

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Ing.

PAR
Marc Jr. LÉPINE

ESTIMATION DES INDICES DE CAPABILITÉ D'UN ASSEMBLAGE MÉCANO-
SOUDÉ EN TENANT COMPTE DE LA COMPLEXITÉ GÉOMÉTRIQUE

MONTREAL, LE 10 JANVIER 2014

©Tous droits réservés, Marc Jr. Lépine, 2014

PRÉSENTATION DU JURY
CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Antoine Tahan, ing. Ph.D., directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Rioux, ing. Ph.D., président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. René Mayer, ing. Ph.D., membre du jury
Département de génie mécanique, École polytechnique de Montréal

M. Sylvain Lévesque, ing. M.Ing., membre du jury
Bombardier Aéronautique

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 6 DÉCEMBRE 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier les personnes qui ont rendu possible la réalisation de ce mémoire. Tout d'abord, je remercie grandement la compagnie Nova Bus de m'avoir accordé leur confiance, un accès à leurs installations, un encadrement et un soutien financier. Sur ce dernier point, je remercie également le Fond québécois de recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), le Conseil de recherche en science naturelle et génie du Canada (CRSNG) et l'École de technologie supérieure (ÉTS).

Je tiens aussi à remercier sincèrement M. Antoine Tahan, professeur au département de génie mécanique et directeur de mémoire. Je le remercie d'abord de m'avoir encouragé à poursuivre mes études, pour sa confiance et son soutien autant académique que moral tout au long de mes travaux de 2^e cycle universitaire.

Finalement, je tiens à remercier mes parents, mes frères et sœurs, mes amis et ma copine Marie-Pier. Sans vos encouragements et votre support, je n'aurais probablement pas connu les joies et les misères de la vie universitaire!

ESTIMATION DES INDICES DE CAPABILITÉ D'UN ASSEMBLAGE MÉCANO-SOUDÉ EN TENANT COMPTE DE LA COMPLEXITÉ GÉOMÉTRIQUE

Marc Jr. LÉPINE

RÉSUMÉ

Lors de la conception d'un produit, l'estimation de la capacité (l'aptitude) d'un procédé à rencontrer un requis d'ingénierie est un aspect très important qui permet aux concepteurs d'assurer la fabricabilité et l'assemblage des composants mécaniques. La contrainte majeure pour l'obtention d'une estimation fiable de la capacité d'un procédé est que des pièces doivent obligatoirement être fabriquées, et ce, même si d'autres composants à géométries différentes l'ont déjà été. La capacité connue du procédé pour une certaine géométrie devient inexploitable pour des composants à géométries différentes puisque la variation inhérente au procédé est affectée. Dans cette optique, ce mémoire présente une méthodologie qui permet d'estimer rapidement la capacité d'un procédé sur un nouveau composant à partir de données historiques recueillies sur des pièces issues du même procédé, mais dont les géométries sont différentes. Un concept original, celui de complexité géométrique, nous permet d'utiliser la capacité connue d'une certaine géométrie pour estimer les nouvelles capacités du procédé à fabriquer des géométries plus ou moins complexe. Le projet de recherche ayant été réalisé en partenariat avec la compagnie Nova Bus, nous avons utilisé ce modèle pour estimer la capacité d'un procédé d'assemblage mécano soudé à rencontrer des tolérances géométriques de profil telles que définies par la norme ASME Y14.5(2009). Des exemples d'applications réelles nous ont également permis de valider la méthodologie proposée. Une étude de cas supplémentaire, portant sur un procédé d'usinage, nous démontre que la méthode est applicable dans d'autres contextes.

Mots clés: Capacité de procédé, complexité géométrique, tolérancement statistique, tolérance de profil, conception pour la fabrication.

ESTIMATION DES INDICES DE CAPABILITÉ D'UN ASSEMBLAGE MÉCANO SOUDÉ EN TENANT COMPTE DE LA COMPLEXITÉ GÉOMÉTRIQUE

Marc Jr. LÉPINE

ABSTRACT

When designing a product, the process capability to meet engineering requirements is a very important aspect which allows designers to assure manufacturability and assembly of mechanical components. The major constraint to obtain a reliable estimation of process capability is this obligation to produce a certain amount of parts, and this even if parts of different geometries already have been manufactured. The known process capability for a given geometry becomes invalid for components with different geometries since the variation inherent to the process is affected. In this sense, this Master's thesis presents a methodology which allows the rapid evaluation of process capability for a new part by using historical data collected on parts manufactured by the same process, but with different geometries. An original concept, the geometric complexity, allows us to use the known process capability of a given geometry to estimate new process capabilities for different geometries of higher or lower complexity. Through a partnership with the company Nova Bus, we used this model to estimate the capability of a welding process to meet geometric tolerances of profile as defined by standard ASME Y14.5 (2009). The proposed model is validated through real case studies. A complementary study is used to demonstrate the applicability of the model in other frameworks, in this case, a machining process.

Keywords: Process capability, geometrical complexity, statistical tolerancing, profile tolerance, design for manufacturing.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	5
1.1 Objectifs de la recherche.....	9
CHAPITRE 2 REVUE LITTÉRAIRE ET MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	11
2.1 La capacité des procédés	11
2.1.1 Les indices de capacité	12
2.1.2 Les indices de capacité multivariées	16
2.2 La complexité géométrique.....	18
2.3 Le contrôle géométrique des surfaces de styles	27
2.4 Méthodologie expérimentale	30
CHAPITRE 3 ESTIMATION DE LA CAPABILITÉ EN CONTEXTE D'INGÉNIERIE CONCOURANTE.....	33
3.1 Estimation de la capacité lors du développement de produit chez Nova Bus	34
3.2 Exemple typique d'analyse de capacité	36
3.3 Estimation de la capacité par la complexité géométrique	38
3.4 Conclusion	40
CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT D'UN INDICE DE COMPLEXITÉ GÉOMÉTRIQUE	43
4.1 La complexité d'un point de vue géométrique	43
4.2 La complexité d'un point de vue du procédé de fabrication	47
4.3 Étude de cas (1): La complexité d'un système d'attaches	48
4.4 Étude de cas (2): La complexité d'une structure mécano soudée d'un mur latéral d'autobus urbain	49
4.5 Étude de cas (3): La complexité des surfaces de styles	54
4.6 Conclusion	56
CHAPITRE 5 PROPOSITION D'UN MODÈLE POUR INTÉGRER LA COMPLEXITÉ DANS L'ESTIMATION DE LA CAPABILITÉ DES TOLÉRANCES GÉOMÉTRIQUES DE PROFIL	59
5.1 Rôle de l'indice de complexité dans l'estimation de la capacité	59
5.2 La tolérance de profil sans aucun DDL (type 1).....	61
5.3 La tolérance de profil avec un blocage de 3 DDL (type 2).....	65
5.4 La tolérance de profil avec 6 DDL (type 3).....	68
5.5 Incertitude associée au modèle	72

5.6	Exemple d'application	73
5.7	Conclusion	75
CHAPITRE 6 ESTIMATION DE LA CAPABILITÉ DANS LE CAS D'UN PROCÉDÉ D'ASSEMBLAGES MÉCANO-SOUDÉ		
6.1	La capabilité d'un système d'attaches.....	77
6.1.1	Analyse descriptive du procédé	78
6.1.2	Analyse des capabilités du procédé d'assemblage mécanosoudé.....	79
6.1.3	Extrapolation de la capabilité.....	81
6.1.4	Interpolation de la capabilité.....	83
6.2	La capabilité d'une structure de mur d'autocar.....	85
6.2.1	Extrapolation de la capabilité.....	86
6.2.2	Interpolation de la capabilité.....	88
6.3	Discussion	89
6.4	Conclusion	90
CHAPITRE 7 ESTIMATION DE LA CAPABILITÉ DANS LE CAS D'UN PROCÉDÉ D'USINAGE.....		
7.1	Déroulement de l'expérimentation	91
7.2	Extrapolation de la capabilité.....	93
7.3	Interpolation de la capabilité.....	95
7.4	Conclusion	96
CONCLUSION		99
RECOMMANDATIONS		103
ANNEXE I	DÉVELOPPEMENT DE LA FONCTION DE DENSITÉ (PDF) POUR UNE TOLÉRANCE DE PROFIL SANS DDL	107
ANNEXE II	DÉVELOPPEMENT DE LA FONCTION DE DENSITÉ (PDF) POUR UNE TOLÉRANCE DE PROFIL AVEC TROIS DDL.....	111
ANNEXE III	ALGORITHME PERMETTANT L'ASSOCIATION D'UNE SURFACE SELON LE CRITÈRE DE CHEBYSHEV.....	113
ANNEXE IV	ANALYSES DES CAPABILITÉS DU PROCÉDÉ D'ASSEMBLAGE MÉCANO-SOUDÉ POUR UN SYSTÈME D'ATTACHES.....	119

ANNEXE V	USINAGE DES ÉCHANTILLONS	125
BIBLIOGRAPHIE		129

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1	Les indices de complexité géométrique 26
Tableau 2	Complexité géométrique d'un système d'attaches..... 49
Tableau 3	Complexité géométrique des structures de mur 53
Tableau 4	Complexité géométrique de <i>freeforms</i> en fonction de la courbure totale 56
Tableau 5	Percentiles $x_{50\%}$ pour f_{Ztype1} 64
Tableau 6	Percentiles $x_{99.865\%}$ pour f_{Ztype1} 65
Tableau 7	Percentiles $x_{50\%}$ pour f_{Ztype2} 68
Tableau 8	Percentiles $x_{99.865\%}$ pour f_{Ztype2} 68
Tableau 9	Percentiles $x_{50\%}$ pour f_{Ztype3} 71
Tableau 10	Percentiles $x_{99.865\%}$ pour f_{Ztype3} 71
Tableau 11	PDF des déviations de chaque support. (a) PDF des δ_i (b) PDF des δ_i^* 79
Tableau 12	Résultats pour l'étude de cas #1 - Extrapolation 82
Tableau 13	PDF des déviations de la géométrie complexe (a) PDF des δ_i (b) PDF des δ_i^* 83
Tableau 14	Résultats pour l'étude de cas #1 - Interpolation 84
Tableau 15	requis en profil sur les structures de mur d'autocar..... 86
Tableau 16	Résultats pour l'étude de cas #2 - Extrapolation 87
Tableau 17	Résultats pour l'étude de cas #2 - Interpolation 89
Tableau 18	Spécimens usinés pour l'étude de cas #3 92
Tableau 19	Résultats pour l'étude de cas #3 - Extrapolation 95
Tableau 20	Résultats pour l'étude de cas #3 - Interpolation 95
Tableau 21	Analyses descriptives des supports 119

Tableau 22	Comparaison des PDF pour δ_i	120
Tableau 23	Comparaison des PDF pour δ_i^*	121
Tableau 24	Indépendance des données.....	121
Tableau 25	Cartes de contrôle	122
Tableau 26	Ajustement de la fonction de <i>Weibull</i> à trois paramètres	123
Tableau 27	Capabilités du procédé pour différentes géométries de système d'attaches	123

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0-1 Déroulement du mémoire.	4
Figure 1-1 Exemple de chartes de tolérancement. Tiré de Swift et Booker (1996).	5
Figure 1-2 Processus de DFMA pour des géométries similaires.	6
Figure 1-3 Complexité des éléments.	7
Figure 1-4 Complexité des patrons de trou.	8
Figure 2-1 Comportement d'un procédé de fabrication. Adapté de (ISO 22514, 2007).	14
Figure 2-2 (a) Procédé bilatéral (b) Procédé unilatéral. Adapté de Bothe (2006).	15
Figure 2-3 Domaine des tolérances - variations. Tiré de Niavarani <i>et</i> <i>al.</i> (2012).	16
Figure 2-4 Différentes définitions des domaines de tolérance et de variation. Tiré de Niavarani, Noorossana et Abbasi (2012).	17
Figure 2-5 Domaine conforme de défaillance. Tiré de Mannar et Ceglarek (2009).	18
Figure 2-6 Domaine de conformité formé de requis dépendants. Tiré de Tahan et Cauvier (2012).	18
Figure 2-7 Exemples de sections typiques de profilés extrudés. Tiré de (Qamar, Arif et Sheikh, 2004).	19
Figure 2-8 Exemples de pièces de fonderies typiques. Tiré de Joshi et Ravi (2010).	20
Figure 2-9 (a) Différents types de mesures de forme (b) Distributions statistiques de formes typiques. Tiré de Osada et al. (2002).	22
Figure 2-10 Exemple de classification par histogramme de forme. Tiré de (Xiao et Yang, 2010).	22
Figure 2-11 Déviations géométriques d'une surface de style. Tiré de Barari, ElMaraghy et ElMaraghy (2009).	23

Figure 2-12	Localisation des zones plus difficiles à usiner par un rendu de couleur. Tiré de Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010).	24
Figure 2-13	Tolérance de profil selon ASME Y14.5.	27
Figure 3-1	Processus d'ingénierie concourante.	34
Figure 3-2	Estimation de la capabilité d'un procédé lors du développement de produit (adapté de Levesque (2009)).	36
Figure 3-3	Requis (tolérance de profil) sur un système d'attaches.	37
Figure 3-4	Exemple de nouvelle géométrie pour le système d'attaches.	38
Figure 3-5	Estimation de la capabilité d'un procédé par la complexité géométrique.....	39
Figure 4-1	Exemple d'ensembles géométriques (tiré de ASME Y14.5 (2009)).....	44
Figure 4-2	Processus d'assemblage des structures de murs.	50
Figure 4-3	Corrélation entre le nombre d'éléments et la taille des structures de murs.	51
Figure 4-4	Opération de normalisation de la complexité géométrique.	58
Figure 5-1	Représentation des déviations normales à la surface théorique. Tiré de Levesque (2009).	61
Figure 5-2	Écart réel z_{TYPE1}	62
Figure 5-3	Fonction de densité de probabilité $f(z_{type1}, n)$ pour $f(\delta_i)=N(0,1)$	63
Figure 5-4	tol_{TYPE1} en fonction de C_{pk} et n pour $f(\delta_i)=N(0,1)$	64
Figure 5-5	Écart réel z_{TYPE2}	65
Figure 5-6	Fonction de densité de probabilité $f(z_{TYPE2}, n)$ pour $f(\delta_i)=N(0,1)$	67
Figure 5-7	tol_{TYPE2} en fonction de C_{pk} et n pour $f(\delta_i)=N(0,1)$	67
Figure 5-8	Écart réel z_{TYPE3}	70
Figure 5-9	Fonction de densité de probabilité $f(z_{TYPE3}, n)$ pour $f(\delta_i^*)=N(0,1)$	70

Figure 5-10	tol_{TYPE3} en fonction de C_{pk} et n pour $f(\delta_i^*)=N(0,1)$	71
Figure 5-11	Complexité géométrique des surfaces planes.	73
Figure 5-12	Tolérance de profil avec 6 DDL en fonction de la complexité géométrique pour $C_{pk} \geq 1.33$	74
Figure 6-1	Indice de capabilité C_{pk} en fonction du nombre de supports.	80
Figure 6-2	Comparatif entre C_{pk} mesurés et C_{pk} théoriques pour l'étude de cas #1 - Extrapolation.	81
Figure 6-3	Corrélation pour l'étude de cas #1- Extrapolation.	82
Figure 6-4	Comparatif entre C_{pk} mesurés et C_{pk} théoriques pour l'étude de cas #1 - Interpolation.	84
Figure 6-5	Corrélation pour l'étude de cas #1- Interpolation.	85
Figure 6-6	Comparatif entre C_{pk} mesurés et C_{pk} théoriques pour l'étude de cas #2 - Extrapolation.	87
Figure 6-7	Comparatif entre C_{pk} mesurés et C_{pk} théoriques pour l'étude de cas #2 - Interpolation.	88
Figure 7-1	(a) Machine-outil (b) Montage utilisé lors de l'usinage.	93
Figure 7-2	Comparatif entre percentiles mesurés et percentiles théoriques - Extrapolation.	94
Figure 7-3	Comparatif entre percentiles mesurés et percentiles théoriques - Interpolation.	96

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIAG	Groupe d'action pour l'industrie automobile (<i>Automotive Industry Action Group</i>)
ANSI	Institut nationale de normalisation américaine (<i>American National Standard Institute</i>)
APQP	Planification avancée de la qualité de produit (<i>Advanced Product Quality Planning</i>)
ASME	Société américaine des ingénieurs mécanique (<i>American Society of Mechanical Engineers</i>)
CAD	Conception assistée par ordinateur (<i>Computer Aided Design</i>)
CE	Ingénierie concourante, simultanée (<i>Concurrent Engineering</i>)
CDF	Fonction de probabilité cumulative (<i>Cumulative Density Function</i>)
DFMA	Conception pour la fabrication et l'assemblage (<i>Design For Manufacturing and Assembly</i>)
DDL	Degrés de liberté
GD&T	Tolérancement géométrique et dimensionnelle (<i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i>)
IC	Indice de capacité
ISO	Organisation internationale de normalisation (<i>International Standard Organisation</i>)
KC	Caractéristique critique (<i>Key Characteristics</i>)
LTi	Limite de tolérance inférieure
LTS	Limite de tolérance supérieure
MMC	Condition maximum de matière (<i>Maximum Material Condition</i>)
MSA	Analyse de système de mesure (<i>Measurement System Analysis</i>)
MCS	Simulation de Monte Carlo (<i>Monte Carlo Simulation</i>)

PDF	Fonction de densité de probabilité (<i>Probability Density Function</i>)
PI	Partenaire industriel
SFDL	Usine Nova Bus de St-François-du-Lac
STE	Usine Nova Bus de St-Eustache
T	Valeur cible (<i>Target</i>)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mm	Millimètres
po	Pouces
$C_{p,pk,pm...}$	Indice de capabilité
$P_{p,pk,pm...}$	Indice de performance
G	Indice de complexité dimensionnel
n	Indice de complexité adimensionnel
tol_{TYPEi}	Tolérance en profil
z_{TYPEi}	Écart réel en profil
u, v, w	Degré de liberté de rotation
x, y, z	Degré de liberté de translation
α	Paramètre d'échelle d'une distribution de <i>Weibull</i> à trois paramètres
β	Paramètre de forme d'une distribution de <i>Weibull</i> à trois paramètres
λ	Paramètre de décalage d'une distribution de <i>Weibull</i> à trois paramètres
δ	Déviation normale à la surface théorique
μ	Moyenne
σ	Écart-type
\bar{X}	Estimateur de la moyenne
s	Estimateur de l'écart-type
$\bar{X}_{\rightarrow 0}$	Estimateur de la moyenne qui maximise la capabilité
$s_{\rightarrow 0}$	Estimateur de l'écart-type qui maximise la capabilité
$\bar{X}_{\leftarrow 0}$	Estimateur de la moyenne qui minimise la capabilité
$s_{\leftarrow 0}$	Estimateur de l'écart-type qui minimise la capabilité
$x_{\%}$	Percentile
\bar{P}_i^{NOM}	Vecteur position d'un point nominal
\bar{P}_i^{MES}	Vecteur position d'un point mesuré
\bar{N}_i^{NOM}	Vecteur normal à la surface théorique
$t_{\alpha/2, m-1}$	Distribution aléatoire de <i>Student</i> avec $m-1$ degrés de liberté
$\chi^2_{\alpha/2, m-1}$	Distribution aléatoire de Khi-deux avec $m-1$ degrés de liberté
$N(\mu, \sigma)$	Distribution aléatoire normale de moyenne μ et d'écart-type σ
$W(\alpha, \beta, \lambda)$	Distribution aléatoire de <i>Weibull</i> ;a trois paramètres
θ	Matrice de transformation rigide

INTRODUCTION

L'ingénierie concourante¹ (CE) au sens large est une approche qui consiste à intégrer simultanément, et dès le premier stade de conception, plusieurs éléments du cycle de vie d'un produit tel que les exigences clients, le tolérancement des caractéristiques critiques (KC), les méthodes et coûts de fabrication, le plan de contrôle de la qualité, l'entretien et la mise au rebut ou le recyclage. Un des objectifs importants de cette approche est celui d'assurer la qualité et la disposition compétitive d'un produit dès son développement.

Comme bénéfices importants de l'ingénierie concourante, on retrouve la réduction considérable du temps de développement, grâce entre autres à la réduction du nombre de revues (et révisions) de conception², et la réduction des coûts associés à la fabrication et l'assemblage du produit. En effet, en considérant strictement le point de vue manufacturier, il a été démontré que la conception détermine près de 80% des coûts qui seront associés à la fabrication et à l'assemblage (Pullan, Bhasi et Madhu, 2010), d'où l'importance d'intégrer cet aspect très tôt dans l'élaboration du concept.

De façon très générale, ces coûts peuvent être scindés en deux catégories: les coûts fixes reliés au matériel, à la main d'œuvre, à l'outillage, etc. ; et les coûts variables, principalement dus aux composants rejetés ou retouchés, et qui dépendent généralement des tolérances exigées et de la variation des procédés de fabrication et d'assemblage (Singh, Jain et Jain, 2009). En contexte de CE, l'idée est d'éliminer les coûts variables en élaborant un concept qui tient compte de la variation inhérente aux procédés. En d'autres termes, il s'agit de définir des tolérances qui assurent l'assemblage et les requis fonctionnels des composants (comme l'interchangeabilité, les performances, la durée de vie, l'esthétique, etc.) et dont la fabrication s'effectue facilement selon les moyens disponibles de production. Cette philosophie est aujourd'hui reconnue sous la populaire bannière de *Design For Manufacturing and Assembly*

¹ De l'anglais: *Concurrent Engineering*

² De l'anglais: *Design Review*

(DFMA). Ainsi, pour un concepteur qui effectue la synthèse de tolérances d'un assemblage mécanique, il devient essentiel de tenir compte simultanément (i) du requis fonctionnel nécessaire pour garantir l'assemblage et (ii) de la capabilité des procédés de fabrication à garantir un certain niveau de précision et de répétabilité. Cette connexion entre requis (conception) et capabilité (méthodes) est une facette fondamentale du DFMA.

Pour y parvenir, des outils tels que le tolérancement géométrique et dimensionnel (GD&T) (ASME Y14.5, 2009), le tolérancement statistique (Cox, 1986), le contrôle statistique des procédés (Montgomery, 2007) et les indices de capabilité (C_p , C_{pk} , C_{pm} , etc.) (ISO 22514, 2007; Wu, Pearn et Kotz, 2009) sont employés pour la gestion des variations géométriques et dimensionnelles d'un produit. Ces outils, qui sont très communs dans l'industrie, permettent de contrôler la qualité des pièces, d'évaluer le comportement réel des procédés, d'exprimer des intervalles de confiance sur les capabilités des procédés de fabrication et d'effectuer une synthèse (distribution) optimale des tolérances. Bref, ils permettent de créer un lien efficace entre le requis du produit (conception – *quoi?*) et les contraintes de la fabrication (méthodes – *comment?*). Pour exploiter le plein potentiel de ces outils, un concepteur doit connaître une estimation valable de la capabilité d'un procédé à rencontrer les requis dès le stade de conception. Avec les contraintes grandissantes dans le processus de développement des nouveaux produits (ex. la réduction du temps de développement et la globalisation des marchés), cette estimation précoce de la capabilité des procédés devient un défi de taille et une contrainte majeure au développement d'un produit compétitif.

Ce mémoire de maîtrise, réalisé en partenariat avec l'entreprise Nova Bus, s'adresse spécifiquement à cette problématique. Fabricant d'autobus de transport urbain, l'entreprise Nova Bus est confrontée à un marché de plus en plus exigeant. Elle se doit de développer un produit flexible (différents modèles et différents accessoires), de qualité irréprochable, dans un délai de plus en plus court tout en respectant des contraintes monétaires exercées par les économies de pays émergeant (Mexique, Brésil, Colombie, etc.).

Ainsi, dans l'objectif de réduire considérablement le temps de développement du produit et d'augmenter la cadence de production tout en maintenant un niveau de qualité satisfaisant, le partenaire industriel (PI) applique depuis quelques années des outils comme le GD&T, le tolérancement statistique et les IC. Dans un esprit d'amélioration continue, le PI introduit graduellement les principes de la DFMA à son processus de développement de nouveau produit. Comme aspect fondamental et qui s'inscrit dans ce processus, les ingénieurs responsables du développement doivent être en mesure d'estimer rapidement la capacité du procédé d'assemblage mécano soudé de la structure de l'autocar et de considérer cette capacité comme une première itération lors du tolérancement de nouveaux composants. Une estimation précise permet des gains substantiels. Par contre, une mauvaise estimation entraîne inévitablement un processus itératif de révisions et d'adaptations qui a pour conséquence l'étirement du temps de développement et la baisse inéluctable de la compétitivité de l'entreprise.

Le PI ayant accès à des données d'inspection de composants fabriqués antérieurement, que ce soit à l'interne ou par l'intermédiaire de son réseau de fournisseurs, cette source d'informations est la clé qui permet d'estimer la capacité d'un procédé. Aujourd'hui, avec les dispositifs d'inspection modernes, ces données sont facilement récupérables, et ce, en très grande quantité. Malheureusement, elles sont la plupart du temps mises de côté. Dans le cadre de ce projet de recherche, nous explorons la possibilité d'utiliser ces données pour estimer, non pas la capacité d'un composant déjà fabriqué, mais la capacité d'un nouveau composant doté d'une nouvelle géométrie et qui est au stade de la conception. Nous croyons que cela constitue les prémisses d'un projet de recherche d'envergure visant le développement de systèmes permettant aux concepteurs d'utiliser les données historiques d'un procédé de fabrication.

Le document s'organise en sept chapitres. Au Chapitre 1, la problématique industrielle et les objectifs de la recherche sont détaillés. Un concept important qui est utilisé tout au long du mémoire y est également présenté, celui de complexité géométrique. Au Chapitre 2, une succincte revue littéraire des différents moyens d'estimer la capacité d'un procédé est

présentée. Une section de ce chapitre porte spécifiquement sur les quelques définitions de la complexité géométrique déjà proposées par la communauté scientifique.

Les Chapitres 3 à 7 englobent le cœur du travail. Au Chapitre 3, nous détaillons un processus d'assurance qualité, appliqué en contexte de CE et illustrons où s'inscrit la méthode proposée au sein de ce processus. Ce chapitre permet principalement de visualiser les avantages que procure la méthode proposée. Le Chapitre 4 est consacré au développement d'un indice qui permet d'évaluer la complexité géométrique des composants. Nous illustrons en quoi cet indice est indicatif de la capabilité d'un procédé. Le Chapitre 5 est quant à lui consacré au développement mathématique du modèle. Pour terminer, les Chapitres 6 et 7 permettent de valider la méthode proposée.

La Figure 0-1 illustre schématiquement le déroulement de ce mémoire.

