11110010	0.00180	0.00246	9	12	87
228	11100011	0.00180	0.00246	9	12	87
226	11100001	0.00180	0.00247	9	13	87
244	11110011	0.00180	0.00248	9	12	87
242	11110001	0.00180	0.00249	9	13	87
138	10001001	0.00180	0.00228	11	13	207
154	10011001	0.00180	0.00229	11	14	207
130	10000001	0.00180	0.00233	11	14	207
146	10010001	0.00180	0.00233	11	12	207
202	11001001	0.00180	0.00231	11	13	207
218	11011001	0.00180	0.00232	11	12	207

194	11000001	0.00180	0.00235	11	13	207
210	11010001	0.00180	0.00235	11	13	207
204	11001011	0.00181	0.00230	11	12	228
196	11000011	0.00181	0.00234	11	12	228
220	11011011	0.00182	0.00230	11	12	232
212	11010011	0.00182	0.00234	11	12	232
156	10011011	0.00182	0.00226	12	12	240
148	10010011	0.00182	0.00233	12	14	239
140	10001011	0.00184	0.00228	11	13	228
132	10000011	0.00184	0.00235	11	13	228
63	00111110	0.00207	0.00204	12	11	87
64	00111111	0.00207	0.00204	12	10	87
47	00101110	0.00207	0.00206	12	10	87
48	00101111	0.00207	0.00206	12	10	87
61	00111100	0.00207	0.00207	12	12	87
62	00111101	0.00207	0.00209	11	11	87
45	00101100	0.00207	0.00209	12	11	87
46	00101101	0.00207	0.00211	12	11	87
55	00110110	0.00207	0.00221	12	12	87
56	00110111	0.00207	0.00223	12	11	87
53	00110100	0.00207	0.00223	12	11	87
37	00100100	0.00207	0.00223	12	11	87
39	00100110	0.00207	0.00223	12	12	87
40	00100111	0.00207	0.00224	12	11	87
54	00110101	0.00207	0.00224	12	12	87
38	00100101	0.00207	0.00226	12	11	87
175	10101110	0.00208	0.00229	11	11	87
173	10101100	0.00208	0.00230	11	11	87
191	10111110	0.00208	0.00231	11	11	87
189	10111100	0.00208	0.00231	11	11	87
176	10101111	0.00208	0.00232	11	11	87
192	10111111	0.00208	0.00233	11	11	87
174	10101101	0.00208	0.00233	11	12	87
190	10111101	0.00208	0.00235	11	12	87
165	10100100	0.00208	0.00240	11	13	87
181	10110100	0.00208	0.00242	11	13	87
167	10100110	0.00208	0.00243	11	12	87
166	10100101	0.00208	0.00243	11	13	87
183	10110110	0.00208	0.00243	11	12	87
168	10100111	0.00208	0.00244	11	11	87
182	10110101	0.00208	0.00245	11	13	87

184	10110111	0.00208	0.00246	11	11	87
96	01011111	0.00214	0.00200	13	11	188
80	01001111	0.00214	0.00201	13	11	188
94	01011101	0.00214	0.00202	13	11	188
78	01001101	0.00214	0.00203	13	11	188
86	01010101	0.00214	0.00208	13	10	188
70	01000101	0.00214	0.00209	13	11	188
88	01010111	0.00214	0.00211	13	11	188
72	01000111	0.00214	0.00211	13	11	188
30	00011101	0.00217	0.00206	13	11	188
32	00011111	0.00217	0.00206	13	10	188
16	00001111	0.00217	0.00208	13	10	188
14	00001101	0.00217	0.00208	13	11	188
22	00010101	0.00217	0.00212	13	11	188
6	00000101	0.00217	0.00214	13	12	188
24	00010111	0.00217	0.00217	13	11	188
8	00000111	0.00217	0.00217	13	11	188
95	01011110	0.00218	0.00196	13	11	135
79	01001110	0.00218	0.00198	13	11	135
93	01011100	0.00218	0.00199	13	11	135
77	01001100	0.00218	0.00201	13	11	135
85	01010100	0.00218	0.00208	13	11	135
87	01010110	0.00218	0.00210	13	10	135
69	01000100	0.00218	0.00211	13	11	135
71	01000110	0.00218	0.00212	13	10	135
31	00011110	0.00219	0.00206	13	11	135
29	00011100	0.00219	0.00206	13	12	135
15	00001110	0.00219	0.00207	13	10	135
13	00001100	0.00219	0.00208	13	12	135
21	00010100	0.00219	0.00214	13	11	135
5	00000100	0.00219	0.00216	13	11	135
23	00010110	0.00219	0.00218	13	12	135
7	00000110	0.00219	0.00220	13	11	135
127	01111110	0.00222	0.00202	12	11	87
128	01111111	0.00222	0.00203	12	11	87
111	01101110	0.00222	0.00205	12	10	87
112	01101111	0.00222	0.00205	12	11	87
125	01111100	0.00222	0.00207	12	11	87
109	01101100	0.00222	0.00209	12	11	87
126	01111101	0.00222	0.00210	12	10	87
110	01101101	0.00222	0.00211	12	11	87