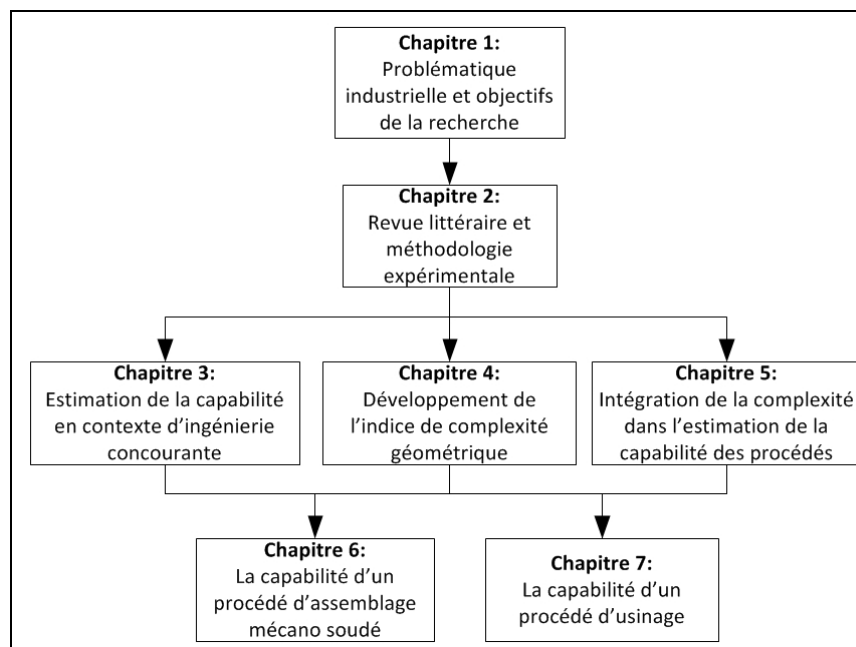


Figure 0-1 Déroulement du mémoire.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Historiquement, un des premiers outils à être utilisé qui permet de faire un lien efficace entre ingénierie et méthodes sont les chartes de limites standards de procédé. Depuis l'apparition de la norme ANSI B4.1, publiée pour la première fois en 1955 (ANSI B4.1, 1955), les concepteurs sont en mesure de sélectionner une tolérance dimensionnelle optimale en fonction du procédé de fabrication disponible (méthodes) et de l'ajustement voulu entre un arbre et son alésage (ingénierie). Le principe de ces chartes, c'est-à-dire modéliser l'effet du changement de dimension d'un élément de taille sur la capacité d'un procédé, a depuis été repris par plusieurs auteurs et pour différents types de composants ou de procédé de fabrication. La Figure 1-1 illustre des exemples de chartes tirés de Swift et Booker (1996).

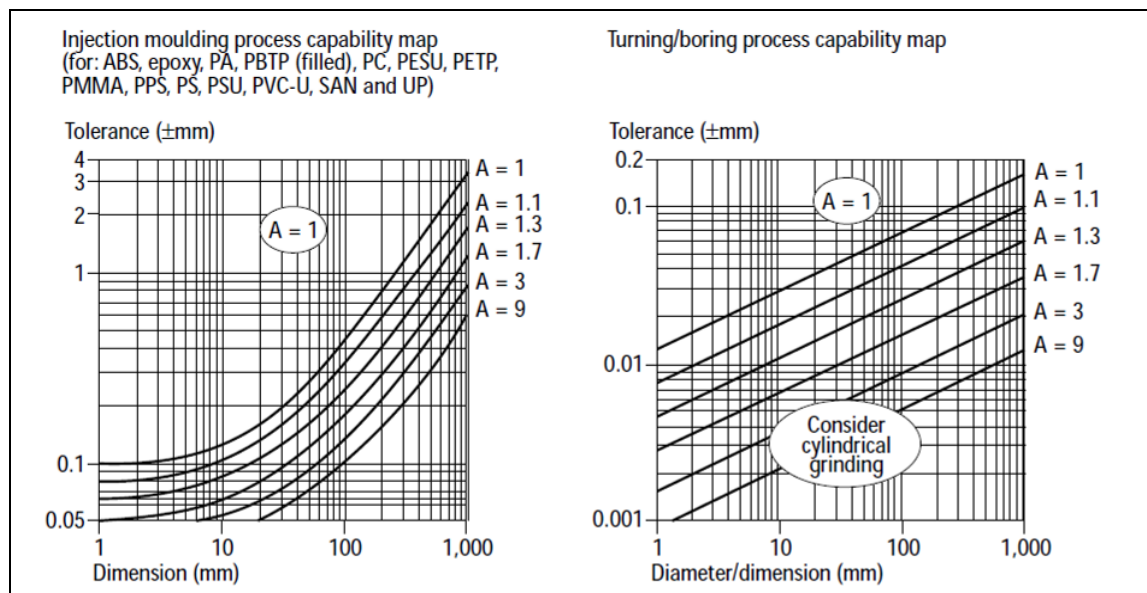


Figure 1-1 Exemple de chartes de tolérancement. Tiré de Swift et Booker (1996).

Aujourd'hui, avec le GD&T, les concepteurs sont en mesure de contrôler les variations géométriques en plus des variations dimensionnelles d'un composant. Or, il n'existe pas à notre connaissance de formulation claire qui permet d'estimer l'effet d'un changement de

géométrie sur la capabilité d'un procédé. Pour contrer ce manque et parvenir à allouer des tolérances manufacturables à moindre coût (tolérances dites «faisables» «ou atteignables» sans effort particulier), une étude préliminaire et empirique est nécessaire. En effet, avec la norme ISO 22514 (2007), un industriel est aujourd'hui en mesure d'évaluer le comportement réel d'un procédé et d'exprimer un intervalle de confiance sur sa capabilité selon un risque prédéterminé (ex. 0.27% d'erreur qui correspond à l'intervalle de 99.73% de probabilité). Dans un contexte de CE, ce type d'étude s'effectue de façon simultanée avec la conception du produit et s'intègre à un processus robuste d'assurance qualité, connue dans le domaine automobile sous l'appellation d'*Advanced Product Quality Planning* (APQP, AIAG).

Suite à la réalisation de cette étude empirique, la capabilité d'un procédé à fabriquer un certain type de composant ou de géométrie peut être conservée en base de données et utilisée lors du développement de nouveaux produits. Ainsi, lorsqu'un nouveau composant est de la même géométrie ou d'une géométrie relativement similaire, l'intervalle probabiliste à l'intérieur duquel le procédé est capable de respecter une spécification peut être transposé en tolérance optimale dès le stade de conception (Delaney et Phelan, 2009; Whitney, 2004). La Figure 1-2 illustre ce principe bien connu.

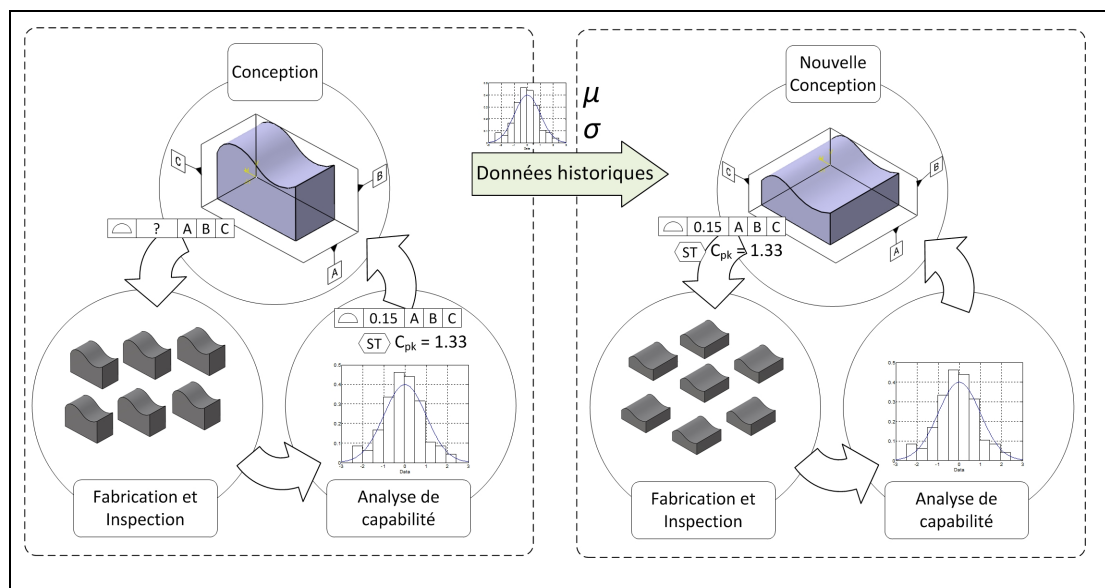


Figure 1-2 Processus de DFMA pour des géométries similaires.

Le problème survient quand les nouveaux composants ont des géométries significativement différentes et qu'ils sont fabriqués par le même procédé. En effet, pour un composant à géométrie plus complexe (Figure 1-3), l'intervalle 99.73% obtenu pour un composant à géométrie simple ne peut être utilisé puisque dans ce cas la géométrie du nouveau composant affecte la capabilité du procédé de fabrication (Barari, ElMaraghy et ElMaraghy, 2009; Korosec, Balic et Kopac, 2005). Par exemple, un centre d'usinage peut être très capable de respecter une tolérance de l'ordre de 0.2 mm pour un composant à géométrie simple, mais incapable dans le cas d'un composant à géométrie complexe.

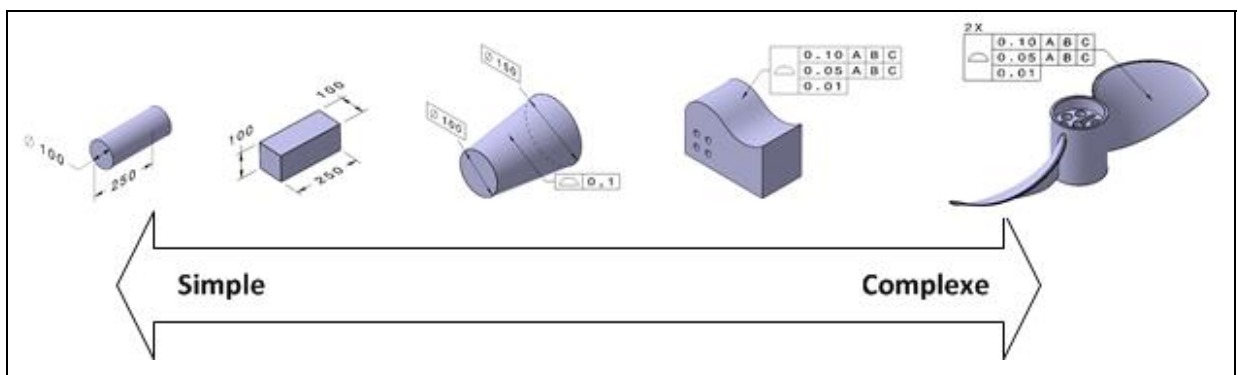


Figure 1-3 Complexité des éléments.

Dans cette optique, de nombreuses recherches sont actuellement consacrées au développement de système (réseaux de neurones et logique floue (Korosec, Balic et Kopac, 2005), algorithme génétique (Ji et al., 2000), CAD-based systems (Kerbrat, Mognol et Hascoet, 2010), etc.) qui permettrait aux concepteurs d'intégrer l'effet du changement de géométrie sur une capabilité de procédé déjà historiquement connue. Malheureusement, une infime proportion d'industriels peuvent se permettre d'utiliser ce type de système vu les investissements importants en ressources spécialisées. Pour la grande majorité, estimer la capabilité d'un procédé (où la fabricabilité d'un composant, selon le point de vue) demeure un processus itératif basé sur la connaissance du procédé de fabrication. Généralement, pour chaque nouvelle pièce, une nouvelle étude préliminaire et empirique est de mise.

Récemment, Tahan et Levesque (2009) ont proposé un modèle pour estimer la capabilité d'un procédé à rencontrer un requis géométrique de position (j) appliqué sur un patron de trous. Le modèle a également été repris et amélioré par Tahan et Cauvier (2012) en y intégrant la condition de matière des éléments³. L'originalité de ce modèle réside dans sa capacité à intégrer les caractéristiques statistiques du procédé (c.-à-d. une capabilité déjà historiquement connue) et le nombre n d'éléments faisant partie du patron des trous. Par exemple, pour un procédé de perçage, la capabilité de ce dernier à positionner un trou ($n=1$) n'est pas la même que pour le positionnement d'un patron à deux ($n=2$), trois ($n=3$) ou n trous (Figure 1-4). Avec ce modèle, l'expression de la capabilité du procédé devient une fonction de plusieurs variables, soit les caractéristiques statistiques du procédé (moyenne, variance) et la complexité géométrique de l'élément à produire (dans ce cas spécifique, c'est le nombre de trous n). Cette nouvelle définition de la capabilité d'un procédé permet d'estimer de façon simple, dès le stade de conception et sans nouvelle étude préliminaire, une tolérance géométrique optimale à appliquer sur une nouvelle géométrie.

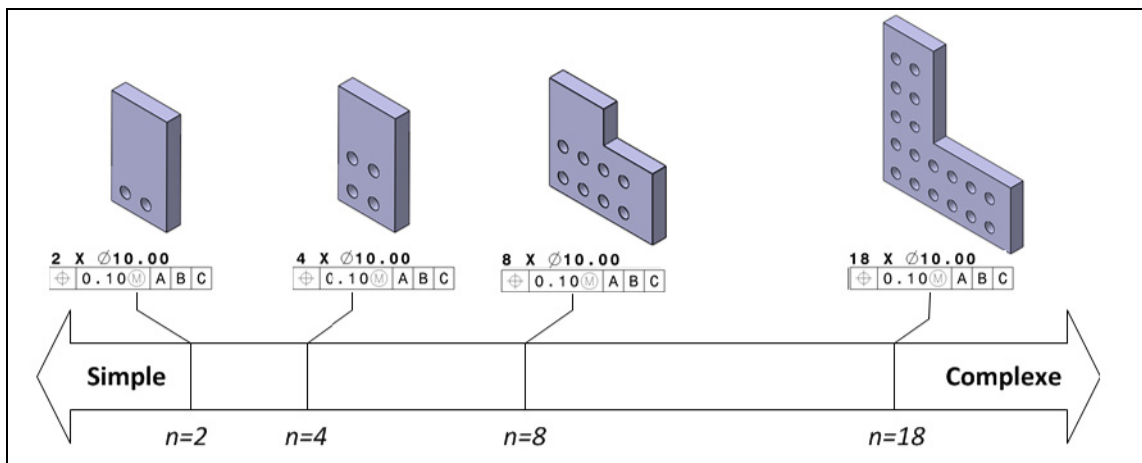


Figure 1-4 Complexité des patrons de trou.

En ce sens, il devient très intéressant d'évaluer la complexité des éléments pour extrapoler une capabilité déjà historiquement connue (c'est à dire l'intervalle 99.73% d'une géométrie

³ Maximum Material Condition (MMC) et Least Material Condition (LMC)

simple) vers de nouvelles capacités pour des pièces à géométries différentes. Dans l'exemple précédent, l'indice de complexité (c.-à-d. le nombre de trous n qui compose le patron) se compile aisément. Par contre, pour d'autres types d'éléments tels que les profils de surface (a), la définition et le décompte de la complexité est une problématique actuellement ouverte (He, Chen et Zhao, 2011; Kerbrat, Mognol et Hascoet, 2010).

1.1 Objectifs de la recherche

Le PI étant confronté régulièrement à la conception de nouveaux produits et donc à la problématique tout juste exposée, l'objectif très général de ce mémoire est de développer un outil qui aide l'entreprise à concevoir des produits facilement manufacturables. Les capacités de procédés n'étant que très peu analysées lors de la phase de conception, la cadence de production se retrouve limitée par de multiples opérations secondaires (coupage, perçage, ajustement, retouches, etc.) effectuées en station ou en fin de ligne pour pallier à la faible capacité de certains procédés à rencontrer les requis d'ingénierie. Ceci est entre autres observable lors de l'assemblage de la structure de l'autocar. Effectué à l'usine de Saint-François-du-Lac (SFDL), l'assemblage mécano soudé des structures d'autocars est un procédé complexe doté de multiples sources de variations (variations dues à la fabrication des composants, à leur assemblage en gabarit, aux phénomènes de distorsion et de retrait causés par le soudage, etc.) et limité en terme de capacité. Il devient donc primordial que l'ingénierie, basée à l'usine de St-Eustache (STE), considère cette capacité lors du développement de produit.

Vu le contexte dans lequel évolue le PI (conception de différents modèles et différents accessoires), les composants peuvent être appelés à changer de géométrie tout en étant fabriqués par le même procédé. Afin d'éviter une nouvelle étude empirique, les concepteurs doivent être en mesure, à partir de données historiques d'un procédé de fabrication, d'estimer rapidement de nouvelles tolérances selon la géométrie du composant à produire. Vu la forte utilisation de la tolérance géométrique de profil (a) par l'équipe d'ingénierie du PI et l'intérêt en recherche pour ce type de tolérance, tel qu'illustré précédemment, nous concentrerons nos efforts sur cette dernière.

Ainsi, comme contribution importante à la recherche, ce mémoire de maîtrise vise le développement d'une méthode de synthèse simple et efficace qui, lors du développement d'un nouveau produit, guide les concepteurs dans l'allocation des tolérances de profil telles que définies par la norme ASME Y14.5 (2009). Cette méthode doit permettre d'exprimer la capabilité en fonction des caractéristiques statistiques d'un procédé et de la géométrie des composants à produire. De façon plus explicite, le modèle doit permettre d'extrapoler une capabilité (capabilité d'un profil simple vers des profils plus complexes) et d'interpoler une capabilité (capabilité d'un profil complexe vers des profils plus simples).

Pour y parvenir, deux (2) problématiques importantes doivent être résolues:

- Comment peut-on exprimer la complexité géométrique d'une surface à travers un indice (un scalaire) dans le but de l'utiliser comme un intrant dans l'estimation de la capabilité?
- Comment peut-on utiliser conjointement l'indice représentatif de la complexité géométrique et les caractéristiques statistiques d'un procédé (telles que l'espérance et la variance) dans l'estimation de la capabilité d'un nouveau composant à respecter une tolérance géométrique de profil?

La réalisation du projet fait donc appel à des connaissances multidisciplinaires telles que la conception mécanique, la métrologie, le contrôle de la qualité et les statistiques appliquées. Les solutions proposées devront être facilement applicables au contexte industriel de Nova Bus. Des études de cas réalisées à partir de données recueillies *in situ* permettront de valider cet aspect important du mémoire.

CHAPITRE 2

REVUE LITTÉRAIRE ET MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

En introduction à ce chapitre, et étant donné la variété des sujets qui seront abordés, un sommaire de l'état de l'art des différents domaines du génie concernés est présenté. L'objectif est d'introduire le lecteur (ou de mettre à jour l'état des connaissances) sur les différents concepts qui procurent une meilleure compréhension des chapitres qui suivent. La revue de littérature s'organise en trois sections. La première aborde le domaine du contrôle de la qualité, plus précisément, elle aborde la définition et l'estimation de la capabilité des procédés. La seconde présente une revue des mesures de la complexité telles que proposées par la communauté scientifique. Finalement, la dernière section aborde le contrôle géométrique et dimensionnel des surfaces libres⁴. Cette dernière section porte entre autres sur les différents types de tolérances géométriques de profil tels que définis par la norme ASME Y14.5 (2009). Pour conclure, nous terminons le chapitre par une exposition détaillée de la méthodologie expérimentale adoptée ainsi que les principales hypothèses retenues pour l'accomplissement de nos travaux.

2.1 La capabilité des procédés

Fondamentalement, le contrôle statistique des procédés permet de stabiliser et de maintenir le comportement d'un processus qui est de nature aléatoire (Montgomery, 2007). Lorsqu'un élément géométrique primitif⁵ (ex: le diamètre d'un élément cylindrique) est produit par un procédé qualifié de stable (c.-à-d. ergodique), son comportement devient prévisible et se décrit alors par sa distribution de densité de probabilité (PDF), une mesure de tendance centrale (ex. la moyenne μ) et une mesure de dispersion (ex. l'écart-type σ). En

⁴ Surface libre est le terme retenu pour désigner une surface quelconque (de l'anglais *freeform*)

⁵ En anglais, le terme «*feature*» est employé pour désigner une entité géométrique

prédéterminant un risque jugé acceptable, ces caractéristiques du procédé permettent de calculer un intervalle de confiance dans lequel l'élément fabriqué est maintenu. Cet intervalle témoigne de ce que le procédé peut respecter, donc de sa capacité à rencontrer des exigences (tolérances).

Ainsi, lorsqu'un requis fonctionnel est associé à l'élément fabriqué (ex: $\varnothing 100 \pm 0.2\text{mm}$), les caractéristiques statistiques du procédé permettent d'estimer la probabilité de produire des pièces non conformes. Selon la norme ISO 22514 (2007), cette probabilité s'interprète comme étant l'aptitude du procédé à rencontrer un requis dimensionnelle ou géométrique comportant une valeur cible (T), une limite de tolérance inférieure (LTI) et/ou une limite de tolérance supérieure (LTS). Cette aptitude du procédé peut également s'exprimer sous la forme d'un parti par million (PPM) ou par un indice adimensionnel qu'on nomme généralement «indice de capacité» (IC).

2.1.1 Les indices de capacité

Comme le souligne Wu *et al.* (2009), le principe de base derrière les IC est de comparer ce que le procédé *doit* respecter à ce qu'il *peut* respecter. En faisant le ratio entre l'intervalle de tolérance (requis d'ingénierie) et la capacité du procédé, on obtient un scalaire adimensionnel très commode pour un usage normalisé. Ainsi, ce scalaire procure une information rapidement interprétable, à savoir si la variation du procédé (l'intervalle 6σ dans le cas d'une distribution normale) est inférieure, égale ou supérieure à l'intervalle de tolérances. Ce scalaire est reconnu comme l'indice de capacité C_p :

$$\hat{C}_p = \frac{LTS - LTI}{6\hat{\sigma}} \quad (2.1)$$

L'inconvénient de cet indice est qu'il ne permet pas de vérifier si la distribution (PDF) du procédé est à l'intérieur des limites de spécifications. Pour effectuer cette vérification, les

distances entre la tendance centrale du procédé et les limites de tolérances sont évaluées et normalisées par rapport à la moitié de la capacité du procédé. Les indices C_{pl} et C_{pu} correspondent respectivement à l'aptitude du procédé à rencontrer les limites de tolérances inférieure et supérieure:

$$\hat{C}_{pl} = \frac{\hat{\mu} - LTI}{3\hat{\sigma}} \quad (2.2)$$

$$\hat{C}_{pu} = \frac{LTS - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}} \quad (2.3)$$

La valeur minimum de C_{pl} et C_{pu} est reconnue comme l'indice C_{pk} :

$$\hat{C}_{pk} = \min\left(\frac{\hat{\mu} - LTI}{3\hat{\sigma}}, \frac{LTS - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}\right) \quad (2.4)$$

Une autre formulation équivalente fait intervenir la valeur cible T directement (Wu, Pearn et Kotz, 2009):

$$\hat{C}_{pk} = \frac{(LTS - LTI)}{6\hat{\sigma}} - \frac{|\hat{\mu} - T|}{3\hat{\sigma}} \quad (2.5)$$

Comme autre IC utilisé dans l'industrie, l'indice C_{pm} se base sur le principe développé par Taguchi qui stipule qu'un procédé a intérêt à être sur la valeur cible avec un minimum de variation (Wu, 2012). L'indice s'obtient par le ratio entre l'intervalle de tolérances et l'intervalle qui couvre 99.73% des déviations de la valeur cible T produites par le procédé:

$$\hat{C}_{pm} = \frac{(LTS - LTI)}{6\sqrt{E(X - T)^2}} = \frac{(LTS - LTI)}{6\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\hat{\mu} - T)^2}} \quad (2.6)$$

L'indice C_{pm} est étroitement lié au concept du tolérancement inertiel développé par Pillet (2004). Ce dernier a introduit la notion «*d'inertie*» d'un procédé (I) en considérant la somme

vectorielle entre le niveau de variance du procédé et de son écart moyen par rapport à la valeur cible:

$$I = \left(\sigma^2 + (\mu - T)^2 \right)^{0.5} \quad (2.7)$$

Dans le cas où le procédé est statistiquement instable (Figure 2-1), on peut estimer les indices de performance P_p, p_l, p_u, \dots . Ces derniers se calculent de la même manière que les précédents, mais en utilisant un estimateur différent pour la variance.

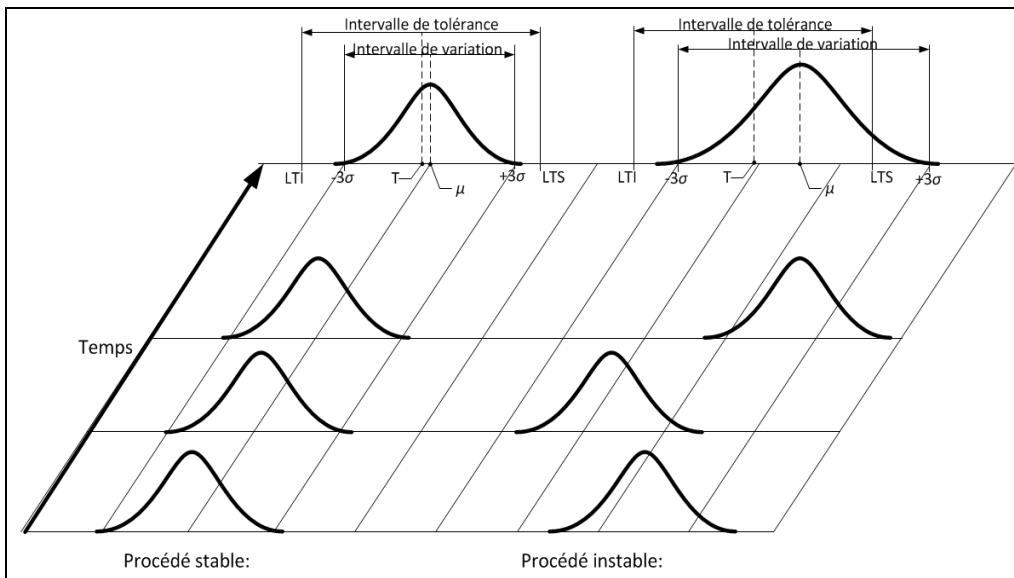


Figure 2-1 Comportement d'un procédé de fabrication.
Adapté de (ISO 22514, 2007).

Au sens strict, les équations (2.1) à (2.6) ne sont valides que lorsque le procédé suit une PDF gaussienne. Une formulation plus générale permet d'appliquer le calcul à tout type de comportement, qu'il soit bilatéral ou unilatéral tel qu'illustré à la Figure 2-2 (Bothe, 2006; Chrysler Corporation, 2005; ISO 22514, 2007). Avec cette forme, l'intervalle de variation et la tendance centrale s'expriment respectivement par les percentiles 0.00135 ($x_{0.135\%}$), 0.5 ($x_{50\%}$) et 0.99865 ($x_{99.865\%}$) de la fonction de densité du procédé.

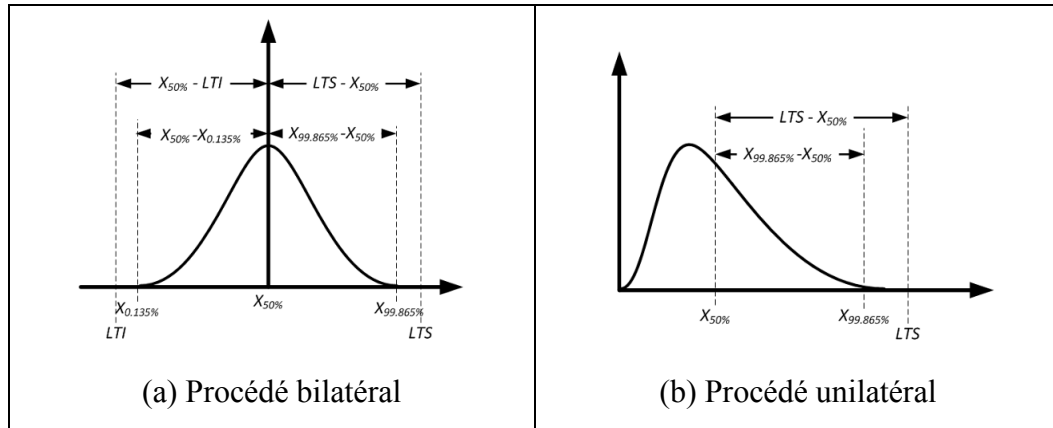


Figure 2-2 (a) Procédé bilatéral (b) Procédé unilatéral. Adapté de Bothe (2006).

Pour un procédé unilatéral ayant une limite de tolérance supérieure (ce qui est le cas de la majorité des tolérances géométriques), C_p et C_{pk} sont estimés par les équations suivantes:

$$\hat{C}_p = \frac{LTS - LTI}{\hat{x}_{99.865\%} - \hat{x}_{0.135\%}} \quad (2.8)$$

$$\hat{C}_{pk} = \frac{LTS - \hat{x}_{50\%}}{\hat{x}_{99.865\%} - \hat{x}_{50\%}} \quad (2.9)$$

Indépendamment de la formulation et de l'indice utilisée, un procédé sera jugé incapable lorsque l'indice de capabilité est inférieur à 1.0 ($C_{p,pl,pu,\dots} < 1.0$), capable lorsque l'indice est entre 1.0 et 1.33 égale à 1 ($1.0 \leq C_{p,pl,pu,\dots} \leq 1.33$), et finalement comme très capable lorsque l'indice est supérieur à 1.33 ($C_{p,pl,pu,\dots} > 1.33$) (Montgomery, 2007). D'autres types d'indice de capabilité ont également été développés (ex. C_a , C_{pmk} , etc.). Cependant, vu que notre intérêt dans ce mémoire porte exclusivement sur la capabilité d'un procédé à respecter une tolérance géométrique de profil et que les principaux indices utilisés par le partenaire industriel sont les indices C_p et C_{pk} , les autres types d'indice ne seront pas détaillés dans cette revue littéraire. Le lecteur est référé à l'article de Wu, Pearn et Kotz (2009) pour une revue plus exhaustive des différents indices de capabilité.

2.1.2 Les indices de capacité multivariables

En utilisant les caractéristiques statistiques d'un procédé (position, dispersion), les indices de capacité présentés à la section 2.1.1 permettent d'évaluer l'aptitude du procédé à respecter une spécification d'ingénierie. Dans un cas plus général, plusieurs spécifications peuvent être appliquées simultanément sur un même élément, et ce, de manière indépendante (ex. : hauteur *et* largeur d'un bloc) ou dépendante (ex. : diamètre *et* position avec condition de matière d'un élément cylindrique). L'aptitude du procédé à respecter plusieurs spécifications s'exprime alors par un indice de capacité multivariables (Pearn, Wang et Yen, 2007). La difficulté du contexte multivariables est qu'il n'y a pas à ce jour de consensus⁶ sur la manière exacte à adopter pour estimer un indice de capacité, et ce, même en généralisant le principe de base de l'analyse à une seule variable (Wang, 2000; Wu, Pearn et Kotz, 2009). En généralisant vers le contexte multivariables (MC_p), le fondement qui est de comparer spécification et variation du procédé demeure le même, à la différence que l'on compare des domaines dans un hyperespace (domaine de tolérance et domaine de variation) (Figure 2-3) au lieu d'intervalles (intervalle de tolérance et intervalle de variation).

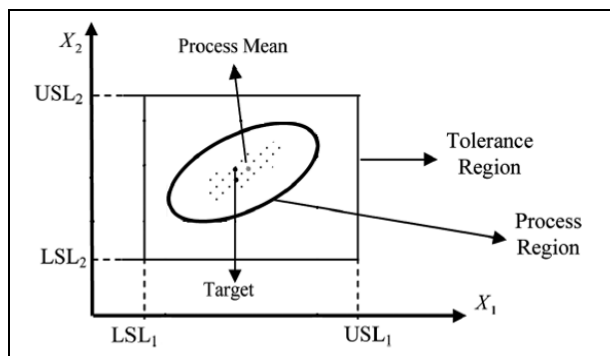


Figure 2-3 Domaine des tolérances - variations. Tiré de Niavarani *et al.*(2012).

⁶ Lors de la rédaction de ce mémoire, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) était au développement d'une norme encadrant l'estimation des indices de capacité pour les caractéristiques ayant une distribution normale multivariée (ISO 22514-6).

Plusieurs méthodes ont été proposées par les chercheurs pour évaluer le volume des domaines de tolérance et de variation. À titre illustratif, prenons comme exemple le cas d'un élément doté de deux requis fonctionnels indépendants qui suivent une distribution multivariée normale. Selon Shahriari et Abdollahzadeh (2009), l'indice MC_p s'obtient par le ratio entre l'aire de la zone rectangulaire définie par les limites de tolérances LTI_1 , LTS_1 , LTI_2 , LTS_2 et l'aire de la zone rectangulaire de même orientation et qui regroupe 99.73% des données. Inversement, Taam, Subbaiah et Liddy (1993) proposent de calculer l'indice MC_p par le ratio entre l'aire de la plus grande ellipse inscrite à l'intérieur des limites de tolérances et l'aire de l'ellipse qui regroupe 99.73% des données. La Figure 2-4 illustre ces méthodes en plus de la méthode proposée par Niavarani, Noorossana et Abbasi (2012).

Également, dans le cas multidimensionnel, évaluer la capacité du procédé à atteindre une valeur cible est beaucoup plus complexe que dans l'analyse à une seule variable. Pour illustrer le concept simplement, il s'agit de mesurer la distance entre le centroïde du domaine de tolérance et le centroïde du domaine de variation. Pour un exemple de ce type d'indice de capacité, le lecteur est référé à Taam, Subbaiah et Liddy (1993). Ces auteurs proposent une généralisation de l'indice de capacité C_{pm} vers le domaine multivariable.

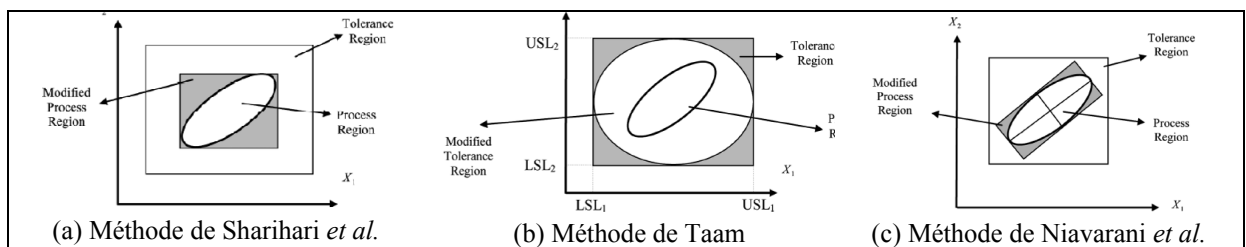


Figure 2-4 Différentes définitions des domaines de tolérance et de variation.
Tiré de Niavarani, Noorossana et Abbasi (2012).

Plus récemment, des travaux de recherche ont permis d'étendre l'analyse de capacité multivariées avec domaine de conformité préétablie et fixe, vers des cas où le domaine de conformité est variable. Suite à l'introduction du concept de domaine défaillance⁷ par Skinner

⁷ De l'anglais *In specification failure zone*

et al. (2002) , Mannar et Ceglarek (2009) ont proposé de calculer des indices de capabilité (FC_p et FC_{pk}) en soustrayant ce nouveau domaine du domaine de conformité original (Figure 2-5).

Dans le même registre, Tahan et Cauvier (2012) ont développé un modèle original capable de tenir compte de la dépendance entre 2 requis basé sur l'utilisation de l'indice de Hasofer-Lind. Cette situation survient généralement lorsqu'un requis de positionnement (ou d'orientation) est accompagné d'une condition de matière (MMC ou LMC) (Figure 2-6). En appliquant le modèle au positionnement de patron de trous, les auteurs ont intégré une troisième variable qui influence la capabilité du procédé étudié, soit le nombre de trous qui compose le patron. Cette facette du modèle ayant été originalement développée par Tahan et Levesque (2009), le nombre de trous s'interprète dans ce cas spécifique comme un indice de complexité de l'élément à produire et sera plus détaillé à la section suivante.

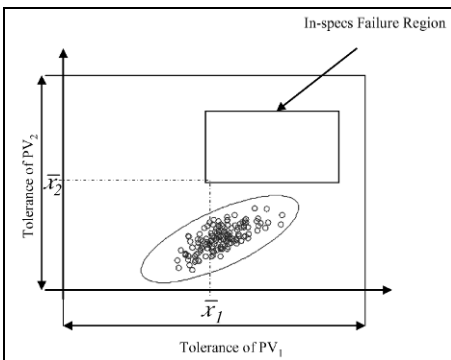


Figure 2-5 Domaine conforme de défaillance. Tiré de Mannar et Ceglarek (2009).

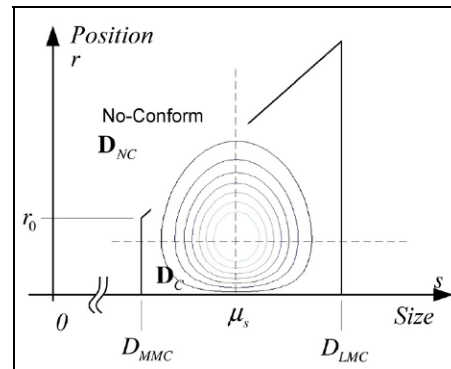


Figure 2-6 Domaine de conformité formé de requis dépendants. Tiré de Tahan et Cauvier (2012).

2.2 La complexité géométrique

Comme il a été mentionné au CHAPITRE 1, plusieurs efforts de recherches sont actuellement déployés pour établir une métrique permettant de quantifier la complexité. La particularité (et la difficulté) est que, selon le domaine étudié (conception, fabrication, analyse économique, outillage nécessaire, etc.), différentes définitions peuvent être adoptées.

Ce manque d'uniformité est principalement dû au fait que le concept de complexité est une question de perspective (ElMaraghy et al., 2012; Manson, 2001) et il en résulte que le nombre de mesures proposées dans la littérature est impressionnant, sans compter les différentes utilisations associées à chacune d'elles. À titre illustratif, Colwell (2005) a recensé près de trente définitions de la complexité.

Par exemple, dans le domaine de la fabrication de profilés extrudés, il est reconnu que la pression d'extrusion dépend de la complexité géométrique de la section à extruder. La définition adoptée dans ce domaine est que la complexité géométrique d'un profil correspond au ratio de la pression nécessaire pour extruder ce dernier et de la pression d'un profilé de référence, c'est-à-dire une section circulaire d'aire équivalente⁸. Or, selon Qamar, Arif et Sheikh (2004), la complexité devrait s'évaluer en fonction de la géométrie uniquement. Ainsi, dans le but d'estimer rapidement la pression nécessaire pour extruder des profils de différentes géométries, les auteurs proposent d'estimer la complexité C par une fonction du ratio des périmètres du profilé complexe P_s et du profilé de référence P_0 :

$$C = \alpha + \beta \left(\frac{P_s}{P_0} \right)^\gamma \quad (2.10)$$

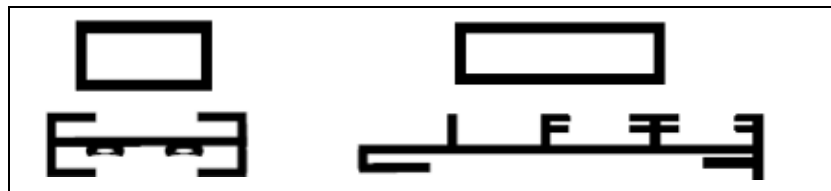


Figure 2-7 Exemples de sections typiques de profilés extrudés. Tiré de (Qamar, Arif et Sheikh, 2004).

Pour que cet indice de complexité devienne représentatif de la définition adoptée par cette industrie, les constantes, α , β et γ ont été ajustées à des données expérimentales obtenues suite à l'extrusion de près d'une trentaine de profils de complexités différentes.

⁸ Une formule analytique est utilisée pour estimer la pression nécessaire à l'extrusion d'un profilé circulaire.

Pour un deuxième exemple, nous examinons le domaine de la fonderie. Pour ce cas, le concept de complexité géométrique est très différent du précédent. Selon Joshi et Ravi (2010), la complexité géométrique des pièces obtenues par fonderie affecte significativement le coût de l'outillage nécessaire à la production de ce type de pièce. De cette observation, les auteurs ont déterminé 6 facteurs géométriques qui affectent *a priori* le coût de l'outillage. Ces facteurs sont identifiés comme: le ratio du volume de la pièce C_{PR} (ratio du volume de la pièce et du volume de la plus petite boîte qui contient la pièce), le ratio de l'aire de la pièce C_{AR} (ratio de l'aire de surface de la pièce et de l'aire de la sphère de volume équivalent), le nombre de cavités C_{NC} , le ratio du volume des cavités C_{CR} (ratio du volume des cavités et du volume de la plus petite boîte qui contient la pièce), le ratio des épaisseurs C_{TR} (ratio de l'épaisseur minimum et maximum de la pièce) et le ratio du retrait C_{DR} . Les auteurs ont proposé une métrique pour la complexité en effectuant tout simplement la somme pondérée de ces facteurs:

$$C = \omega_0 + \omega_1 C_{PR} + \omega_2 C_{AR} + \omega_3 C_{NC} + \omega_4 C_{CR} + \omega_5 C_{TR} + \omega_6 C_{DR} \quad (2.11)$$

De façon similaire à l'application précédente, les constantes ω_i ont été déterminées par modélisation empirique sur des pièces de fonderies typiques (Figure 2-8).

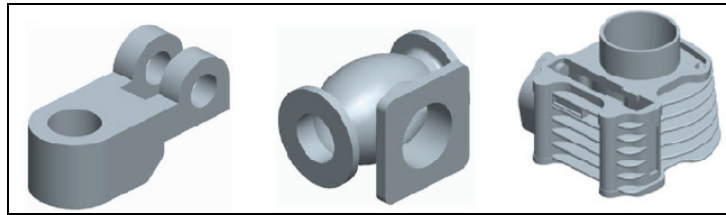


Figure 2-8 Exemples de pièces de fonderies typiques.
Tiré de Joshi et Ravi (2010).

En comparant les deux exemples précédents, et malgré que les auteurs aient dans les deux cas fait référence à la notion de complexité géométrique de forme⁹, il nous apparaît évident qu'il ne serait pas possible d'utiliser le même indice de complexité dans les deux études. Les différences au point de vue de la nature des procédés de fabrication (méthodes de fabrication, sources de variations, etc.) et de l'utilisation de la métrique (estimation d'un paramètre de fabrication, c'est-à-dire la pression d'extrusion comparativement à l'estimation d'un coût de fabrication) font en sorte que la perspective sur le concept de complexité est foncièrement différente.

Dans d'autres cas, certains chercheurs utilisent le concept de complexité pour mesurer le «niveau de similarité» entre différentes géométries (Backes et al., 2010). L'idée est de regrouper les éléments qui sont semblables du point de vue de la taille, de la forme et du niveau de détails. En conception et fabrication mécanique, ce regroupement peut par exemple être utilisé pour rechercher des pièces dont le procédé de fabrication est similaire ou pour permettre aux concepteurs de réutiliser des maquettes numériques (CAD) déjà existantes comme point de départ d'une nouvelle conception (Cardone, Gupta et Karnik, 2003). Une des méthodes fréquemment proposées dans la littérature et qui permet de regrouper des géométries de complexité équivalente est issue du concept de la distribution statistique de forme (Osada et al., 2002; Xiao et Yang, 2010). Le principe consiste à calculer et échantillonner une mesure préétablie (angle entre deux (2) vecteurs, distances euclidiennes entre deux (2) points, aire d'un triangle, etc.) obtenue à partir de points projetés aléatoirement sur une géométrie. La distribution statistique obtenue après échantillonnage s'interprète ensuite comme la signature de la forme étudiée (Figure 2-9). Finalement, pour mesurer la similarité entre plusieurs géométries, les distributions statistiques sont comparées entre elles par un test d'adéquation (ex. Kolmogorov-Smirnov) ou par une mesure de distance (norme L_2 , L_n , etc.) (Cardone, Gupta et Karnik, 2003).

⁹ En anglais: *Shape Complexity*

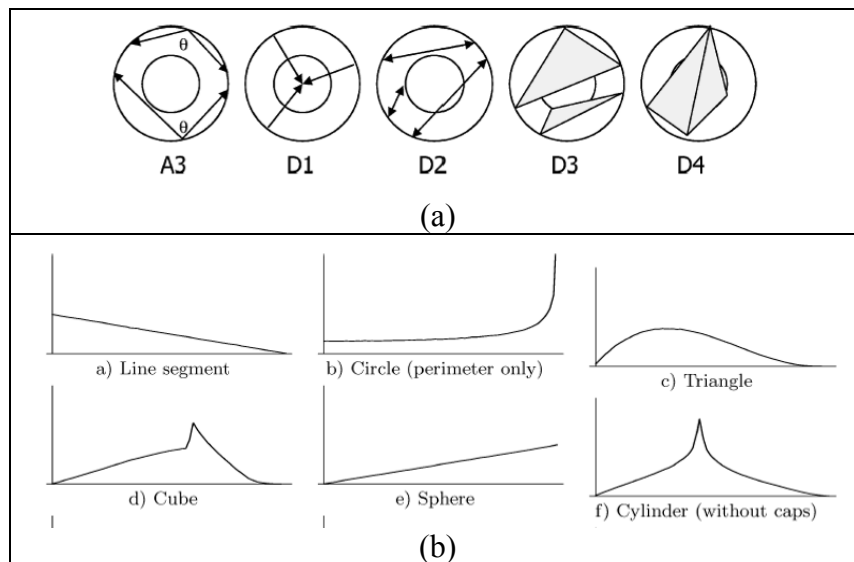


Figure 2-9 (a) Différents types de mesures de forme
 (b) Distributions statistiques de formes typiques.
 Tiré de Osada et al. (2002).

Malgré la relative performance de la méthode à reconnaître les formes globales et à les regrouper en classes (Figure 2-10), la méthode devient inefficace lorsque l'on cherche à distinguer les détails de géométries relativement similaires, ou lorsque les éléments atteignent un certain niveau de complexité, comme dans le cas des profils de surfaces de type *freeform* (Fu, Joshi et Simpson, 2008; Korosec, 2007). De plus, elle ne permet pas de déterminer quelle géométrie est la plus complexe et de classer les éléments en ordre de complexité.

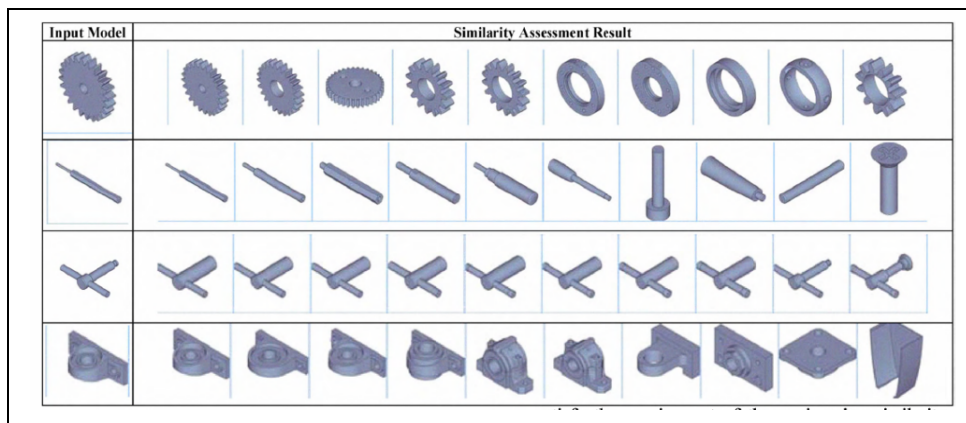


Figure 2-10 Exemple de classification par histogramme de forme.
 Tiré de (Xiao et Yang, 2010).

Pour arriver à caractériser la géométrie des surfaces de type *freeform*, plusieurs auteurs proposent de compiler une propriété intrinsèque à ce type de géométrie, c'est-à-dire la courbure. Dans le domaine de la DFM, cette capacité à distinguer une surface lisse et régulière (géométrie simple) d'une surface tordue et irrégulière (géométrie complexe) est primordiale puisque la différence au niveau de leur complexité géométrique respective affecte la capacité des procédés. Dans l'article de Barari, ElMaraghy et ElMaraghy (2009) portant sur la DFM des surfaces de styles mises en forme par procédé d'usinage, on observe ce phénomène par une augmentation des déviations dans les zones où la courbure est plus importante (Figure 2-11).

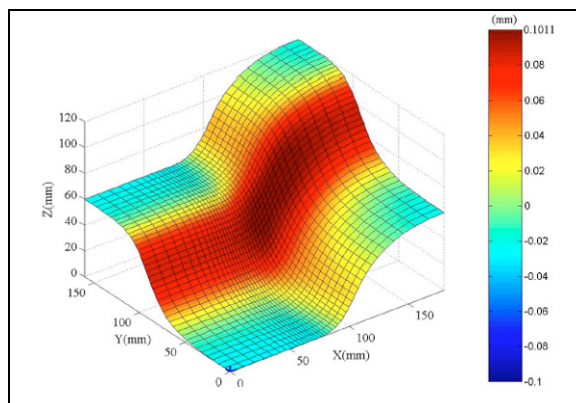


Figure 2-11 Déviations géométriques d'une surface de style. Tiré de Barari, ElMaraghy et ElMaraghy (2009).

Dans le même domaine, Korosec, Balic et Kopac (2005) ont proposé d'estimer la complexité d'une surface pour estimer sa fabricabilité en termes de quantité d'opérations ou de temps d'usinage. Pour déterminer si un élément est plus complexe qu'un autre, les auteurs utilisent des indices comme le ratio entre les profondeurs de coupes maximum et minimum, le ratio entre la surface et le volume de la pièce et la somme des courbures gaussiennes. D'ailleurs, ce dernier indice est également connu sous l'appellation «*d'énergie de surface*» et est utilisé dans le domaine de la modélisation pour quantifier la régularité d'une surface de style (Joshi et Sequin, 2007). Au final, un réseau de neurones est entraîné à partir de données historiques

pour déterminer l'importance de chacun des facteurs et estimer le temps d'usinage ou la quantité d'opérations nécessaires lors de la fabrication de nouvelles géométries.

Plusieurs autres indices spécifiques au domaine de l'usinage ont également été proposés. L'article de Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010) en présente quelques-uns: le ratio des dimensions maximums (enveloppe) de la pièce et de la machine (par exemple, la longueur de la pièce selon l'axe X et la longueur de l'axe X de la machine), le ratio de la longueur et du diamètre de l'outil de coupe, le volume de travail de la machine, la quantité de matière enlevée, etc. La particularité dans cet article est que, en plus d'une indication qualitative de la difficulté à usiner un composant, les zones plus complexes à usiner sont localisées par un rendu de couleur (Figure 2-12).

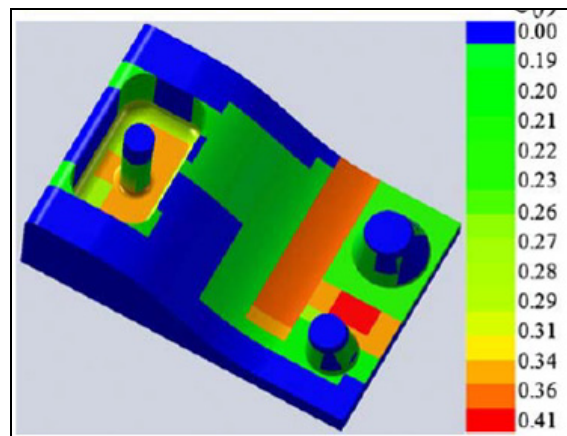


Figure 2-12 Localisation des zones plus difficiles à usiner par un rendu de couleur.
Tiré de Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010).

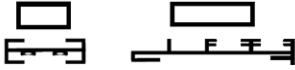


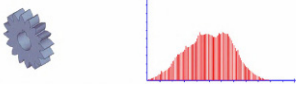
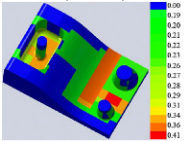
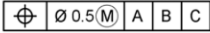
Toujours dans le domaine du DFM, Levesque (2009) a développé un modèle basé sur la théorie des statistiques d'ordre pour estimer la capabilité d'un procédé de fabrication à positionner un patron de trous de n trous, exprimer en terme d'intervalle de confiance tel que présenté à la section 2.1. Puisqu'il est plus «facile» de positionner un patron à n_1 trous qu'un patron à n_2 trous ($n_2 > n_1$), la caractéristique géométrique n devient ici l'indice de complexité qui permet d'exprimer *naturellement* le niveau de difficulté à mettre en forme l'élément. La particularité de ce modèle comparativement aux autres présentés dans cette revue littéraire

est l'absence d'ajustement des paramètres du modèle à des données historiques représentatives de l'ensemble des éléments géométriques, que ce soit par modélisation empirique ou par réseau de neurones. Cet avantage découle du fait que le phénomène qui provoque la dégradation de la capacité du procédé est interprété et modélisé analytiquement. Dans ce cas singulier, le phénomène correspond à la probabilité de produire une erreur qui est directement corrélée avec le nombre n d'entités géométriques qu'un procédé doit reproduire.