119	01110110	0.00222	0.00223	12	10	87
103	01100110	0.00222	0.00223	12	10	87
120	01110111	0.00222	0.00224	12	11	87
104	01100111	0.00222	0.00225	12	11	87
117	01110100	0.00222	0.00225	12	11	87
101	01100100	0.00222	0.00225	12	12	87
118	01110101	0.00222	0.00228	12	12	87
102	01100101	0.00222	0.00228	12	11	87
239	11101110	0.00223	0.00229	12	11	87
255	11111110	0.00223	0.00230	12	11	87
237	11101100	0.00223	0.00231	12	11	87
240	11101111	0.00223	0.00232	12	10	87
253	11111100	0.00223	0.00232	12	11	87
256	11111111	0.00223	0.00233	12	11	87
238	11101101	0.00223	0.00234	12	11	87
254	11111101	0.00223	0.00236	12	11	87
229	11100100	0.00223	0.00243	12	13	87
231	11100110	0.00223	0.00244	12	12	87
245	11110100	0.00223	0.00245	12	12	87
247	11110110	0.00223	0.00246	12	11	87
232	11100111	0.00223	0.00246	12	12	87
230	11100101	0.00223	0.00247	12	13	87
248	11110111	0.00223	0.00248	12	12	87
246	11110101	0.00223	0.00249	12	13	87
134	10000101	0.00224	0.00225	13	13	188
144	10001111	0.00224	0.00226	13	12	188
142	10001101	0.00224	0.00226	13	12	188
158	10011101	0.00224	0.00226	13	13	188
160	10011111	0.00224	0.00227	13	12	188
136	10000111	0.00224	0.00229	13	12	188
152	10010111	0.00224	0.00230	13	12	188
133	10000100	0.00224	0.00224	13	12	135
150	10010101	0.00224	0.00225	13	12	188
149	10010100	0.00224	0.00226	13	13	135
143	10001110	0.00224	0.00228	13	11	135
141	10001100	0.00224	0.00229	13	11	135
135	10000110	0.00224	0.00229	13	12	135
157	10011100	0.00224	0.00230	13	12	135
159	10011110	0.00224	0.00231	13	11	135
151	10010110	0.00224	0.00231	13	12	135
208	11001111	0.00229	0.00229	14	12	188

224	11011111	0.00229	0.00229	14	12	188
198	11000101	0.00229	0.00229	14	12	188
214	11010101	0.00229	0.00230	14	12	188
206	11001101	0.00229	0.00230	14	12	188
222	11011101	0.00229	0.00230	14	11	188
200	11000111	0.00229	0.00231	14	11	188
216	11010111	0.00229	0.00232	14	11	188
207	11001110	0.00236	0.00230	14	11	135
197	11000100	0.00236	0.00230	14	12	135
223	11011110	0.00236	0.00232	14	11	135
213	11010100	0.00236	0.00232	14	13	135
199	11000110	0.00236	0.00232	14	11	135
205	11001100	0.00236	0.00233	14	11	135
215	11010110	0.00236	0.00234	14	12	135
221	11011100	0.00236	0.00235	14	11	135