En portant un regard sur l'ensemble des définitions et des applications de la complexité géométrique tout juste présentées, il semble que cette caractéristique soit observable de deux points de vue: le point de vue strictement *géométrique* et le point de vue du *procédé de fabrication*. Cette déduction semble tout à fait logique puisqu'un changement de géométrie provoque nécessairement des changements sur le procédé. L'exemple sur la complexité géométrique des profilés extrudés provenant de l'article de Qamar, Arif et Sheikh (2004) illustre bien ces deux points de vue; la complexité géométrique d'un profil peut être estimée par son périmètre (point de vue *géométrique*) ou par la pression nécessaire pour procéder à son extrusion (point de vue *procédé*).

Pour résumer cette section de revue littéraire, le Tableau 1 illustre les différents indices présentés qui permettent d'estimer la complexité géométrique. Ils sont également associés au point de vue (*géométrique* ou *procédé*) par lequel ils ont été identifiés.

Tableau 1 Les indices de complexité géométrique

Domaines	Auteurs	Indices de complexité	
		point de vue <i>géométrique</i>	point de vue <i>procédé</i>
Extrusion de profilés	Qamar, Arif et Sheikh (2004) 	<ul style="list-style-type: none"> Ratio du périmètre de la géométrie et d'un cercle de section équivalente 	<ul style="list-style-type: none"> Pression d'extrusion
Fonderie	Joshi et Ravi (2010) 	<ul style="list-style-type: none"> Volume de la pièce Surface de la pièce Nombre de cavités Volume des cavités Épaisseur de la pièce 	<ul style="list-style-type: none"> Effet du retrait dimensionnel
Modélisation surfacique	Joshi et Sequin (2007) 	<ul style="list-style-type: none"> Énergie de surface en termes de courbure totale 	
Reconnaissance de forme	Osada et al. (2002) Xiao et Yang (2010) 	<ul style="list-style-type: none"> Distribution statistique de forme 	
Usinage de surfaces de styles	Korosec, Balic et Kopac (2005) Korosec (2007)	<ul style="list-style-type: none"> Ratio entre la surface et le volume de la pièce Courbure totale 	<ul style="list-style-type: none"> Ratio des profondeurs de coupe maximum et minimum
Fabrication d'outillage pour pièces moulées	Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010) 		<ul style="list-style-type: none"> Ratio des dimensions maximums de la pièce et de la machine Ratio de la longueur et du diamètre de l'outil de coupe Volume de travail Quantité de matière enlevée
Tolérancement géométrique	Tahan et Levesque (2009) Tahan et Cauvier (2012) 6X Ø10.0-10.5 	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de trous qui composent un patron 	

2.3 Le contrôle géométrique des surfaces de styles

Avec l'augmentation simultanée de la cadence de production des entreprises, du niveau de précision des composants et de leur complexité géométrique, les méthodes d'inspection traditionnelles (par gabarit et calibre *go - no go*) ont graduellement été remplacées par l'inspection numérique tridimensionnelle. Le principe consiste à numériser, sous la forme d'un nuage de points dans l'espace euclidien, les composants fabriqués et de les comparer à une maquette numérique (CAD) qui définit la géométrie et le tolérancement associé à chaque élément.

Dans le cas des profils de surface, la norme ASME Y14.5 (2009) définit trois types de tolérance qui permet de contrôler ce type de géométrie: la tolérance de profil sans aucun degré de liberté (DDL), la tolérance de profil avec trois DDL et la tolérance de profil avec six DDL. Dans les trois cas, la tolérance s'interprète comme une enveloppe d'une largeur de la valeur de tolérance spécifiée et distribuée également de part et d'autre de la surface théorique (Figure 2-13).

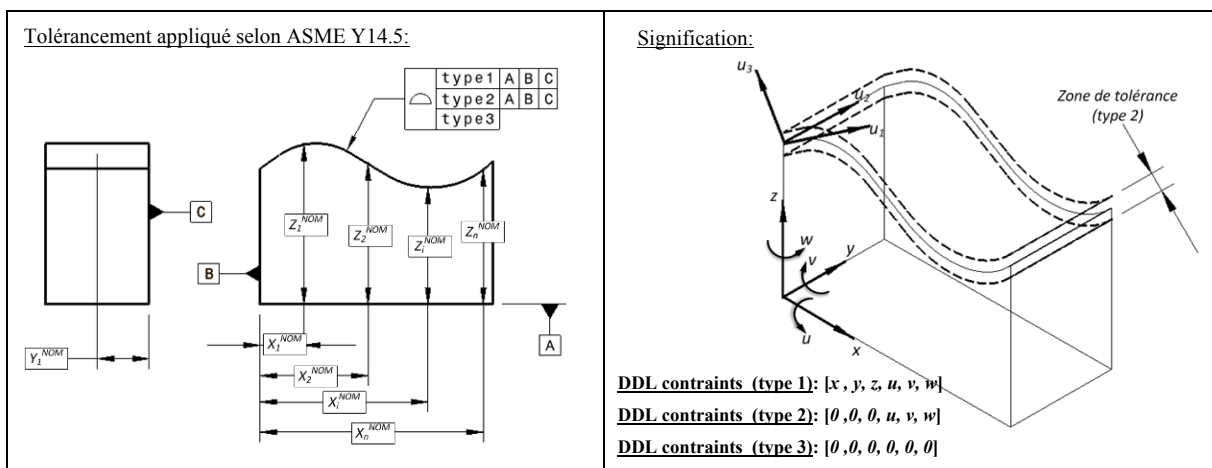


Figure 2-13 Tolérance de profil selon ASME Y14.5.

Par contre, la manière de positionner la zone de tolérance dans l'espace diffère dans chacun des cas. Dans le premier cas, la zone est contrainte en translation et en rotation par rapport au système de référence du composant (tous les degrés de liberté sont bloqués). Dans le

deuxième, la zone est contrainte uniquement en rotation (degrés de liberté de translation contraints) et finalement, dans le troisième cas, la zone est libre de toutes contraintes et peut s'ajuster «au mieux» au profil lui-même. L'intérêt de ces trois types de tolérances est de contrôler différentes caractéristiques, c'est-à-dire soit un contrôle simultané de la position, de l'orientation et de la forme du profil (tolérance sans DDL), un contrôle de l'orientation et de la forme (tolérance avec trois DDL) ou un contrôle uniquement de la forme (tolérance avec six DDL).

Pour parvenir à vérifier si un profil se conforme ou non à un certain type de tolérance par l'inspection numérique, plusieurs étapes doivent être réalisées. Selon Savio, De Chiffre et Schmitt (2007) ces étapes sont la définition de la stratégie d'échantillonnage¹⁰, la prise de mesure, l'alignement entre points mesurés et maquette numérique, le filtrage des données et finalement, la vérification de la conformité.

La stratégie d'échantillonnage consiste à déterminer le nombre et l'endroit des points de mesure sur chacune des surfaces à inspecter. Selon Obeidat et Raman (2009), elle dépend de plusieurs caractéristiques comme la forme de la surface (en terme de sa complexité géométrique), du procédé de fabrication utilisé, de la tolérance appliquée et de l'incertitude de mesure espérée. Fondamentalement, l'objectif est d'extraire un maximum d'information en un minimum de mesure (Raghunandan et Venkateswara Rao, 2008). Pour y parvenir, les points d'inspection sont répartis stratégiquement sur la surface, soit en se basant sur la connaissance *a priori* du procédé de fabrication ou par un algorithme.

Dans le cas des éléments géométriques primitifs (plan, cylindre, sphère, etc.), la répartition des points de mesures est relativement simple. Comme stratégies fréquemment utilisées, on retrouve l'échantillonnage uniforme, aléatoire, stratifié ou l'échantillonnage basé sur des

¹⁰ Cette étape est applicable pour les dispositifs d'inspection avec palpeur puisqu'ils sont limités en terme de vitesse d'exécution.

séquences comme la séquence de Hammersley (ElKott et Veldhuis, 2005; Obeidat et Raman, 2009).

Pour les éléments plus complexes comme les surfaces de styles, plusieurs auteurs ont proposé d'échantillonner ce type d'élément en tenant compte des régions géométriquement plus complexes, c'est-à-dire les zones dont la courbure est plus importante. Par exemple, Obeidat et Raman (2009) proposent d'utiliser les sections d'une surface définie par le formalisme mathématique *NURBS* et, pour chacune de ces sections, d'échantillonner les points correspondant à la courbure de Gauss maximum, à la moyenne des courbures de Gauss maximum et minimum et finalement, à la moyenne des courbures de Gauss minimum et moyenne. Ainsi, pour une surface composée de x sections, on obtiendrait $3x$ points d'inspections. Le risque derrière cette méthode est qu'elle est basée sur l'hypothèse que les pires déviations entre surface nominale et surface fabriquée se trouvent aux points spécifiés, ce qui, d'un point de vue probabiliste, risque de ne pas s'avérer toujours exact.

Suite à la définition de la stratégie d'échantillonnage et à la prise des mesures, le composant fabriqué se trouve à être numérisé et défini par un nuage de points composé de coordonnées x , y et z . La prochaine étape consiste à trouver la correspondance entre le système de coordonnées du système de mesure et le système de coordonnées défini par les surfaces de référence du composant. Cette étape est plus connue sous le nom «d'étape d'alignement». Dans leur revue sur la métrologie des surfaces de styles, Savio, De Chiffre et Schmitt (2007) ont distingué deux types d'alignements: l'alignement grossier et l'alignement fin. Dans le premier cas, l'objectif est d'effectuer une première correspondance entre le CAD et le nuage de points. Cette dernière peut être effectuée par des déplacements manuels du nuage de points ou par différentes méthodes algorithmiques, comme la méthode des moindres carrés et la reconnaissance de formes (Shmukler et Fischer, 2010). Par la suite, un alignement plus fin permet de faire l'ajustement final entre la géométrie nominale et les points de mesure. Pour les tolérances de profils avec référentiels, le nuage de points doit être ajusté aux surfaces de références selon (i) le critère de *zone minimum* et (ii) la séquence d'assemblage (référence primaire, secondaire, tertiaire). Comme la majorité des logiciels d'inspection

procurent des commandes simples pour effectuer ce type d'alignement, le lecteur est référé à Li et Gu (2005), Zhang et Roy (1993) et Bhat et De Meter (2000) pour plus de détails.

Par contre, dans le cas de la tolérance de profil sans référentiel (avec 6 DDL), l'unanimité sur la procédure d'alignement à utiliser n'est pas encore faite. Selon la norme ASME Y14.5 (2009), le critère de *Chebyshev*, également connu sous le nom de critère *minimax* (Bourdet et Mathieu, 1998) ou critère de *zone minimum* (Savio, De Chiffre et Schmitt, 2007) doit être utilisé pour procéder à l'alignement. Malgré tout, plusieurs industriels utilisent encore aujourd'hui l'alignement selon la méthode des moindres carrées pour diverses raisons, quelles soient d'ordre de capacité logiciel ou autres (Srinivasan, Shakarji et Morse, 2012).

Finalement, après échantillonnage, prise de mesures et alignement, la conformité du profil peut être vérifiée. Pour y parvenir, les déviations entre points mesurés et surface nominale sont calculées. Une des méthodes fréquemment utilisées pour visualiser l'amplitude de ces déviations est celle du rendu de couleur, comme illustrer à la Figure 2-11, qui permet de repérer rapidement les zones où les déviations sont plus importantes. Pour qu'un profil soit conforme, l'ensemble des déviations doit être contenu à l'intérieur des limites spécifiées par la tolérance. Une méthode plus robuste consiste à calculer la zone de variation, obtenue par les déviations maximum et minimum, et de la comparer à la zone de tolérance spécifiée. Les différentes méthodes pour calculer les trois (3) types de zone de variation, selon le type de tolérance, seront détaillées au CHAPITRE 5.

2.4 Méthodologie expérimentale

Tel que mentionné au CHAPITRE 1, l'objectif de ce mémoire est de concevoir un modèle qui permet d'interpoler et d'extrapoler la capacité d'un procédé de fabrication dans le cas des tolérances géométriques de profil. Ce modèle doit permettre d'intégrer les caractéristiques statistiques du procédé, la complexité géométrique du profil et le type de tolérance appliquée (sans DDL, avec trois DDL ou avec six DDL).

L'observation de départ qui suscite la curiosité et qui motive le développement d'un tel modèle est que la complexité géométrique des composants affecte la capacité d'un procédé de fabrication. Le problème engendré est qu'il devient très difficile d'utiliser la capacité connue d'une certaine géométrie pour estimer la capacité d'un nouveau composant lors de son tolérancement.

En rappel de la section 1.1, la première problématique vers l'atteinte de l'objectif de ce mémoire concerne l'expression de la complexité géométrique des surfaces par un indice pour être employée dans l'estimation d'une capacité de procédé. En se référant à la revue littéraire, une première piste de solution à retenir pour la résolution de cette problématique est que la complexité est une caractéristique relative. Dans notre cas, elle devient relative aux variables inhérentes au procédé de fabrication. De plus, vu la corrélation entre *géométrie* et *procédé*, il serait possible de mesurer la complexité selon les deux points de vue. Par exemple, dans le cas du procédé d'assemblage mécano soudé du PI, la complexité peut s'estimer par la taille et le nombre d'éléments assemblés (point de vue *géométrique*) et, à l'opposé, par la quantité de métal d'apport utilisée pour réaliser l'assemblage (point de vue *procédé*).

Afin de vérifier cette première hypothèse, l'indice qui permet de quantifier la complexité d'un profil de surface doit être suffisamment flexible pour s'adapter aux deux points de vue. Puisque l'indice de complexité proposé par Levesque (2009) a prouvé sa validité dans le cas des éléments géométriques de type patron de trou (où n est indicatif du nombre de trous qui composent le patron), nous utiliserons cette proposition comme point de départ et la généraliserons vers les éléments de type profil de surfaces. Les indices de complexité selon l'approche 'géométrique' et l'approche 'procédé' seront développées. Le modèle mathématique basé sur les statistiques d'ordres sera également utilisé pour lier complexité géométrique et capacité de procédé.

Comme intrant, le modèle recevra le comportement statistique des déviations (μ, σ) d'un profil de surface de géométrie quelconque. Un développement analytique, basé sur la

définition de chaque type de tolérance de profil permettra d'extrapoler la capabilité vers des profils plus complexes, où d'interpoler la capabilité vers des profils plus simples, selon le cas. Ces capabilités seront exprimées par les percentiles $x_{50\%}$ et $x_{99,865\%}$, tels que présentés dans la revue littéraire.

Pour valider le modèle, ce dernier sera appliqué au procédé d'assemblage mécano soudé du PI. Le système de mesure utilisé pour l'inspection des structures d'autocars permettra de recueillir des données pour différents types d'assemblages. Une mise à jour des stratégies d'échantillonnage et procédure d'inspection (prise de mesures, alignement des nuages de points, calcul des résultats et incertitudes de mesure) est à envisager pour s'assurer de la validité des résultats. De plus, dû à des limitations d'ordre informatique, le système de mesure du PI ne permet pas de calculer le résultat d'inspection pour une tolérance de profil de type 3. Un algorithme devra donc être développé et validé avant d'être utilisé pour recueillir les données de ce type de tolérance. La validation du modèle s'effectuera quant à elle en comparant les capabilités réelles du procédé ($x_{\theta\%}$) aux capabilités estimées par le modèle ($\hat{x}_{\theta\%}$).

Finalement, puisque le phénomène de dégradation de la capabilité en fonction de la complexité est observé sur plusieurs autres types de procédés de fabrication, la méthode développée devrait être suffisamment générale pour être appliquée dans d'autres contextes. Ainsi, pour vérifier la flexibilité du modèle, une étude de cas portant sur un procédé d'usinage sera réalisée. Cette étude de cas se veut un complément important aux analyses effectuées chez le PI puisqu'elle aborde un aspect fondamental des tolérances de profil: le contrôle géométrique des surfaces de styles. Vu que ce type de procédé tombe hors du champ d'expertise du PI, l'étude de cas sera réalisée en laboratoire.

CHAPITRE 3

ESTIMATION DE LA CAPABILITÉ EN CONTEXTE D'INGÉNIERIE CONCOURANTE

Comme démontré aux chapitres précédents, il est fortement souhaitable lors du développement d'un nouveau produit de connaître une juste estimation de la capacité des procédés qui seront employés dans la fabrication et l'assemblage du produit en question. Cela permet d'intégrer les contraintes intrinsèques à la fabrication des composants (DFMA) et d'assurer le niveau de qualité du produit, que ce soit au niveau des attentes clients (ex. pièces interchangeables lors des opérations d'entretien, durée de vie des composants, etc.) ou au niveau des opérations manufacturières effectuées à l'interne (ex. assemblage sans opérations secondaires, fabrication avec taux de rejet très faible, minimiser les retouches, etc.). En se référant à la norme ISO/TS16949 (2009) et aux principes de l'ingénierie concourante, publiés sous diverses appellations dans la littérature (*Quality Function Deployment* (Lockamy et Khurana, 1995), *Advanced Product Quality Planning* (Carbone, 2005)), on peut avancer l'idée générale qui est la nécessité du travail en équipe multidisciplinaire et d'une manière simultanée (ingénierie de conception et ingénierie de fabrication¹¹) (Figure 3-1).

Actuellement, la compagnie Nova Bus (filiale du groupe Volvo Bus - Prévost Car) est à intégrer les principes du DFMA à son processus de développement de produit. L'estimation de la capacité des procédés constitue un pas important vers la conception de produits *facilement* manufacturables. Le rôle des principaux intervenants (ingénierie et méthodes) pour l'atteinte de cet objectif sera donc illustré dans ce chapitre. De plus, puisque le modèle développé dans ce mémoire est intrinsèquement lié à cet objectif, nous illustrerons l'impact de ce modèle sur le processus de développement de produit tel que connu aujourd'hui.

¹¹ Dans ce rapport, les termes «département des méthodes» ou «ingénierie de fabrication» font référence à tout intervenant qui est responsable de la fabrication où de l'assemblage d'un produit ou d'un composant. Il peut s'agir d'un fournisseur ou un département interne.

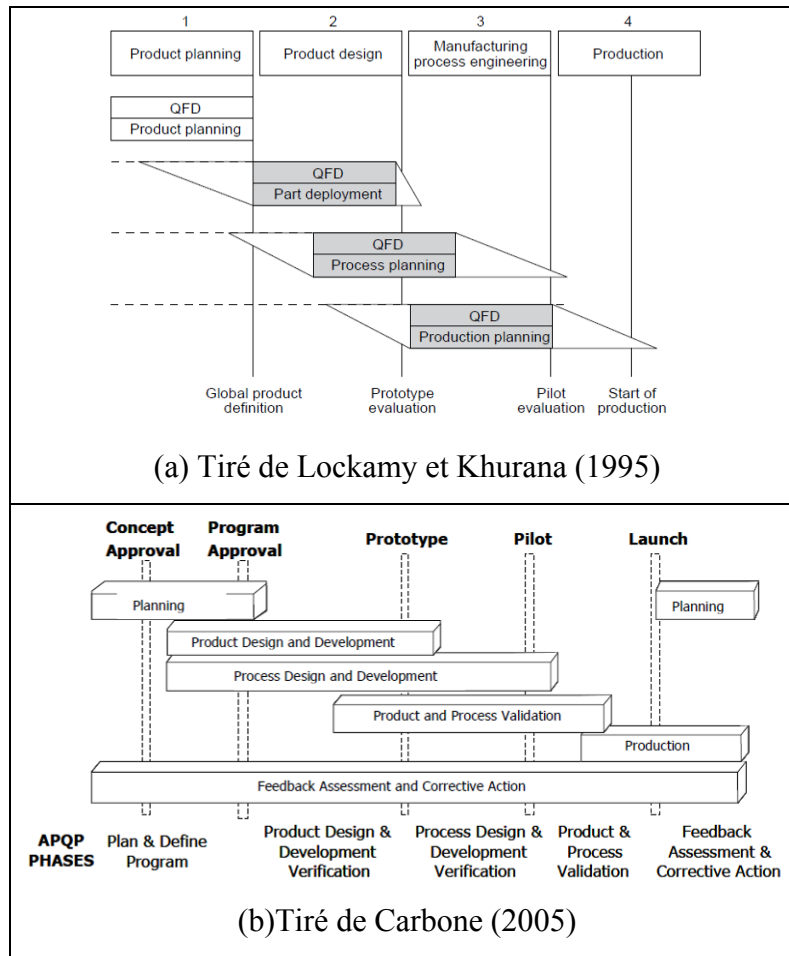


Figure 3-1 Processus d'ingénierie concurrente.

3.1 Estimation de la capacité lors du développement de produit chez Nova Bus

Le développement de nouveaux produits chez Nova Bus est encadré par un processus global et normalisé pour l'ensemble du groupe Volvo Bus. Sans détailler ce processus strictement, ce dernier comporte, en commençant par l'élaboration générale du concept jusqu'à la relâche finale des dessins de détails, les tâches suivantes (Craig, 1996; Levesque, 2009):

- Définir les objectifs du concept (*Key product characteristics*; KPC);
- Élaborer le concept général (modélisation 3D);
- Identifier les caractéristiques critiques (KC);
- Établir les systèmes de référence et la cotation fonctionnelle;
- Optimiser le concept (DFMA);

- Relâche des dessins de détails pour la production.

En parallèle à ces étapes de conception, les procédés de fabrication et d'assemblage doivent être développés. En s'inspirant de la norme ISO/TS16949 (2009) et des principes de l'ingénierie concourante (Carbone, 2005; Lockamy et Khurana, 1995), le département des méthodes doit:

- Analyser la faisabilité du composant/ du produit;
- Développer le procédé et les stratégies de contrôle;
- Valider le procédé par une courte série de production (préproduction).

En juxtaposant ces tâches effectuées respectivement par l'ingénierie et les méthodes, nous obtenons le processus de la Figure 3-2.

Pour l'atteinte de l'objectif visé dans ce mémoire¹², des outils très spécifiques doivent être utilisés par chacun des intervenants. D'une part, estimer une capacité requiert certains prérequis. Selon la norme ISO 22514 (2007), une capacité de procédé n'est valide que si: (i) les performances du système de mesure sont acceptables et (ii) le procédé affiche un comportement ergodique. Il devient donc essentiel d'utiliser, lors de la fabrication des composants, des outils d'analyse de système de mesure (analyse de biais, analyse de linéarité, analyse de la répétitivité et de la reproductibilité) et du niveau de stabilisation du procédé (cartes de contrôle).

D'autre part, l'ingénierie se doit d'utiliser les capacités obtenues pour vérifier la robustesse de ses concepts. De façon plus concrète, ces capacités doivent alimenter les modèles qui permettent l'analyse de variations d'un assemblage mécanique, que ce soit par la méthode des

¹² Celui d'estimer la capacité des procédés lors du développement de produit et d'utiliser cette capacité lors du tolérancement des composants.

limites (*Worst Case*) ou la méthode probabiliste. La prochaine section illustre un exemple simple d'analyse des variations inspiré d'un cas réel chez le partenaire industriel.

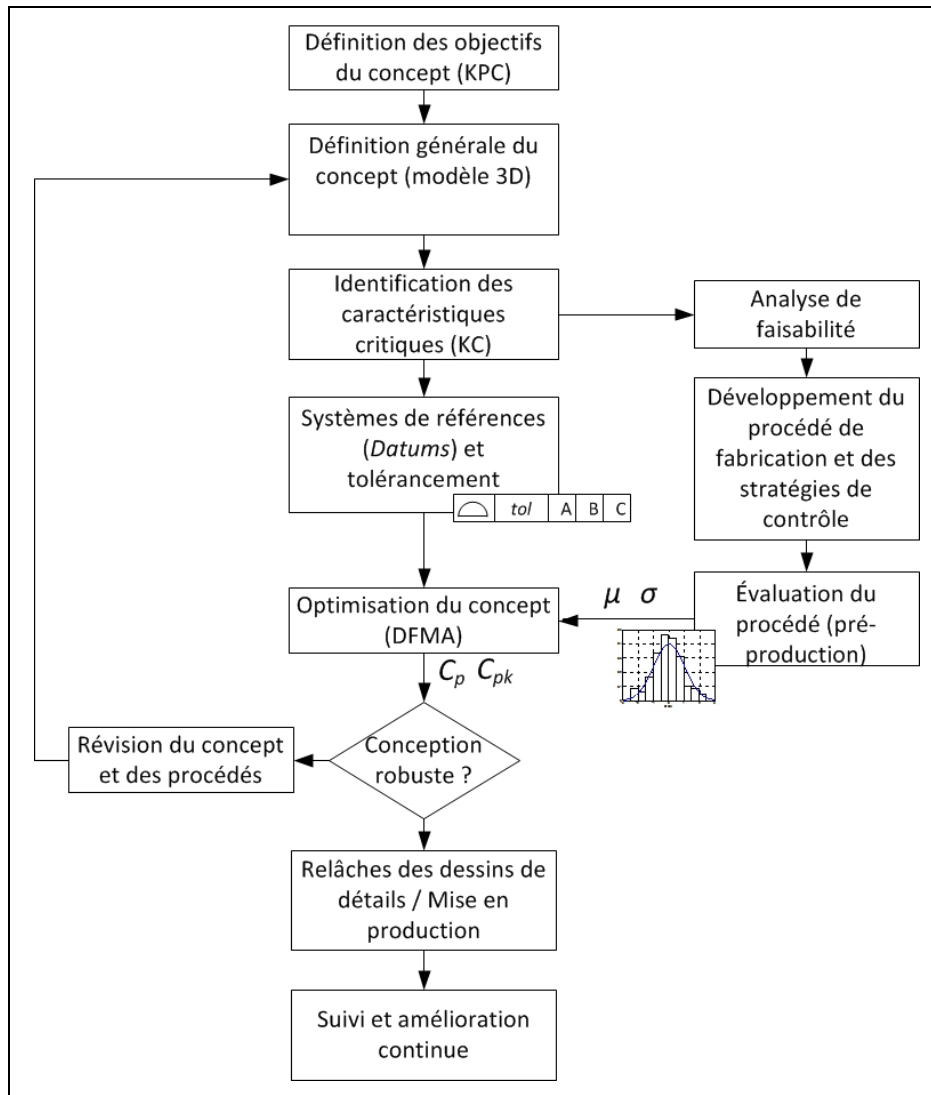


Figure 3-2 Estimation de la capacité d'un procédé lors du développement de produit (adapté de Levesque (2009)).

3.2 Exemple typique d'analyse de capacité

Pour attacher un sous-module (ex. compresseur, moteur, radiateur, etc.) à la structure de l'autocar, l'ingénierie a conçu un système d'attaches mécano soudé qui permet de fixer quatre supports anti vibratoires (Figure 3-3). Pour s'assurer que les supports accomplissent

convenablement leur rôle et assure la durée de vie des composants, le manufacturier suggère que l'erreur de profil à l'interface système d'attaches/sous-module soit inférieur ou égal à 6 mm. Le sous-module qui y sera attaché provient d'un fournisseur externe. Ce dernier nous garantit une erreur maximale de profil des surfaces d'appuis (co-planéité) de 2mm. L'équipe d'ingénierie conclut donc qu'une tolérance de profil de 4 mm doit être appliquée au système d'attaches afin de rencontrer le requis fonctionnel des supports anti vibratoires¹³. Ici, il s'agit de la tolérance de profil avec 6 DDL qui permet un contrôle de la forme des surfaces d'appuis.

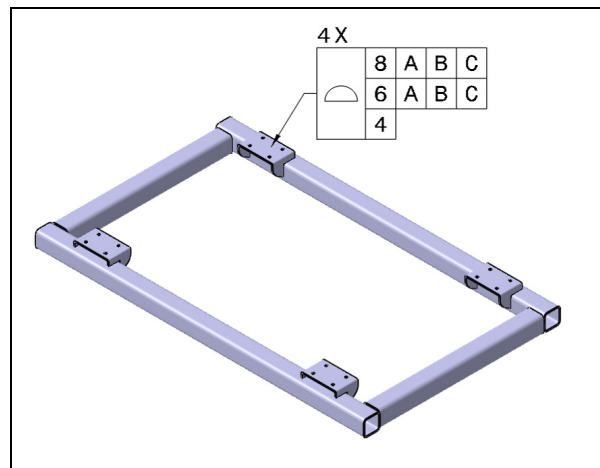


Figure 3-3 Requis (tolérance de profil) sur un système d'attaches.

Avant de retenir ce concept et d'homologuer les devis pour la fabrication en série, une analyse de la capacité du procédé d'assemblage mécano soudé qui fabrique le système d'attaches est effectuée. Dans ce cas, le développement du procédé est réalisé parallèlement à la conception. Avec un échantillon représentatif de la production, le département des méthodes établit que l'erreur en profil du procédé suit une distribution normale de paramètres $\mu = 3 \text{ mm}$ et $\sigma = 1 \text{ mm}$. L'entreprise est prête à tolérer 5% de composants défectueux ($C_{pk} \approx 0.67$). En résumé, nous possédons les données suivantes:

¹³ La valeur de 4 mm est calculée ici selon l'approche limite (*Worst Case*)

- Les supports anti vibratoires peuvent supporter une erreur maximale de profil 6mm;
- L'erreur en profil du sous-module est de 2 mm;
- Le système d'attaches doit respecter une tolérance de 4 mm et un $C_{pk} \approx 0.67$;
- Le comportement du procédé s'exprime par la distribution normale $N(3;1)$.

À l'aide de l'équation (2.3) et des données tout juste énoncées, on obtient l'indice de capabilité $C_{pk} = 0.33$. Puisque les objectifs de l'entreprise ne sont pas atteints ($0.33 < 0.67$), nous ne pouvons conclure que le concept est acceptable. Une révision du concept (par exemple, sélectionner des supports qui absorbent une plus grande erreur en profil ou un ajout de calles d'ajustement) ou une amélioration des performances du procédé d'assemblage mécano soudé sont à envisager avant la mise en production.

3.3 Estimation de la capabilité par la complexité géométrique

Tel que mentionné au CHAPITRE 1, il arrive que le même procédé soit utilisé pour fabriquer différents composants de différentes géométries. Dans le cas de notre exemple, cela se traduirait par l'introduction d'un nouveau sous-module (ex. nouveau compresseur) qui nécessite un changement de la géométrie du système d'attaches (ex. augmentation du nombre de supports, voir Figure 3-4).

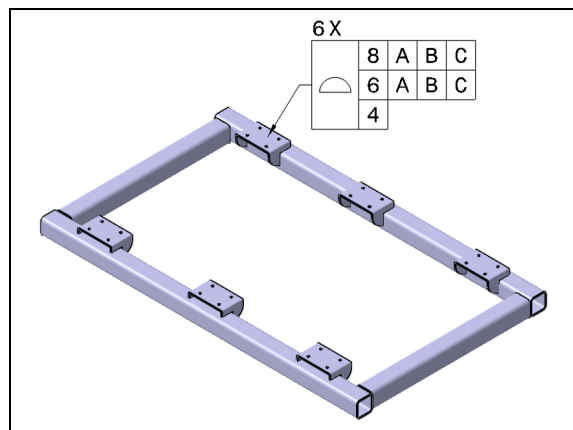


Figure 3-4 Exemple de nouvelle géométrie pour le système d'attaches.

Dans le contexte du PI (conception de différents modèles et différents accessoires), cette situation arrive fréquemment. Il devient donc nécessaire de refaire le processus illustré à la Figure 3-2 pour chaque nouvelle géométrie. L'objectif du modèle développé dans ce mémoire est justement d'éviter cette répétition en permettant à un concepteur d'appliquer sur une nouvelle conception (géométrie), un tolérancement cohérent du premier coup et sans attendre la fabrication de nouvelles pièces. La capacité historique des procédés, la complexité géométrique des composants et le niveau de qualité souhaité permettront d'alimenter le modèle et d'alléger le processus de développement d'un nouveau composant (Figure 3-5).

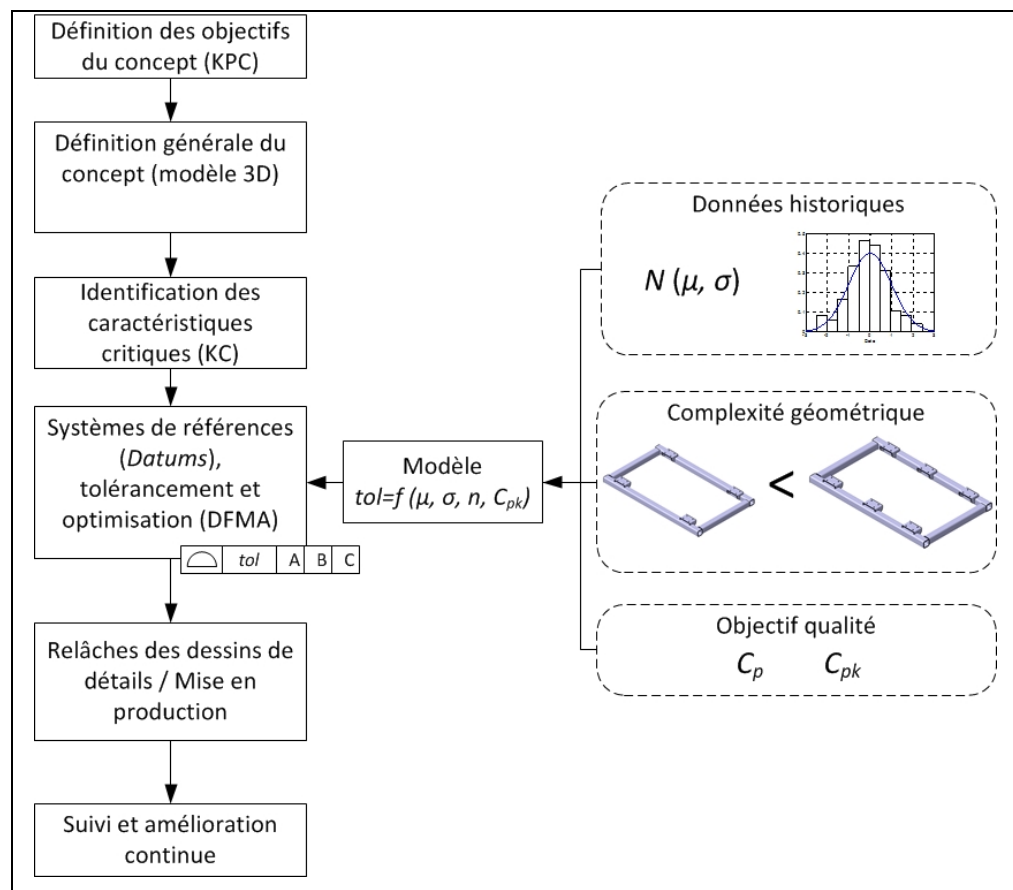


Figure 3-5 Estimation de la capacité d'un procédé par la complexité géométrique.

3.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons illustré les grandes étapes qui permettent d'intégrer de façon simultanée la capacité d'un procédé de fabrication à la conception d'un produit. La place du modèle développé dans ce mémoire au sein de ces étapes a également été illustrée, en plus du bénéfice majeur lié à son utilisation: celui d'être en mesure d'appliquer un tolérancement optimal moyennant une opération d'interpolation (ou d'extrapolation) de capacités connues sur des géométries similaires, mais de complexités différentes.

Afin de concrétiser l'approche et permettre d'utiliser le modèle chez le partenaire industriel, plusieurs initiatives ont été entamées au cours de nos travaux. Ces dernières se concentrent principalement autour de l'assemblage de la structure de l'autocar. Avec son équipement en métrologie (centres à mesurer les coordonnées portables), l'usine de SFDL a le potentiel de fournir à l'ingénierie, basée à STE, des estimations de la capacité de son procédé d'assemblage mécano soudé. En donnant ces informations, l'ingénierie pourra quantifier les variations géométriques et dimensionnelles de la structure de l'autocar et effectuer une conception de produit conséquente.

Les systèmes de mesures étaient déjà déployés lors de notre arrivée dans les locaux du PI. Les travaux ont donc principalement consisté à consolider les faiblesses du système. Pour débiter, une mise à jour des stratégies d'inspection des sous-assemblages principaux (ex. supports de radiateur, compartiment moteur, compartiment batterie, etc.) a été effectuée. En bref, il s'agit de s'assurer que les résultats d'inspection sont représentatifs des requis d'ingénierie.

Les stratégies d'échantillonnage (le nombre et l'endroit des points de mesure sur les structures d'autocar), les procédures d'alignement entre points mesurés et maquette numérique et les algorithmes de calculs ont également été révisés. Une procédure *MSA-Gage R&R* a également été instaurée pour valider les stratégies d'inspection de chacun des sous-assemblages.

Suite à cette mise à jour, la base de données initialement implantée avec les systèmes de mesures et qui permet de compiler les résultats d'inspection a été réinitialisée et connectée à un logiciel d'analyse statistique (MINITAB®). Des cartes de contrôles générées par ce logiciel permettent de vérifier la stabilité du procédé et d'extraire une estimation fiable de la capacité.

CHAPITRE 4

DÉVELOPPEMENT D'UN INDICE DE COMPLEXITÉ GÉOMÉTRIQUE

Dans ce chapitre, un nouvel indice, ou métrique, de complexité est proposé. Cet indice permet d'estimer la complexité géométrique d'une surface quelconque et peut alimenter un modèle de corrélation avec la capabilité d'un procédé à respecter une tolérance de profil. Le fondement théorique dans le développement de cet indice est la proposition faite par Tahan et Levesque (2009), où la complexité d'un ensemble géométrique (le cas échéant, un patron de n trous) correspond tout simplement au nombre de fois qu'un élément de référence (un trou) est observé. Cet indice devient indicatif, dans un sens probabiliste, de la difficulté à fabriquer l'ensemble géométrique.

L'objectif du CHAPITRE 4 est donc de: (i) démontrer en quoi ce nombre est indicatif de la difficulté de fabrication, et (ii) de généraliser la méthode de manière à l'appliquer aux surfaces quelconques et qui sont contrôlées par des tolérances géométriques de profil (tel que recommandé par la norme ASME Y14.5(2009)). De plus, vu la corrélation inévitable entre 'géométrie' et 'méthodes de fabrication', l'indice sera développé selon les deux points de vue

4.1 La complexité d'un point de vue géométrique

Par définition, la capabilité d'un procédé de fabrication représente l'intervalle de l'erreur dans lequel un élément géométrique peut-être reproduit. Le principe derrière l'établissement des limites qui définissent cet intervalle est de mesurer un échantillon de n éléments et d'évaluer, par des méthodes statistiques, un intervalle qui reflète le niveau de dispersion du procédé (approche probabiliste) ou encore, la pire erreur pouvant être commise (approche limite - *Worst Case*). Une fois la capabilité identifiée, elle peut être employée dans des opérations d'analyse ou de synthèse de tolérances.

Hypothèse (1) : Vu la nature aléatoire des procédés de fabrication, on admet que la probabilité d'observer une erreur importante augmente avec la taille n de l'échantillon. Par

exemple, si on fabrique une pièce avec 4 trous, il sera plus probable d'observer une plus grande variation qu'une pièce de 2 trous. Le théorème des statistiques d'ordre justifie notre première hypothèse (Papoulis et Pillai, 2002).

En effet, lors d'une analyse de capabilité traditionnelle, c'est-à-dire une analyse sur l'aptitude d'un procédé à reproduire un élément géométrique (par exemple: le positionnement d'un trou) sur une série de pièces, ce phénomène d'augmentation de la probabilité d'erreur nous pousse à considérer une taille d'échantillon n suffisamment large¹⁴.

Dans ce mémoire, le scénario qui nous intéresse est lorsqu'un élément géométrique est reproduit de façon successive sur une même pièce et contrôlé (dimensionnellement et géométriquement) comme un ensemble. Ce type de contrôle est fréquemment utilisé pour le positionnement de patron de trous ou pour le contrôle d'un profil composé de plusieurs surfaces (Figure 4-1). Dans ces deux exemples, bien que le résultat de l'inspection soit un scalaire (erreur de position (a) ou erreur de profil (b)), chacun de ces deux résultats est issu d'un ensemble de mesures.

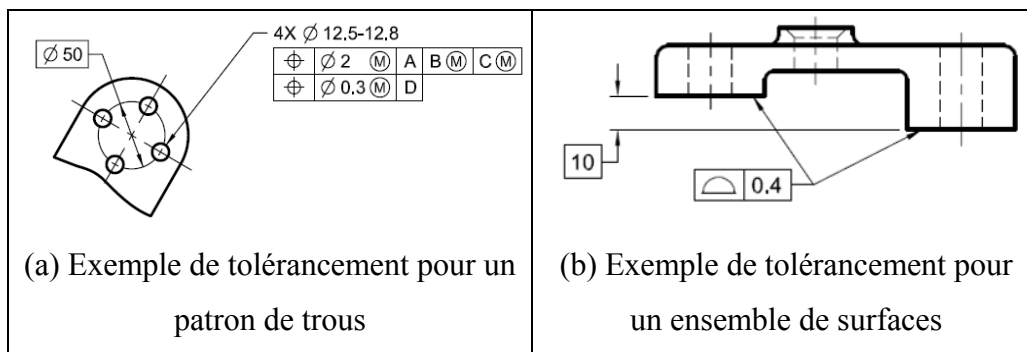


Figure 4-1 Exemple d'ensembles géométriques (tiré de ASME Y14.5 (2009)).

Lors de l'inspection de composants ayant ce type de requis, la valeur mesurée qui permet de vérifier la conformité est dictée, tout comme les limites d'une analyse de capabilité, par la

¹⁴ Généralement, on parle de 25-30 échantillons.

pire erreur observée (ASME Y14.5, 2009). Ainsi, considérant le phénomène probabiliste énoncé, on assistera inévitablement à une dégradation de la capabilité du procédé lorsque n augmente sur une même pièce¹⁵. Vu le lien apparent avec la notion de «*difficulté de fabrication*» occasionné par le changement et la complexification de géométrie, on associera cette augmentation du nombre d'éléments n à l'augmentation de la complexité géométrique de l'ensemble. Néanmoins, à ce stade de l'analyse, nous ne pouvons pas fournir de conjoncture sur la nature de cette relation: simple proportionnalité linéaire, logarithmique ou autres?

Dans ces cas précis, la relation peut être déduite aisément. Pour les exemples illustrés à la Figure 4-1, évaluer l'indice n nous apparaît évident (dans le premier cas, $n=4$ trous et dans le second, $n=2$ surfaces) puisque les ensembles géométriques sont composés d'éléments¹⁶ clairement distincts et un nombre discret ($n \in \mathbb{N}$) peut refléter le degré de complexité. Or, de façon intuitive, les notions de complexité géométrique et de difficulté de fabrication sont également présentes pour des éléments géométriques que nous qualifierons de «*continus*», par exemple une surface plane ou une surface de style (*freeform*). Par exemple, le risque associé à l'erreur de planéité d'un plan de petite taille (c.-à-d. faible valeur de n) est nécessairement plus faible que le risque associé à un plan de grande taille (c.-à-d. valeur de n élevée).

Hypothèse (2) : Pour les surfaces de style (*freeform*), on admet que le risque associé à l'erreur de forme (ou de profil) d'une surface régulière est moindre que le risque associé à une surface tordue. En d'autres termes, la difficulté à fabriquer cette surface est proportionnelle à la courbure locale et aux variations de courbure sur la surface.

¹⁵ P. ex. si le nombre de trous accroît ou encore si la superficie de la surface contrôlée par la tolérance de profil augmente.

¹⁶ Dans ces cas, des cylindres et des surfaces.

Fondamentalement, notre capacité à évaluer la complexité d'un ensemble géométrique provient d'une métrique, nommée G , qui nous permet de **quantifier l'ensemble géométrique à mettre en forme** (ex. : le nombre de trous d'un patron de trous, le nombre de surfaces d'un ensemble de surfaces, la taille d'un plan, la courbure d'une surface, etc.). La principale distinction entre les éléments 'discrets' et 'continus' est que, dans le premier cas, cette quantité G est dénombrable plus facilement. Il devient ainsi très simple (i) de déterminer l'élément le plus simple ou le plus facile à fabriquer ($G|_{n=1}$)¹⁷ et (ii) de compiler ou d'extrapoler sur base probabiliste, le nombre de fois que cet élément est reproduit dans l'ensemble géométrique ($G|_n, n > 1$).

Dans le cas 'continu', évaluer n est plus complexe. Vu la nature «continue» des géométries, l'élément correspondant à $n=1$ et sa complexité correspondante $G|_{n=1}$ ne peuvent être identifiés spontanément et de façon irrévocable. Il revient à l'observateur de définir une géométrie de référence, et de mesurer la caractéristique géométrique qui y correspond. On notera cette caractéristique qui définit l'élément de référence par G_{ref} . Pour évaluer la complexité géométrique d'une nouvelle géométrie G relativement à cette géométrie de référence définie *a priori*, l'indice n s'obtient par le ratio entre la nouvelle géométrie G et la géométrie étalon G_{ref} :

$$n = \frac{G}{G_{ref}} \quad (4.1)$$

où, tout comme le cas des géométries «discrètes», $n \in \mathbb{Q}^+$ s'interprète comme le nombre de fois que l'élément de référence est reproduit.

Ainsi, d'un point de vue formel, on peut écrire que pour un procédé établi (ex. un centre d'usinage, mécano soudé, moulage sous pression, etc.), l'indice de capabilité $C_{p,pk,\dots}$ devient une fonction de la valeur de la zone de tolérance tol , des caractéristiques statistiques du

¹⁷ P. ex. dans le cas des tolérances de position, ceci correspond au cas d'une pièce avec un seul trou.

procédé (μ, σ) et du scalaire n définit sur l'intervalle $]0, \infty[$ qui exprime la complexité de l'élément à produire:

$$C_{p,pk,\dots} = f(tol, \mu, \sigma, n) \quad (4.2)$$

4.2 La complexité d'un point de vue du procédé de fabrication

Hypothèse (3) : un changement de géométrie induit systématiquement un changement au niveau des variations d'un procédé de fabrication.

Inévitablement, comme mentionné déjà dans la revue littéraire, mettre en forme un élément complexe nécessite plus d'effort et d'attention en comparaison à un élément à géométrie simple. Par exemple, pour un procédé d'usinage, la différence au niveau de l'effort ou de l'énergie machine déployée pour mettre en forme une géométrie plus complexe s'observerait par une augmentation de la complexité de la trajectoire d'outil. Pour un procédé de soudage, l'augmentation du nombre d'éléments à assembler (changement au niveau de la géométrie) s'observerait par une augmentation du nombre de joints de soudure (changement au niveau du procédé). Ainsi, en plus du point de vue géométrique, nous devrions être en mesure d'estimer la complexité géométrique d'un élément en mesurant son impact sur le procédé de fabrication.

Que ce soit par la géométrie ou par le procédé, le principe fondamental derrière l'estimation de n demeure le même. L'unique différence réside dans la métrique G qui permet de quantifier l'ensemble géométrique à produire. Dans un cas, G est utilisé pour quantifier la géométrie (ex. le nombre de trous d'un patron de trou) tandis que dans le second, G permet de quantifier l'effort déployé par le procédé (ex. le nombre de changements de position de la broche d'un centre d'usinage lors de la fabrication du patron de trous).

4.3 Étude de cas (1): La complexité d'un système d'attaches

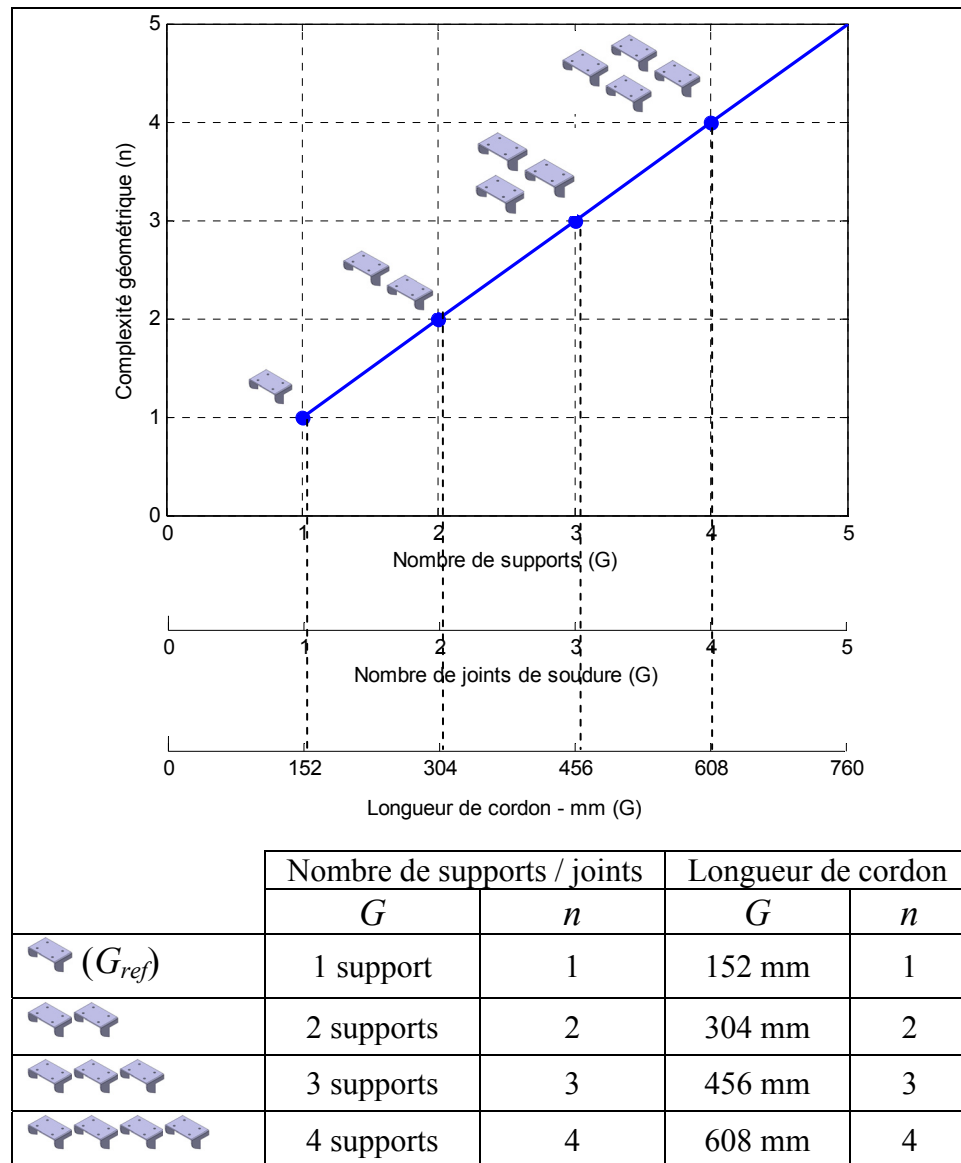
Pour illustrer l'approche retenue, considérons comme premier exemple le système d'attaches présenté à la section 3.2. Rappelons que pour assurer les requis fonctionnels, des tolérances géométriques sur la position, l'orientation et la forme sont appliqués de manière à contrôler simultanément les quatre supports (voir Figure 3-3).

Sachant que le procédé qui permet d'assembler chacun des supports est le même (même gabarit et même paramètres de soudage) le système d'attaches s'interprète, du point de vue de la géométrie, comme un ensemble où l'élément de référence (c.-à-d. l'élément le plus facile à fabriquer) correspond à $G_{ref}=1$ support. Par simplification de l'équation (4.1), on évalue l'indice complexité géométrique de ce système d'attaches par $n=G$, où G correspond au nombre de supports à positionner.

En adoptant le point de vue du procédé, la complexité géométrique de ce système d'attaches (c.-à-d. l'augmentation du nombre de supports) peut se mesurer par l'augmentation du nombre de joints de soudure. Vu qu'il y a corrélation linéaire directe, les deux métriques peuvent être utilisées pour estimer l'indice de complexité n . À la limite, puisque la méthode d'assemblage est considérée la même pour tous les supports, la quantité de métal d'apport utilisée pour chaque joint, mesurée en termes de 'longueur du cordon de soudure', peut également servir afin d'estimer l'indice n .

Dans tous les cas, on obtient le même résultat sur l'estimation de l'indice de complexité n (voir Tableau 2).

Tableau 2 Complexité géométrique d'un système d'attaches



4.4 Étude de cas (2): La complexité d'une structure mécano soudée d'un mur latéral d'autobus urbain

L'exemple précédent correspondait au cas le plus simple, c.-à-d. le cas où l'indice de complexité n s'obtient par un simple décompte d'éléments physiquement distincts. Examinons maintenant un cas légèrement plus complexe. Lors de l'assemblage des structures des murs, les pièces primaires (essentiellement des tubes et des tôles) sont mises en position

avec un gabarit dans lequel elles sont soudées pour former des sous-modules qui, à leur tour, sont assemblés pour obtenir une structure avec la configuration souhaitée. Au final, l'objectif 'qualité' est de maintenir l'erreur de forme du mur à l'intérieur d'une tolérance. La Figure 4-2 illustre schématiquement ce processus d'assemblage ainsi que les géométries des différentes structures typiques d'un mur latéral d'autocar.

Lors de l'assemblage des composants, l'erreur de forme de la structure est en réalité un cumulatif de quatre types d'erreurs:

1. l'erreur due au procédé de roulage des pièces primaires;
2. l'erreur due au procédé de coupage des pièces primaires;
3. l'erreur due au montage dans les gabarits dans le procédé d'assemblage;
4. l'erreur due au retrait causé par le procédé de soudage.

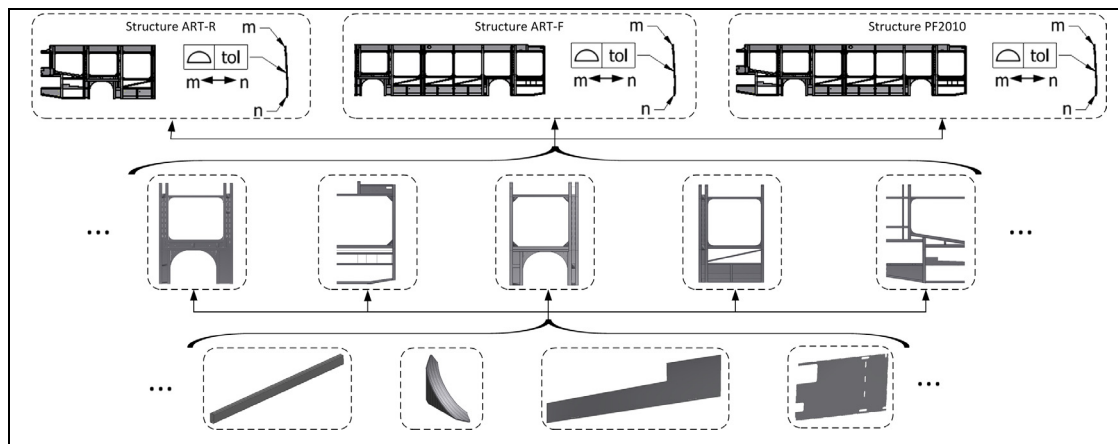


Figure 4-2 Processus d'assemblage des structures de murs.

Pour résumer, et en considérant que l'erreur de fabrication des pièces primaires est négligeable en comparaison aux erreurs engendrées par leur assemblage, les variables inhérentes qui affectent la capacité du processus à maintenir la forme du mur sont principalement: ① les paramètres du procédé de soudage ② la forme et la taille de l'assemblage à réaliser et ③ le nombre d'éléments qu'il comporte. Les deux premières variables étant constantes pour une géométrie (paramètres de soudage et forme de

l'assemblage), la *taille de l'assemblage* et le *nombre d'éléments* deviennent par conséquent des indicatifs potentiels de la complexité de l'assemblage à produire.

Dans ce cas, vu l'aspect cumulatif du processus d'assemblage (c.-à-d. plus on assemble d'éléments, plus l'assemblage augmente de taille), les variables indicatives de la complexité géométrique sont en fait fortement corrélées. La corrélation entre le nombre d'éléments et la taille de l'assemblage est illustrée ci-dessous à la Figure 4-3.

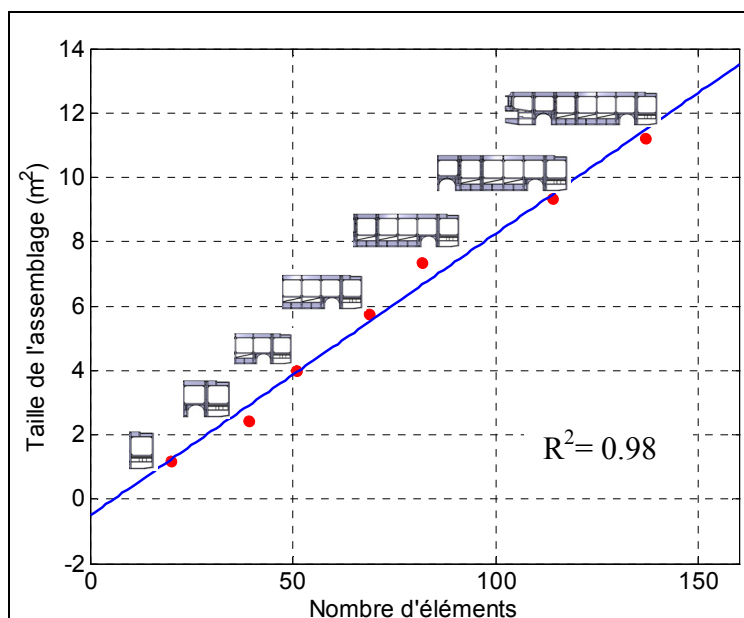


Figure 4-3 Corrélation entre le nombre d'éléments et la taille des structures de murs.

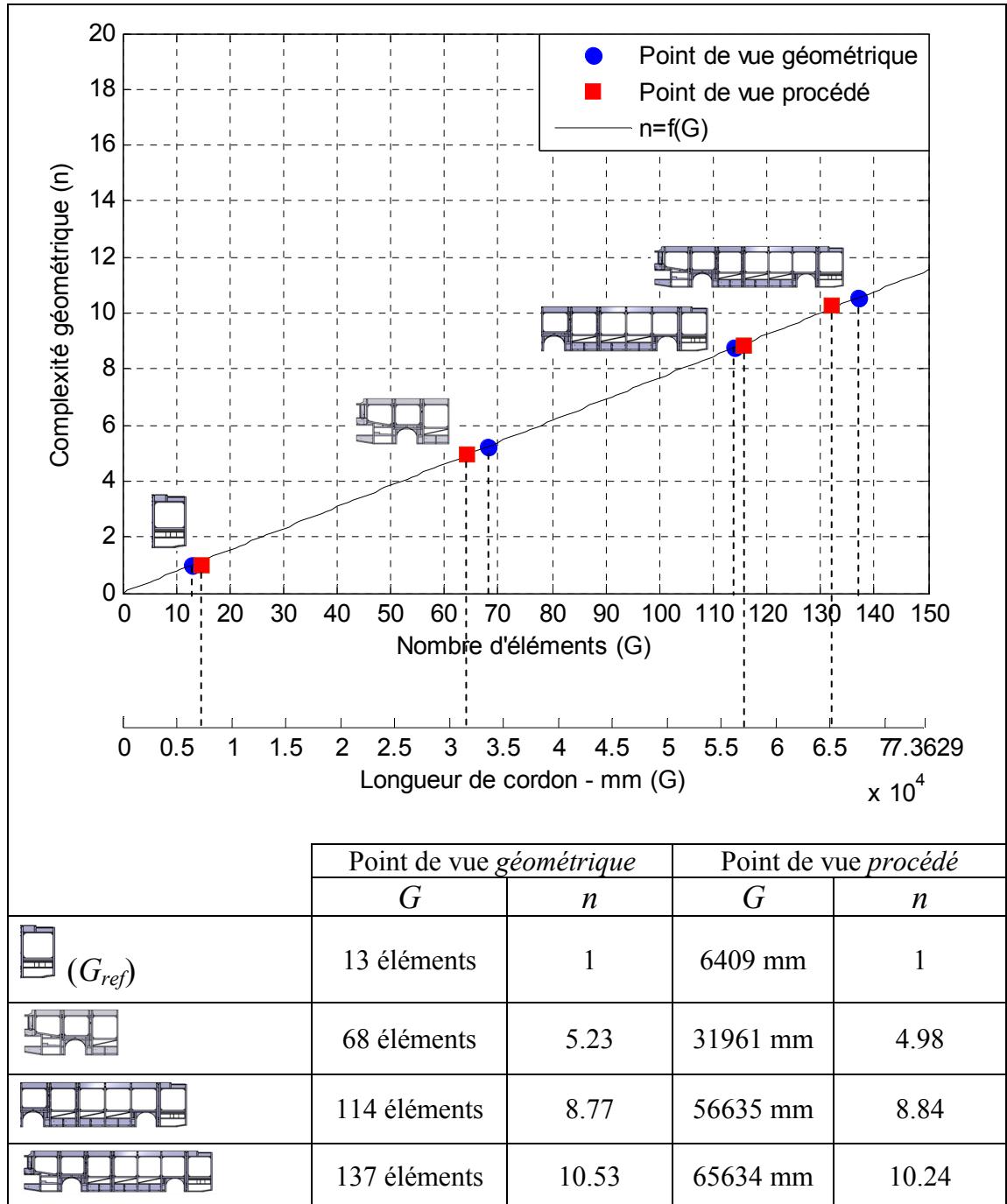
En considérant cette corrélation et l'hypothèse émise précédemment qui stipule que l'erreur de fabrication des composants primaires est faible et négligeable en comparaison aux effets engendrés par l'assemblage (mise en position et soudage), le nombre d'éléments qui compose l'assemblage devient donc une métrique facilement mesurable et qui décrit raisonnablement le degré de complexité.

Du point de vue du procédé, l'augmentation du nombre d'éléments à assembler engendre obligatoirement une augmentation de l'effort ou de l'énergie à fournir. Pour ce cas et de façon

similaire à l'exemple précédent, l'énergie de soudage déployée pour réaliser un assemblage (mesurée en termes de '*longueur du cordon de soudure*') devient un indice de la complexité géométrique.

Pour vérifier notre capacité à estimer la complexité autant du point de vue *géométrique* que du point de vue du *procédé*, une section de mur typique à géométrie relativement simple a été sélectionnée comme élément de référence. Géométriquement parlant, la complexité de cet élément est de $G_{ref} = 13$ éléments, tandis que du point de vue *procédé*, sa complexité est évaluée à $G_{ref} = 6409 \text{ mm}$ de cordon de soudure. Les complexités des trois configurations de structures de mur fabriquées par le PI ont été évaluées relativement à cet élément de référence (Tableau 3).

Tableau 3 Complexité géométrique des structures de mur



4.5 Étude de cas (3): La complexité des surfaces de styles

Comme dernier exemple, nous considérons un procédé d'usinage à trois axes (X, Y, Z) qui met en forme des surfaces de type *freeform*. Pour ce type spécifique d'élément, et tel que soulevé dans la revue littéraire précédemment, il est admis que la *taille* et la *courbure* d'une surface affectent la capabilité du procédé. Comparativement à un élément à géométrie simple, mettre en forme un élément complexe nécessite une trajectoire d'outil plus complexe, plus exigeante pour la machine qui augmente la probabilité d'observer des écarts géométriques importants. Du point de vue strictement géométrique, il devient nécessaire de considérer ces deux caractéristiques pour évaluer la complexité d'un élément. La difficulté dans ce cas précis est de concevoir une métrique G qui permet de tenir compte simultanément des deux caractéristiques.

Pour une surface paramétrique $Q(s, t)$, la courbure κ est une fonction de la position (s, t) . Faire la somme de κ sur un espace paramétrique A de dimension $s \times t$ représente donc la quantité totale de courbure sur cet espace. En référence à la revue littéraire, cette quantité est également connue sous l'appellation de «courbure totale» (Korosec, Balic et Kopac, 2005) ou «d'énergie de surface» (Joshi et Sequin, 2007). Mathématiquement, la somme de κ sur l'espace A s'obtient par:

$$G = \int_A \kappa(A) dA = \int_s \int_t \kappa(s, t) ds dt \quad (4.3)$$

Comme mesures de κ pour une surface, on retrouve en géométrie différentielle plusieurs métriques comme la courbure moyenne (κ_{mean}), la courbure gaussienne (κ_{Gauss}), la courbure absolue (κ_{abs}), etc. Certains types de courbure permettent d'identifier des propriétés surfaciques particulières, par exemple $\kappa_{mean} = 0$ pour une surface minimale et $\kappa_{Gauss} = 0$ pour une surface développable. Pour l'application souhaitée, c'est-à-dire mesurer la courbure totale, la métrique sélectionnée doit permettre de quantifier la courbure en tout point et sans

égard aux propriétés tout juste énoncées. Selon Guid, Oblonsek et Zalik (1995), la courbure absolue (κ_{abs}) répond à ce critère. Elle s'obtient par:

$$\kappa_{abs} = |\kappa_{\max}| + |\kappa_{\min}| \quad (4.4)$$

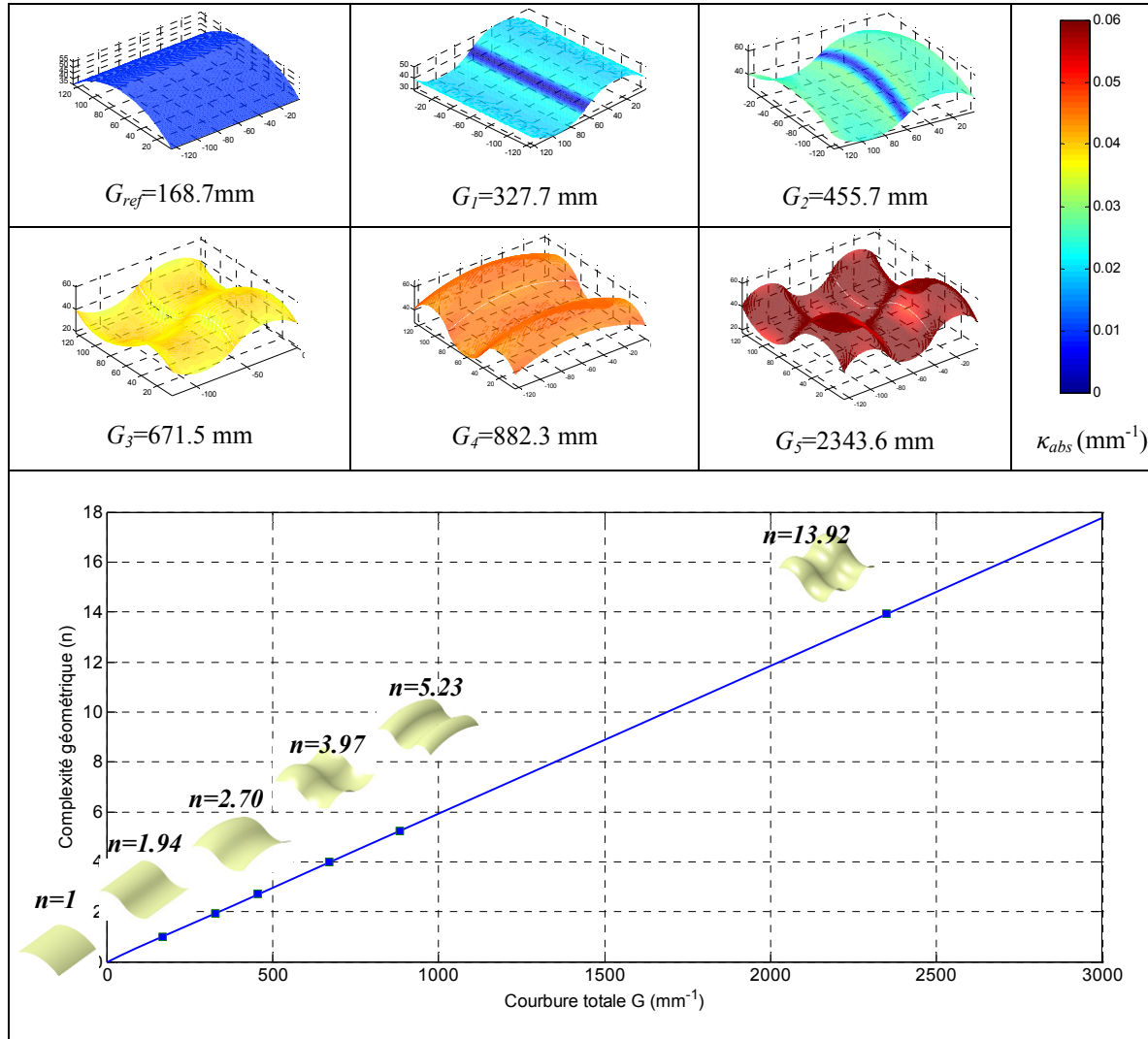
où κ_{\max} et κ_{\min} correspondent aux courbures principales. En combinant les équations (4.3) et (4.4), la métrique G devient:

$$G = \int_A |\kappa_{\max}(A)| + |\kappa_{\min}(A)| dA = \int_s \int_t |\kappa_{\max}(s,t)| + |\kappa_{\min}(s,t)| ds dt \quad (4.5)$$

Selon Joshi et Sequin (2007), et puisqu'il est très difficile d'évaluer analytiquement l'équation (4.5), G s'obtient par intégration numérique. Le principe consiste à mesurer κ_{abs} sur un échantillon de petits éléments surfaciques dA et à déduire la somme numériquement. Le résultat converge vers le résultat analytique lorsque le nombre d'échantillons k est suffisamment grand:

$$G = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^k \kappa_{abs,j} dA_j = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^k \sum_{m=1}^k \kappa_{abs,l,m} ds_l dt_m \quad (4.6)$$

Pour sonder le potentiel de la méthode à classer les éléments de notre exemple en ordre de complexité, six (6) surfaces ont été modélisées sous format paramétrique *B-Spline* (Tableau 4). La surface dont la géométrie apparaissait la plus simple a été sélectionnée comme élément de référence. La valeur de G pour chaque spécimen a été obtenue par l'équation (4.6) selon un échantillonnage uniforme de κ_{abs} sur les surfaces. La taille de l'échantillon k a été augmentée successivement jusqu'à une convergence du résultat $\leq 1\%$.

Tableau 4 Complexité géométrique de *freeforms* en fonction de la courbure totale

Dans le cas où le point de vue *procédé* est adopté, l'énergie déployée par la machine devient un indice de la complexité géométrique. Malheureusement, pour des contraintes de temps, cette portion de recherche ne sera pas effectuée dans le cadre de ce mémoire. Par contre, elle peut représenter une piste potentiellement à explorer lors de futurs travaux.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, un indice qui permet d'exprimer la complexité géométrique de surfaces quelconques a été proposé. En fait, il s'agit d'une généralisation de l'indice présenté par

Tahan et Levesque (2009), où l'indice de complexité n s'obtient par le nombre d'éléments qui composent un ensemble géométrique. Cet indice reflète la difficulté à fabriquer l'ensemble géométrique et s'exprime sur le domaine des entiers naturels ($n \in \mathbb{N}$).

En voulant rendre cet indice applicable à d'autres types d'éléments, que ce soit de type 'discret' (ex. un patron de trous, un ensemble de surfaces, etc.) ou 'continu' (ex. un axe, un plan, une surface *freeform*, etc.), nous avons réalisé que la dimension, ou l'unité, qui permet d'exprimer la difficulté de fabrication (c.-à-d. la complexité) devient propre à chaque type de géométrie. Selon le cas, la complexité G prendra une unité de mesure cohérente au type d'élément (ex. le nombre de trous d'un patron de trou, l'aire d'un plan, la longueur d'un axe, la courbure d'une *freeform*, etc.). Vu la corrélation entre géométrie et procédé, cette quantité peut également être mesurée par l'énergie déployée par le procédé de fabrication (nombre de joints de soudure, longueur de cordon, etc.).

Pour obtenir une échelle cohérente et facilement exploitable, nous devons comparer la complexité G à une référence G_{ref} . Cette dernière, qui se trouve en fait à être une géométrie dont la capabilité est connue, nous permet de distinguer rapidement ce qui est plus complexe ($G > G_{ref}$) de ce qui l'est moins ($G < G_{ref}$). Au final, une transformation $f : G \rightarrow n$ (Figure 4-4) nous permet d'obtenir un indice de complexité n normalisé (adimensionnel), qui permet d'exprimer la difficulté de fabrication des éléments ($n \in \mathbb{N}^+$) et qui peut alimenter un modèle de corrélation avec la capabilité d'un procédé.

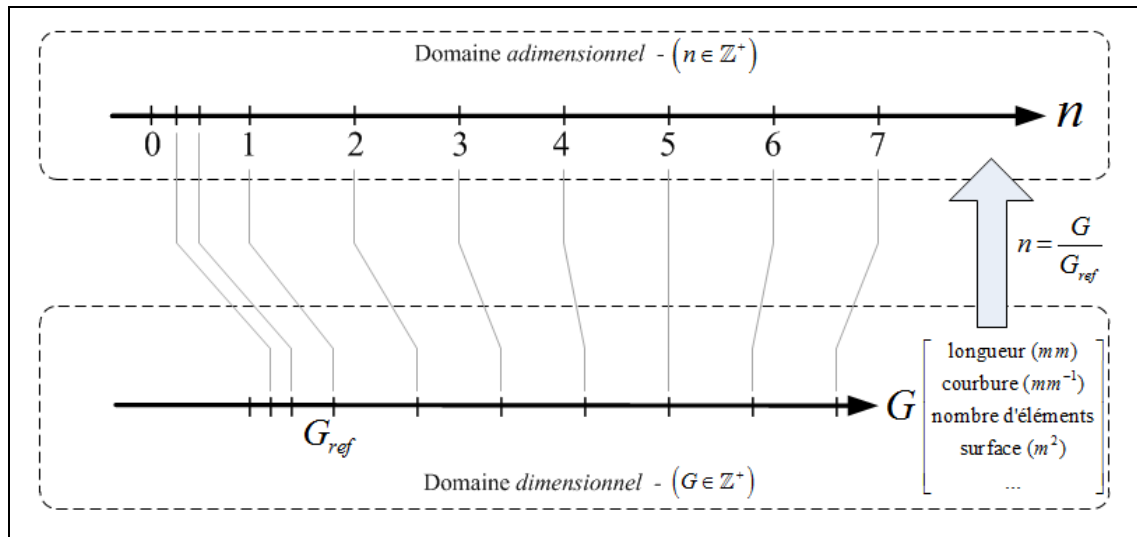


Figure 4-4 Opération de normalisation de la complexité géométrique.

CHAPITRE 5

PROPOSITION D'UN MODÈLE POUR INTÉGRER LA COMPLEXITÉ DANS L'ESTIMATION DE LA CAPABILITÉ DES TOLÉRANCES GÉOMÉTRIQUES DE PROFIL

Ce chapitre présente une extension d'un modèle initialement introduit et développé par Tahan et Levesque (2009) pour l'estimation des indices de capabilité des différentes tolérances de profil. Dans leurs travaux, les auteurs ont proposé l'emploi des statistiques extrêmes pour représenter l'étendue de la zone de tolérance d'un profil (uniquement dans le cas où ce dernier ne possède aucun degré de liberté (DDL)). Dans leur modèle, la notion de 'complexité' est représentée par un scalaire $n \in \mathbb{R}^+$ censé représenter cette dernière. Aucune proposition n'est formulée pour estimer n .

Notre modèle se caractérise principalement par deux aspects. Le premier est son extension vers trois cas typiques de la tolérance de profils (sans blocage de DDL, blocage uniquement des rotations (R_x, R_y, R_z) et blocage complet des 6 DDL). Le deuxième aspect est l'intégration du concept de complexité géométrique déjà développé au CHAPITRE 4, ce qui permet l'extrapolation et l'interpolation de la capabilité d'un procédé de fabrication sur le domaine des géométries réalisables. Ce domaine est défini sur l'intervalle $n \in]0, \infty[$, où $n=1$ correspond à notre géométrie de référence (G_{ref}), $n>1$ aux géométries de plus grandes complexités et $n<1$ aux géométries de complexités plus faibles. L'originalité du modèle réside dans le fait qu'il est en concordance avec notre Hypothèse (1) (voir CHAPITRE 4) qu'un procédé est «très capable» (ex. $C_{pk} > 1.5$) pour un composant à géométrie simple et déficient ($C_{pk} < 1$) pour un composant à géométrie complexe.

5.1 Rôle de l'indice de complexité dans l'estimation de la capabilité

Suite à l'inspection d'un profil de surface, les déviations normales δ_i à la surface théorique représentent les écarts géométriques (c.-à-d. l'erreur de profil) par rapport à une géométrie nominale (Figure 5-1). Ces écarts sont dus à l'incertitude de mesure et aux variations

inhérentes et spéciales du procédé de fabrication. Ils peuvent être modélisés par une fonction de densité de probabilité (PDF). Pour un procédé statistiquement stable (ergodique), les variations spéciales sont négligeables et la PDF représente le comportement inhérent du procédé. En assumant que les écarts sont le résultat de l'addition et de l'influence de plusieurs variables indépendantes, le théorème central limite (Montgomery et Runger, 2010) stipule que la PDF de la variable aléatoire $\delta_i \in \square$ suivra une distribution normale de moyenne μ et de variance σ^2 :

$$f(\delta_i) = N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\delta_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

En poursuivant notre réflexion sur le concept de complexité géométrique entamé au chapitre précédent, on réalise que le fait de reproduire successivement un élément géométrique simple ($n=1$) pour de la mise en forme d'un ensemble géométrique plus complexe ($n>1$) s'apparente, de façon hypothétique, à un tirage aléatoire à n essais indépendants et identiquement distribués (iid), le cas échéant, distribué selon la PDF des écarts géométriques $f(\delta_i) = N(\mu, \sigma)$.

Par cette hypothèse et en connaissant la PDF des δ_i d'un élément géométrique simple ($n=1$) ainsi que l'indice n d'une nouvelle géométrie, le théorème des statistiques d'ordre (David et Nagaraja, 2003) permet d'estimer la probabilité d'observer une déviation «extrême» pour cette nouvelle géométrie. Selon la norme ASME Y14.5 (2009) le résultat d'inspection associé aux différentes tolérances de profils est dicté par cette déviation «extrême».

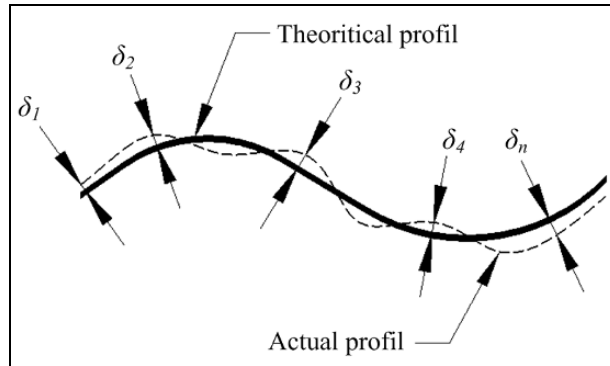


Figure 5-1 Représentation des déviations normales à la surface théorique. Tiré de Levesque (2009).

5.2 La tolérance de profil sans aucun DDL (type 1)

La tolérance de profil sans aucun degré de liberté (DDL), ou tolérance de profil de position assure le contrôle de la position, de l'orientation et de la forme d'un élément surfacique par rapport à un système de référence établi. Avec ce type de tolérance, une surface fabriquée est déclarée conforme lorsque tous les points de mesures \vec{P}_i^{MES} , respectivement associés à une position nominale $\vec{P}_i^{NOM} = (X_i^{NOM}, Y_i^{NOM}, Z_i^{NOM})$ définie par un modèle mathématique (ex. fichier CAD), sont à l'intérieur de deux profils imaginaires distancés l'un par rapport à l'autre de la valeur de tolérance spécifiée. Les degrés de liberté (DDL) $[x, y, z, u, v, w]$ de la pièce sont fixés selon le système de référence comme illustré déjà à la Figure 2-13 de la revue littéraire.

Pour vérifier la conformité d'un profil, les déviations normales à la surface théorique sont d'abord calculées en projetant la distance euclidienne entre les points mesurés et les points nominaux sur l'axe normal à la surface théorique:

$$\delta_i = (\vec{P}_i^{MES} - \vec{P}_i^{NOM}) \cdot \vec{N}_i^{NOM} \quad (5.2)$$

Où \vec{N}_i^{NOM} est le vecteur normal à la surface au point \vec{P}_i^{NOM} .

À partir de ces déviations δ_i , l'écart réel z_{TYPE1} doit être inférieur ou égal à la zone de tolérance spécifiée ($z_{TYPE1} \leq tol_{TYPE1}$). Pour ce type de tolérance, l'écart réel z_{TYPE1} correspond à la valeur maximale des valeurs absolues des déviations multipliée par deux:

$$z_{TYPE1} = 2 * \max |\delta_i| \quad (5.3)$$

Cet écart est illustré à la Figure 5-2 pour une surface développée selon les axes u_1 , u_2 et u_3 de la Figure 2-13.

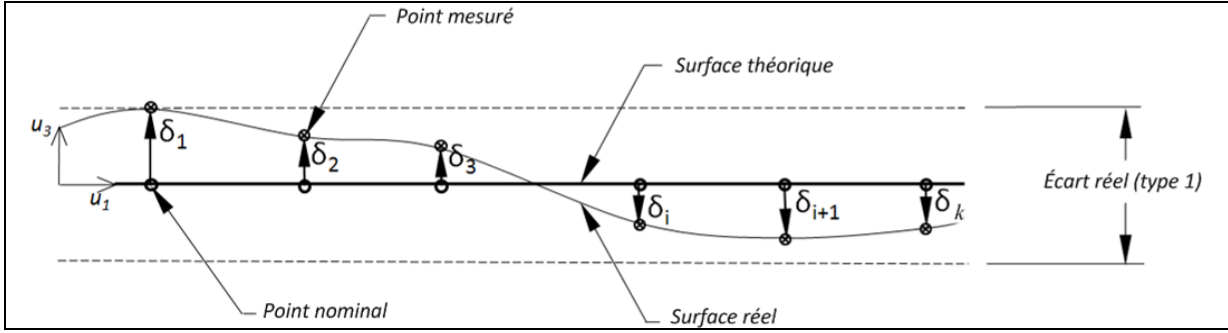


Figure 5-2 Écart réel z_{TYPE1} .

Ce résultat qui permet de juger de la conformité d'un profil de surface peut également être approximé par la valeur maximale des racines carrées des déviations aux carrées¹⁸:

$$z_{TYPE1} \approx 2 * \max \left(\sqrt{\delta_i^2} \right) \quad (5.4)$$

En connaissant la PDF des δ_i pour une géométrie de référence ($n=1$) et en utilisant l'équation (5.4), il est possible de développer la distribution de $z_{TYPE1} \in \mathbb{R}^+$ pour toutes géométries sur le domaine réalisable $n \in]0, \infty[$. Le développement mathématique détaillé est

¹⁸ Notre choix de ce type de formulation mathématique est dicté uniquement pour des raisons de commodité pour les manipulations mathématiques ultérieures.

présenté à l'ANNEXE I. L'expression analytique finale de la PDF de z_{TYPE1} (Eq.(5.5)) est illustrée à la Figure 5-3 pour un cas normalisé avec $f(\delta_i) \square N(0,1)$ et pour différentes valeurs de $n \in \square^+$.

$$f_{z_{TYPE1}}(z_i, n) = \frac{n}{\sigma_\delta \sqrt{\pi} 2^{n+0.5}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} \frac{z_i}{2} + \sqrt{2} \mu_\delta}{2\sigma_\delta} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} \frac{z_i}{2} - \sqrt{2} \mu_\delta}{2\sigma_\delta} \right) \right]^{n-1} \left[e^{\frac{-(\frac{z_i}{2} + \mu_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}} \left(1 + e^{\frac{2\mu_\delta \frac{z_i}{2}}{\sigma_\delta^2}} \right) \right] \quad (5.5)$$

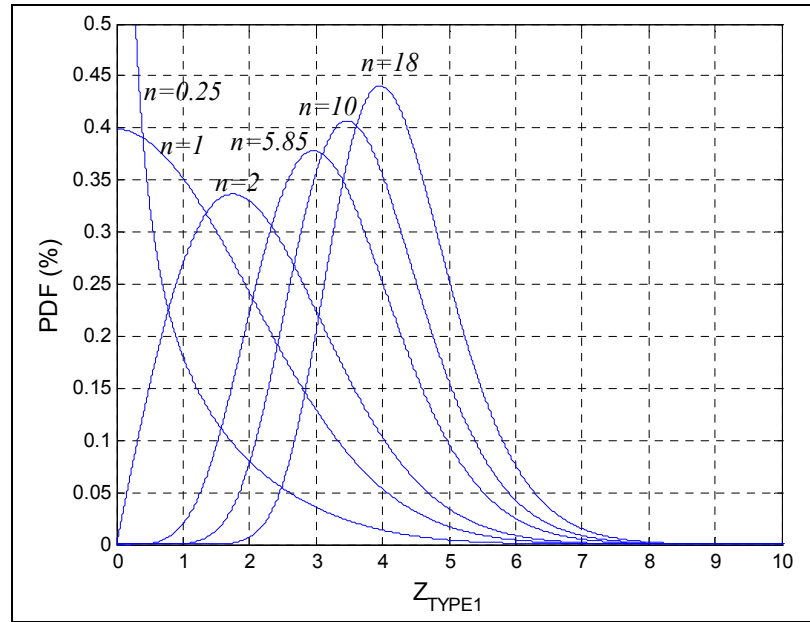


Figure 5-3 Fonction de densité de probabilité $f(z_{type1}, n)$ pour $f(\delta_i) = N(0, 1)$.

La PDF obtenue étant unilatérale, nous rappelons au lecteur que l'équation présentée au CHAPITRE 2 et définie par la norme ISO 22514 (2007) doit être employées pour estimer les indices de capabilité $\hat{C}_{pk}, \hat{P}_{pk}$ pour ce type de distribution :

$$\hat{C}_{pk}, \hat{P}_{pk} = \frac{LTS - \hat{x}_{50\%}}{\hat{x}_{99.865\%} - \hat{x}_{50\%}} \quad (5.6)$$

Où $\hat{x}_{50\%}$ et $\hat{x}_{99.865\%}$ sont des estimateurs des percentiles 0.5 et 0.99865.

En évaluant $x_{50\%}$ et $x_{99.865\%}$ de l'équation (5.6)¹⁹, on peut estimer la tolérance optimale tol_{TYPE1} à appliquer en fonction de la complexité géométrique n et de l'indice de capabilité $\hat{C}_{pk}, \hat{P}_{pk}$ souhaitée (voir Figure 5-4). Des abaques adimensionnels permettent d'extraire les percentiles $x_{\%}$ de la distribution pour différentes valeurs de μ et σ^2 ce qui facilite l'utilisation (Tableau 5 et Tableau 6).

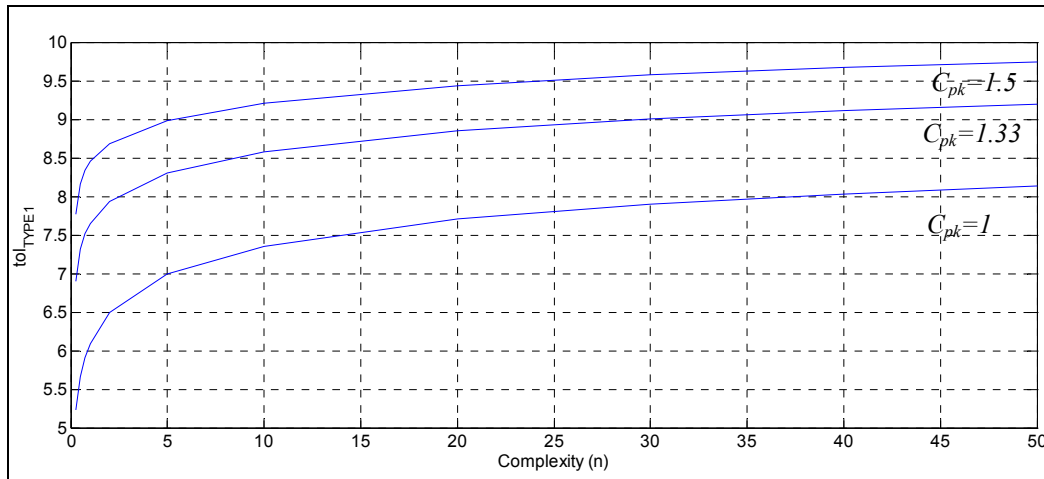


Figure 5-4 tol_{TYPE1} en fonction de C_{pk} et n pour $f(\delta_i)=N(0,1)$.

Tableau 5 Percentiles $x_{50\%}$ pour f_{Ztype1}

$x_{50\%}$	n										
μ/σ	0.25	0.5	0.75	1	2	5	10	20	30	40	50
0	0.16	0.64	1.04	1.35	2.10	3.03	3.66	4.24	4.55	4.76	4.92
0.25	0.16	0.66	1.07	1.39	2.17	3.12	3.77	4.36	4.69	4.91	5.07
0.5	0.18	0.72	1.17	1.52	2.37	3.39	4.08	4.70	5.04	5.27	5.44
0.75	0.21	0.84	1.36	1.76	2.69	3.79	4.52	5.16	5.50	5.74	5.91
1	0.26	1.03	1.65	2.10	3.12	4.26	5.00	5.65	6.00	6.23	6.41
1.5	0.48	1.70	2.49	3.00	4.09	5.26	6.00	6.65	7.00	7.23	7.41
2	1.03	2.65	3.47	3.99	5.09	6.26	7.00	7.65	8.00	8.23	8.41

¹⁹ par intégration numérique

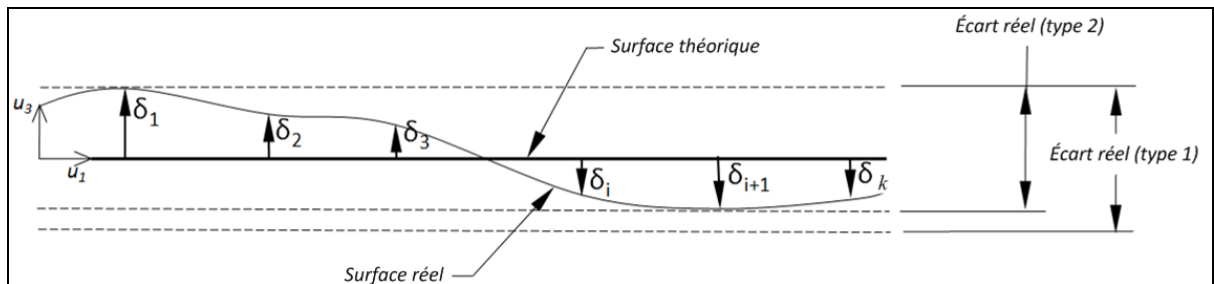
Tableau 6 Percentiles $x_{99.865\%}$ pour $f_{Z_{type1}}$

$x_{99.865\%}$	n										
μ/σ	0.25	0.5	0.75	1	2	5	10	20	30	40	50
0	5.23	5.65	5.91	6.08	6.79	7.28	7.63	7.97	8.16	8.29	8.39
0.25	5.39	5.82	6.08	6.26	6.99	7.48	7.84	8.18	8.38	8.51	8.62
0.5	5.77	6.22	6.49	6.67	7.41	7.92	8.29	8.64	8.83	8.97	9.08
0.75	6.24	6.70	6.97	7.16	7.91	8.42	8.78	9.13	9.33	9.47	9.57
1	6.74	7.19	7.47	7.66	8.41	8.92	9.28	9.63	9.82	9.97	10.07
1.5	7.73	8.19	8.47	8.66	9.41	9.92	10.28	10.63	10.83	10.97	11.07
2	8.73	9.19	9.47	9.66	10.41	10.92	11.28	11.63	11.82	11.97	12.07

5.3 La tolérance de profil avec un blocage de 3 DDL (type 2)

De la même manière que pour la tolérance de type 1, les déviations normales à la surface théorique sont utilisées pour vérifier la conformité d'un profil ayant une tolérance de type 2. Avec ce type de tolérance, seulement les DDL de rotation u , v et w de la pièce sont contraints par le système de référence, ce qui permet un contrôle de la forme et de l'orientation du profil. En comparaison avec la tolérance de type 1, cette tolérance est plus permissive (Figure 5-5). La méthode pour calculer les déviations demeure la même que pour une tolérance de type 1 (voir Eq.(5.2)), mais l'écart réel z_{TYPE2} pour ce type de tolérance est la différence entre la déviation maximale δ_{\max} et la déviation minimale δ_{\min} :

$$z_{TYPE2} = \delta_{\max} - \delta_{\min} \quad (5.7)$$

Figure 5-5 Écart réel z_{TYPE2} .

En utilisant le même théorème des statistiques d'ordre que pour la tolérance de type 1, on peut développer la PDF de z_{TYPE2} pour tout élément $n \in]0, \infty[$. Or, vu la complexité du modèle mathématique (voir ANNEXE II), l'expression analytique finale de cette PDF n'a pu être obtenue d'une manière explicite. Uniquement une solution numérique est envisageable. Pour modéliser la tolérance optimale $tol_{TYPE2} = f(\hat{C}_{pk}, n)$ à appliquer (Figure 5-7), une simulation de Monte-Carlo (MCS) basée sur l'équation (5.7) a été effectuée. Des échantillons de taille S pour δ_{\max} et δ_{\min} ont été générées aléatoirement selon les équations (II.2) et (II.4) de l'ANNEXE II pour une PDF normalisée $f(\delta_i) = N(0, 1)$ et avec comme contrainte $\delta_{\max} \geq \delta_{\min}$. En mettant en ordre croissant l'échantillon de z_{TYPE2} obtenu ($z_{TYPE2,1} \leq z_{TYPE2,2} \leq \dots \leq z_{TYPE2,S}$) le percentile $\hat{x}_{\%}$ correspond à la valeur de rang r si et seulement si r est un entier.

$$r = \frac{S}{100} \times \% + \frac{1}{2} \quad (5.8)$$

Dans le cas où r est un nombre réel, une interpolation linéaire entre les valeurs de rang les plus près $\rho < r < \rho + 1$ est effectuée:

$$\hat{x}_{\%} = \begin{cases} z_{TYPE2,r} & r \in \mathbb{N} \\ z_{TYPE2,\rho} + (z_{TYPE2,\rho+1} - z_{TYPE2,\rho})r - \rho & r \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (5.9)$$

Le nombre de simulations S a été augmenté successivement jusqu'à une convergence des percentiles $\hat{x}_{50\%}$ et $\hat{x}_{99.865\%}$ avec une erreur $\leq 0.5\%$. Une estimation de la densité de probabilité par la méthode de *kernel* (Sprent, 2001) est utilisée pour illustrer les PDF obtenues.

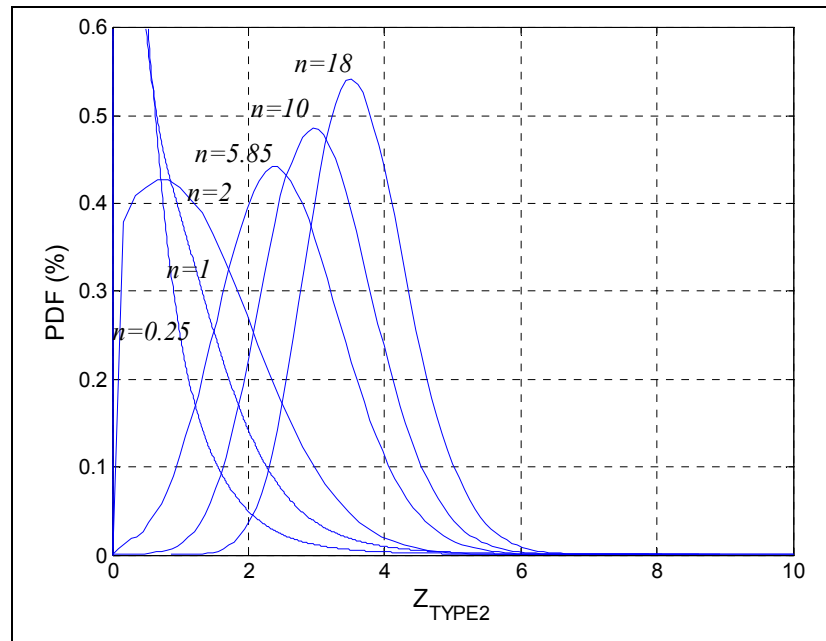


Figure 5-6 Fonction de densité de probabilité $f(z_{TYPE2}, n)$ pour $f(\delta_i) = N(0, 1)$.

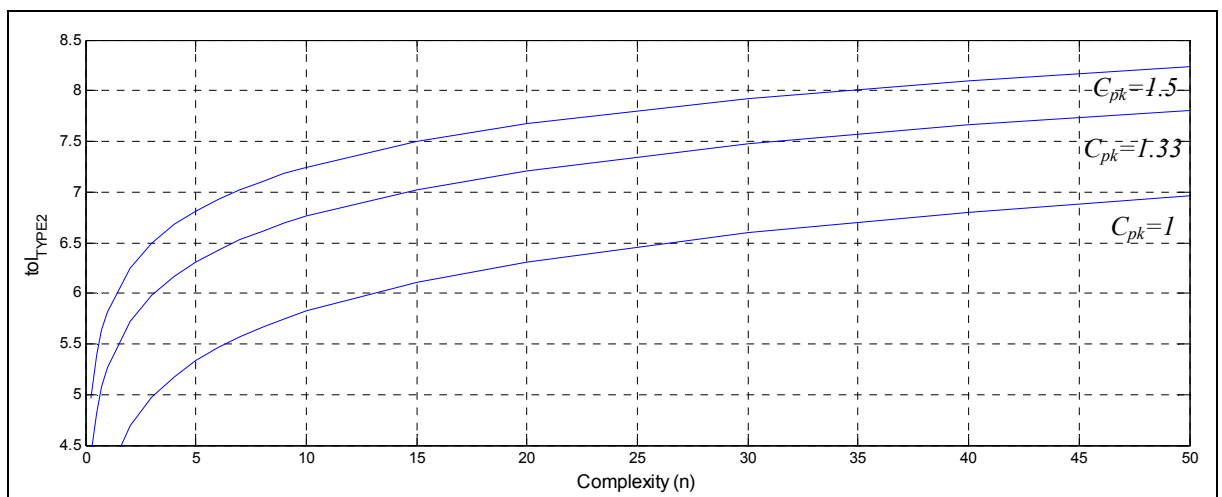


Figure 5-7 tol_{TYPE2} en fonction de C_{pk} et n pour $f(\delta_i) = N(0, 1)$.

Tableau 7 Percentiles $x_{50\%}$ pour f_{Ztype2}

$x_{50\%}$	n										
σ	0.25	0.5	0.75	1	2	5	10	20	30	40	50
0.25	0.08	0.12	0.15	0.19	0.31	0.60	0.79	0.96	1.05	1.11	1.16
0.5	0.17	0.22	0.28	0.35	0.59	1.15	1.54	1.88	2.05	2.18	2.27
0.75	0.25	0.33	0.43	0.52	0.88	1.72	2.28	2.77	3.03	3.22	3.35
1	0.33	0.45	0.57	0.69	1.11	2.29	3.04	3.69	4.04	4.27	4.45
1.5	0.50	0.67	0.85	1.05	1.75	3.44	4.56	5.53	6.07	6.42	6.68
2	0.67	0.90	1.14	1.39	2.35	4.58	6.07	7.38	8.08	8.55	8.90

Tableau 8 Percentiles $x_{99.865\%}$ pour f_{Ztype2}

$x_{99.865\%}$	n										
σ	0.25	0.5	0.75	1	2	5	10	20	30	40	50
0.25	0.83	0.94	1.02	1.06	1.26	1.45	1.56	1.69	1.74	1.79	1.82
0.5	1.61	1.78	1.95	2.04	2.38	2.75	3.01	3.20	3.36	3.44	3.52
0.75	2.46	2.77	2.87	3.05	3.64	4.09	4.45	4.73	4.97	5.10	5.15
1	3.27	3.64	3.93	4.12	4.79	5.44	5.90	6.35	6.59	6.75	6.87
1.5	4.97	5.44	5.84	6.13	7.19	8.19	8.86	9.47	9.84	10.08	10.30
2	6.51	7.23	7.80	8.16	9.54	10.92	11.85	12.65	13.08	13.51	13.72

5.4 La tolérance de profil avec 6 DDL (type 3)

Le dernier type de tolérance de profil (type 3) permet uniquement un contrôle de la forme d'une surface. Ceci implique qu'aucune contrainte n'est appliquée au DDL de la pièce, ce qui fait de ce type de tolérance la plus permissive des trois. La zone de variation z_{TYPE3} s'obtient en calculant l'enveloppe minimum libre de toutes contraintes $[x, y, z, u, v, w]$ et qui contient tous les points de mesures. Pour calculer la valeur d'enveloppe minimum (Figure 5-8), la géométrie nominale (ou surface théorique) doit être associée à l'ensemble des points

mesurés de manière à obtenir la 'meilleure représentation'²⁰ (Bourdet et Mathieu, 1998), appelé également la géométrie substituée²¹ (Barari, ElMaraghy et Knopf, 2007). Selon la norme ASME Y14.5 (2009), le critère à utiliser pour effectuer l'association est le critère de *Chebyshev* (ou encore connu comme le critère *minimax*, voir Bourdet (2007)). Ce dernier consiste à minimiser la déviation maximale qui sépare les points mesurés de l'élément géométrique idéal:

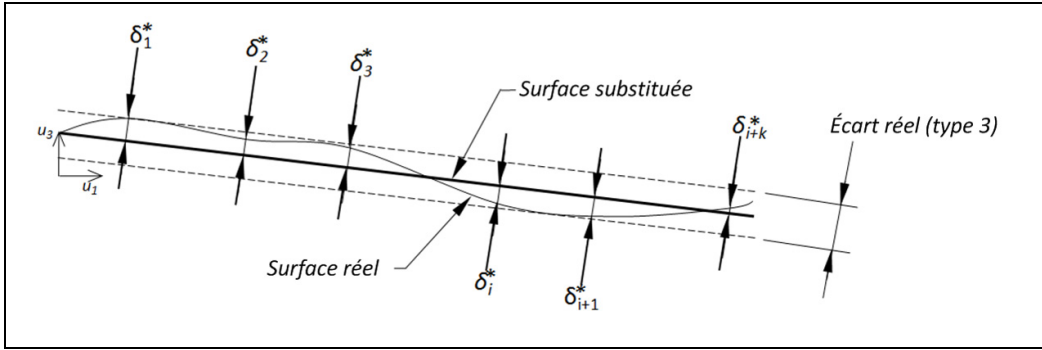
$$\boldsymbol{\theta} = \text{Arg min} \left(\max \left(\left| \delta_i^* (\boldsymbol{\theta}) \right| \right) \right) \quad (5.10)$$

Où $\boldsymbol{\theta} = [x, y, z, u, v, w]$ est le vecteur des trois translations et trois rotations qu'on peut appliquer sur le nuage de points mesurés pour le déplacer selon les DDL illustrés à la Figure 2-13 du CHAPITRE 2. À noter que dans le cadre de nos travaux chez le PI, un algorithme qui permet d'effectuer ce type d'alignement a dû être développé et validé (voir ANNEXE III). Suite à l'alignement, la valeur d'enveloppe minimum s'obtient par la différence des vecteurs δ_{\max}^* et δ_{\min}^* normales à la surface substituée:

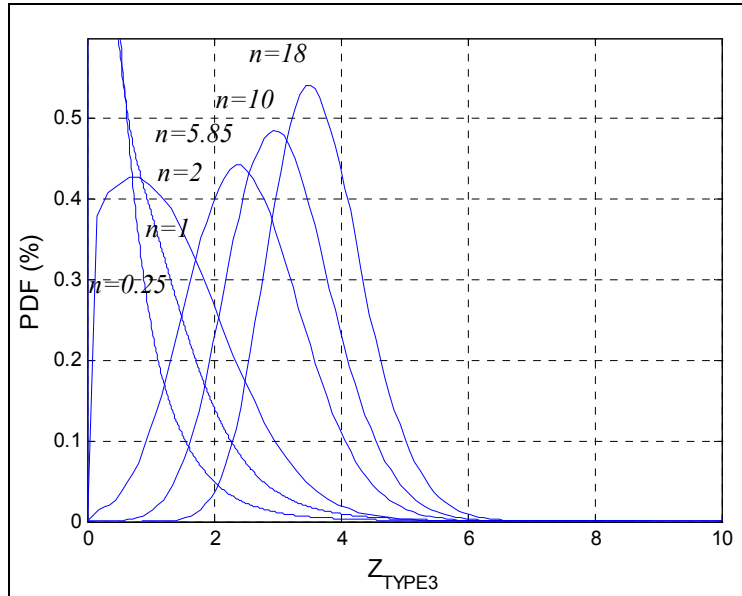
$$z_{TYPE3} = \max \left(\delta_i^* \right) - \min \left(\delta_i^* \right) \quad (5.11)$$

²⁰ En industrie, cette association entre géométrie nominale et points mesurés est connue sous l'appellation de *Best-Fit*.

²¹ De l'anglais *Substitute Geometry*

Figure 5-8 Écart réel z_{TYPE3} .

Puisque les équations (5.7) et (5.11) sont de la même forme, le développement mathématique de la PDF de z_{TYPE3} est identique à celui présenté pour z_{TYPE2} (voir ANNEXE II). La MCS effectuée pour z_{TYPE2} ainsi que les abaques générés deviennent donc également applicables pour z_{TYPE3} . Pour éviter la confusion, le comportement de z_{TYPE3} lorsque $f(\delta_i^*) = N(0, 1)$ est tout de même illustré à la Figure 5-9. La tolérance optimale $tol_{TYPE3} = f(\hat{C}_{pk}, n)$ à appliquer est illustrée à la Figure 5-10.

Figure 5-9 Fonction de densité de probabilité $f(z_{TYPE3}, n)$ pour $f(\delta_i^*) = N(0, 1)$

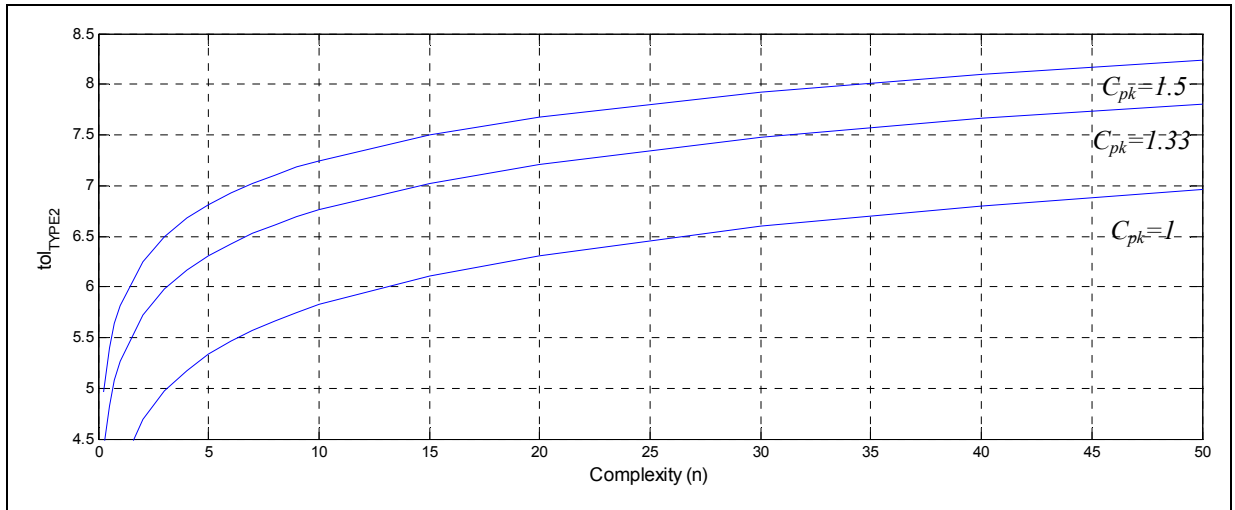


Figure 5-10 tol_{TYPE3} en fonction de C_{pk} et n pour $f(\delta_i^*)=N(0,1)$.

Tableau 9 Percentiles $x_{50\%}$ pour f_{Ztype3}

$x_{50\%}$	n										
σ	0.25	0.5	0.75	1	2	5	10	20	30	40	50
0.25	0.08	0.12	0.15	0.19	0.31	0.60	0.79	0.96	1.05	1.11	1.16
0.5	0.17	0.22	0.28	0.35	0.59	1.15	1.54	1.88	2.05	2.18	2.27
0.75	0.25	0.33	0.43	0.52	0.88	1.72	2.28	2.77	3.03	3.22	3.35
1	0.33	0.45	0.57	0.69	1.11	2.29	3.04	3.69	4.04	4.27	4.45
1.5	0.50	0.67	0.85	1.05	1.75	3.44	4.56	5.53	6.07	6.42	6.68
2	0.67	0.90	1.14	1.39	2.35	4.58	6.07	7.38	8.08	8.55	8.90

Tableau 10 Percentiles $x_{99.865\%}$ pour f_{Ztype3}

$x_{99.865\%}$	n										
σ	0.25	0.5	0.75	1	2	5	10	20	30	40	50
0.25	0.83	0.94	1.02	1.06	1.26	1.45	1.56	1.69	1.74	1.79	1.82
0.5	1.61	1.78	1.95	2.04	2.38	2.75	3.01	3.20	3.36	3.44	3.52
0.75	2.46	2.77	2.87	3.05	3.64	4.09	4.45	4.73	4.97	5.10	5.15
1	3.27	3.64	3.93	4.12	4.79	5.44	5.90	6.35	6.59	6.75	6.87
1.5	4.97	5.44	5.84	6.13	7.19	8.19	8.86	9.47	9.84	10.08	10.30
2	6.51	7.23	7.80	8.16	9.54	10.92	11.85	12.65	13.08	13.51	13.72

5.5 Incertitude associée au modèle

Les capabilités obtenues par le modèle sont théoriques; ces dernières sont tout de même des variables aléatoires et leurs estimations sont entachées par des incertitudes. Le modèle utilise comme intrants les paramètres μ et σ des PDF $f(\delta_i)$ et $f(\delta_i^*)$. Or, en pratique, ces paramètres ne peuvent être calculés de manière exacte, leurs estimateurs (\bar{X} et s) doivent être utilisés. En statistiques, l'erreur associée à l'estimation de μ et σ s'exprime par des intervalles de confiance (Montgomery et Runger, 2010). Pour une population à variance inconnue, ces intervalles de confiance s'obtiennent par:

$$\bar{X} - t_{\alpha/2, m-1} \frac{s}{\sqrt{m}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, m-1} \frac{s}{\sqrt{m}} \quad (5.12)$$

$$\frac{(m-1)s^2}{\chi_{\alpha/2, m-1}^2} \leq \sigma^2 \leq \frac{(m-1)s^2}{\chi_{1-\alpha/2, m-1}^2} \quad (5.13)$$

Où m correspond à la taille de l'échantillon. Dans notre cas, m représente le nombre total de points de mesure effectués sur une série de pièces.

En utilisant successivement les limites de ces intervalles comme intrants au modèle, il est possible de déterminer l'incertitude résultante à la sortie. Ici, puisque les fonctions $f(z_i)$ sont unilatérales (voir Figure 5-3, Figure 5-6 et Figure 5-9), les limites de confiance d'une capabilité obtenue par le modèle découlent de deux cas bien précis. La première correspond au cas où \bar{X} et s maximisent la capabilité du procédé. Cette limite est définie par la valeur de \bar{X} qui égale ou qui s'approche le plus de zéro et par la valeur de s minimum. Ces deux paramètres seront notés $\bar{X}_{\rightarrow 0}$ et $s_{\rightarrow 0}$.

À l'inverse, la seconde limite correspond aux valeurs de \bar{X} et s qui minimisent la capabilité du procédé. Cette limite est définie par la valeur de \bar{X} la plus éloignée de zéro et par la valeur de s maximum. Ils seront notés $\bar{X}_{\leftarrow 0}$ et $s_{\leftarrow 0}$.

Ainsi, lors de l'utilisation du modèle, par exemple pour calculer une tolérance optimale à appliquer, l'intervalle de confiance associé à cette tolérance pourra être déterminé en considérant, l'un à la suite de l'autre, les deux cas. La procédure est illustrée dans l'exemple d'application qui suit.

5.6 Exemple d'application

Comme fournisseur de pièces usinées, nous désirons construire un guide qui permet à nos clients d'estimer rapidement la capacité de nos procédés de fabrication. Ayant régulièrement des opérations de surfacage à réaliser sur des pièces de différentes géométries, nous décidons d'étudier spécifiquement la capacité de ce procédé à respecter une tolérance de profil avec 6 DDL.

Avec l'expérience acquise au courant des années, nous savons que le risque d'erreur de profil associé à un plan de petite taille est moindre que le risque d'erreur associé à un plan de grande taille. Selon le concept de complexité géométrique présenté au CHAPITRE 4, cette caractéristique géométrique (c.-à-d. la taille mesurée en unité de surface - mm^2 , po^2 , etc.) devient un indice de la complexité pour ce type d'élément. Une pièce fabriquée en série récemment est donc utilisée comme géométrie de référence (G_{ref}).

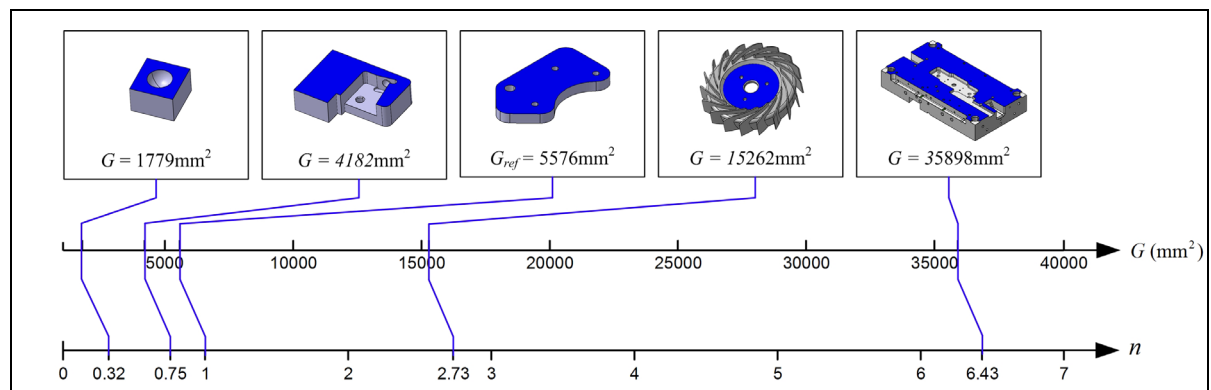


Figure 5-11 Complexité géométrique des surfaces planes.

Avec un échantillon de 15 pièces ayant chacune été inspecté en 10 points de mesure ($m=150$ observations), on estime que l'erreur δ_i^* suit une distribution normale de moyenne $\bar{X} = 3.0^{+2.5}_{-2.5} \mu\text{m}$ et d'écart-type $s = 10.0^{+2.0}_{-1.5} \mu\text{m}$. Le niveau de confiance associé à ces estimations est de 99.73%.

Avec les statistiques obtenues sur δ_i^* , la MCS présentée à la section 5.4 nous permet d'extraire les capabilités ($x_{50\%}$ et $x_{99.865\%}$) du procédé pour différente valeur de n . Pour être confiant à 99.73% que notre procédé atteint réellement ces capabilités, la pire erreur δ_i^* (celle qui minimise la capacité du procédé) sera utilisée. Les limites $\bar{X}_{\leftarrow 0} = 5.5 \mu\text{m}$ et $s_{\leftarrow 0} = 12 \mu\text{m}$ seront donc utilisées comme intrants au modèle.

Finalement, l'équation (5.6) nous permet de calculer la tolérance qui permet d'atteindre, au seuil de 99.73%, un niveau de qualité souhaité (ici, nous utiliserons le seuil $C_{pk} \geq 1.33$) en fonction de n . À titre indicatif, les capabilités du procédé ont également été estimées pour $\bar{X} = 3.0 \mu\text{m}$ et $s = 10.0 \mu\text{m}$ ainsi que pour $\bar{X}_{\leftarrow 0} = 0.5 \mu\text{m}$ et $s_{\leftarrow 0} = 8.5 \mu\text{m}$. Les tolérances obtenues sur le domaine $n \in [0.05, 10]$ sont illustrées à la Figure 5-12.

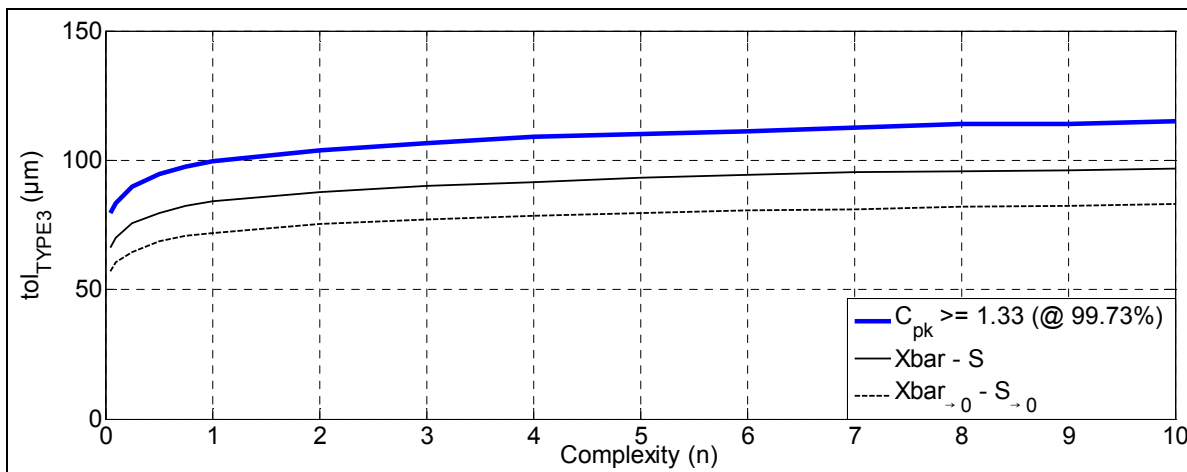


Figure 5-12 Tolérance de profil avec 6 DDL en fonction de la complexité géométrique pour $C_{pk} \geq 1.33$.

5.7 Conclusion

En utilisant comme point de départ la proposition de Tahan et Levesque (2009), nous avons présenté un modèle qui permet d'estimer la capabilité d'un procédé à rencontrer une tolérance géométrique de profil. Ce modèle tient compte des caractéristiques statistiques du procédé (μ et σ), de la complexité géométrique des profils ($n \in]0, \infty[$) et du type de tolérance appliquée (sans DDL, avec 3 DDL, avec 6 DDL).

Au final, des abaques qui permettent d'estimer rapidement une tolérance dite «faisable» peuvent être générés. La propagation de l'incertitude associée aux paramètres μ et σ dans le modèle permet d'associer un niveau de confiance à ces estimations et, par exemple, de garantir un certain niveau de qualité (ex. $C_{pk} \geq 1.33$).

CHAPITRE 6

ESTIMATION DE LA CAPABILITÉ DANS LE CAS D'UN PROCÉDÉ D'ASSEMBLAGES MÉCANO-SOUDÉ

Pour valider le modèle développé, ce chapitre présente deux études réalisées chez le PI. L'objectif est de vérifier qu'il y a bien une corrélation entre les capacités prédites par le modèle et les capacités réelles du procédé d'assemblage mécano soudé et ce, pour les trois types de tolérances de profils. Les données d'inspection des structures d'autocars, recueillis à l'usine de SFDL, nous permettront de faire cette vérification.

Le processus de validation se décline en trois étapes. La première étape se veut une étape d'analyses descriptives du procédé de fabrication du PI. L'objectif ici est de déterminer le comportement du procédé (moyenne, écart-type) et de vérifier sa stabilité. Ensuite, les capacités réelles du procédé à produire différentes géométries seront estimées. Nous pourrons ainsi vérifier qu'il y a bien une dégradation de la capacité en fonction de la complexité géométrique. Finalement, le modèle sera utilisé pour (i) extrapoler la capacité d'une géométrie simple vers une géométrie complexe et (ii) interpoler la capacité d'une géométrie complexe vers une géométrie simple. Une comparaison entre les capacités réelles et prédites permettra de valider le modèle.

6.1 La capacité d'un système d'attaches

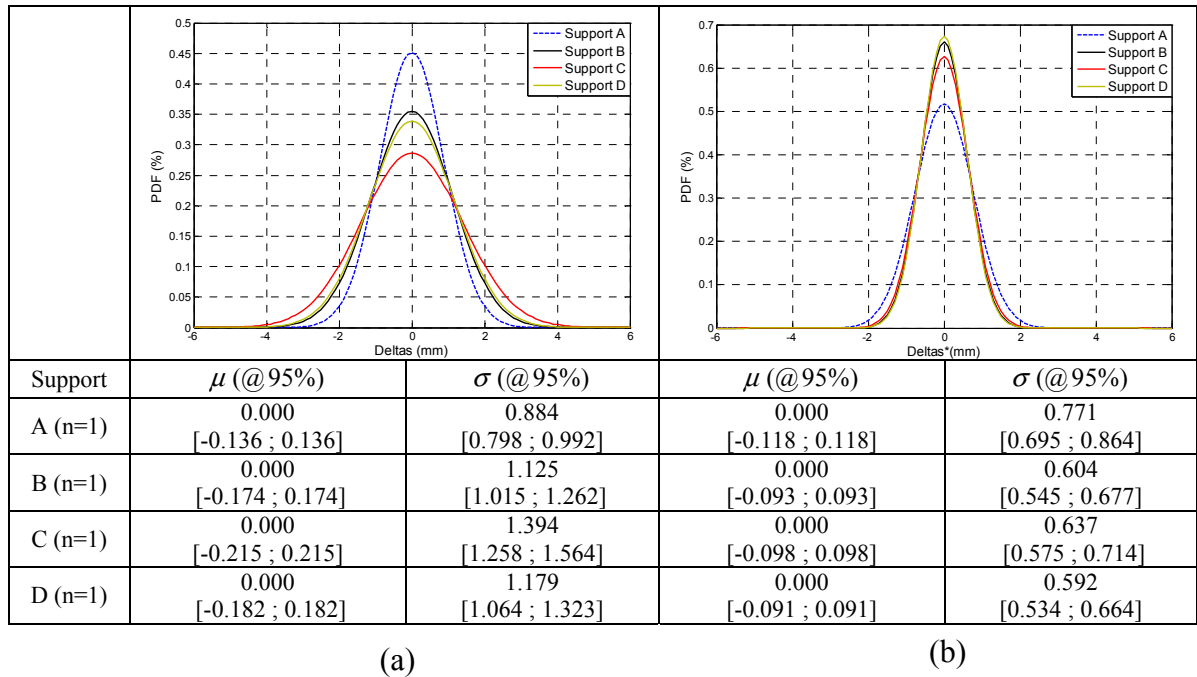
Comme première étude de cas, nous analysons la capacité du procédé à produire le système d'attaches déjà présenté à la section 4.3. On rappelle au lecteur que ce système consiste en un assemblage mécano soudé de $n=4$ supports avec des tolérances de profil sur la position, l'orientation et la forme (voir Figure 3-3). Nous nous intéresserons donc à la capacité du procédé à positionner les supports de manière absolue (c.-à-d. par rapport à un référentiel) et relative (un support par rapport à l'autre).

Le procédé d'assemblage étant le même pour chacun des supports, le modèle développé devrait permettre (i) d'utiliser le comportement de $n=1$ support (c.-à-d. un élément géométrique simple) pour extrapoler la capabilité du procédé lorsque $n>1$ et (ii) d'utiliser le comportement de $n=4$ supports (c.-à-d. un élément complexe) pour interpoler la capabilité du procédé pour $n<4$. Selon les hypothèses émises lors du développement, trois critères sont absolument nécessaires pour assurer la disposition prédictive du modèle:

1. Les densités de probabilité $f(\delta_i)$ et $f(\delta_i^*)$ de l'élément de référence ($n=1$) se modélisent par une distribution normale $N(\mu_\delta, \sigma_\delta)$.
2. L'erreur se comporte comme un tirage aléatoire à n essais indépendants et identiquement distribués (iid).
3. Le procédé de fabrication est stable (ergodique).

6.1.1 Analyse descriptive du procédé

Pour vérifier les critères énoncés, les données d'inspection de 41 assemblages ont été recueillies et analysées. De ces analyses (voir ANNEXE IV), on constate que le comportement des déviations (δ_i et δ_i^*) s'approche bien d'une distribution normale. L'hypothèse de normalité n'ayant été rejetée qu'à deux reprises sur une possibilité de huit, nous considérons ce type de distribution comme un modèle adéquat pour représenter les données. De plus, selon les cartes de contrôle, outre quelques points d'instabilités, le procédé du PI affiche un comportement ergodique. Après correction de l'erreur systématique associée à chacun des supports (voir ANNEXE IV), le comportement des erreurs δ_i et δ_i^* pour $n=1$ est illustré au Tableau 11.

Tableau 11 PDF des déviations de chaque support. (a) PDF des δ_i (b) PDF des δ_i^* 

6.1.2 Analyse des capacités du procédé d'assemblage mécanosoudé

Pour un procédé unilatéral (ce qui est le cas pour les tolérances géométriques de profil), la capacité est définie par les percentiles $x_{50\%}$ et $x_{99,865\%}$ de la fonction de densité du procédé. Ici, une fonction de *Weibull* à trois paramètres est utilisée pour modéliser les distributions de z_{TYPE1} , z_{TYPE2} et z_{TYPE3} (voir ANNEXE IV). La formule pour estimer les percentiles d'une fonction de *Weibull* à trois paramètres (β forme, α échelle et λ décalage) est:

$$x_{\%} = \lambda + \alpha \left(-\ln \left(1 - \frac{\%}{100} \right) \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (6.1)$$

Avec les valeurs de percentiles obtenues, l'indice de capacité C_{pk} est estimé selon l'équation (2.9) pour chaque niveau de complexité. Les intervalles de confiance associés aux estimations de C_{pk} sont calculés selon l'équation tirée de Kotz et Lovelace (1998):

$$\hat{C}_{pk} \left[1 - Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{1}{9k\hat{C}_{pk}^2} + \frac{1}{2(k-1)}} \right] \leq \hat{C}_{pk} \leq \hat{C}_{pk} \left[1 + Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{1}{9k\hat{C}_{pk}^2} + \frac{1}{2(k-1)}} \right] \quad (6.2)$$

La Figure 6-1 illustre l'indice de capabilité C_{pk} obtenu pour chaque géométrie. Nous observons aisément le phénomène de dégradation de la capabilité du procédé en fonction de la complexité géométrique²². À noter ici, puisque les tolérances de profil de type 2 et 3 sont utilisées pour contrôler la relation entre les supports, les capabilités du procédé à rencontrer ces types de tolérances ne sont analysées dans le cas de $n = 1$.

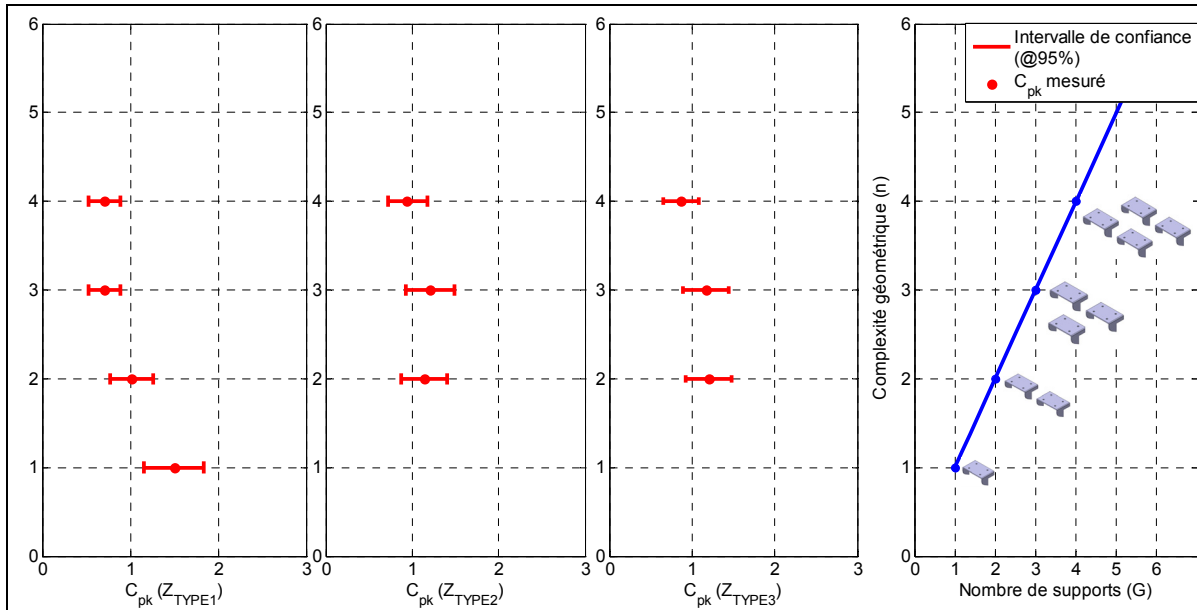


Figure 6-1 Indice de capabilité C_{pk} en fonction du nombre de supports.

²² Sur la figure, ce phénomène s'observe par la tendance des intervalles à se diriger vers la gauche (vers zéro) avec l'augmentation de la complexité.

6.1.3 Extrapolation de la capacité

Connaissant les PDF des erreurs δ_i et δ_i^* pour $n = 1$ support, on utilise les estimateurs \bar{X} et s pour extrapoler les capacités du procédé (ici, suite à une sélection aléatoire, c'est la PDF du support B qui a été utilisée). Avec l'aide de ces capacités ($\hat{x}_{50\%}$ et $\hat{x}_{99.865\%}$), l'indice de capacité C_{pk} est calculé et comparé aux valeurs mesurées de la section précédente. Les intervalles de confiance associés à la moyenne et à l'écart-type (voir Tableau 11) permettent, tel que décrit à la section 5.5, de déterminer l'incertitude associée à l'extrapolation.

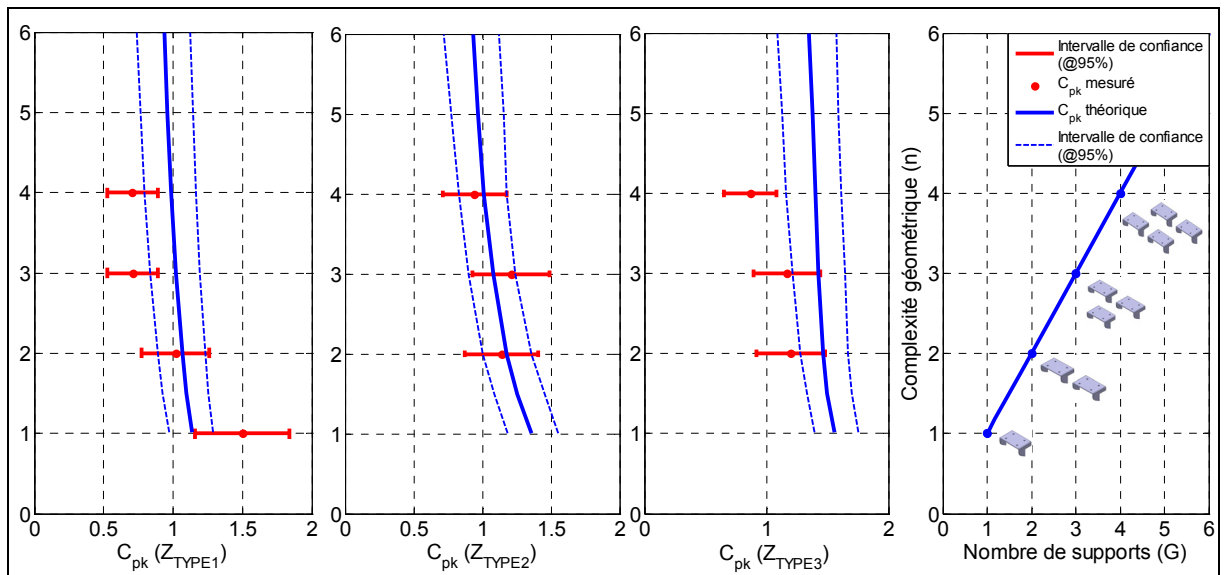


Figure 6-2 Comparatif entre C_{pk} mesurés et C_{pk} théoriques pour l'étude de cas #1 - Extrapolation.

De façon plus directe, les percentiles obtenus par le modèle $\hat{x}_{\%}$ sont comparés aux percentiles réels $x_{\%}$ obtenus par les données recueillies chez le PI (Tableau 12). Le coefficient de corrélation linéaire entre les deux variables atteint 96% ($R^2 = 0.9686$, voir Figure 6-3).

Tableau 12 Résultats pour l'étude de cas #1 - Extrapolation

Complexité	Capabilité	z_{TYPE1}			z_{TYPE2}			z_{TYPE3}		
		Modèle	Réel	Erreur relative (%)	Modèle	Réel	Erreur relative (%)	Modèle	Réel	Erreur relative (%)
$n = 1$	$x_{50\%}$	1.53	2.30	33.5%	N/A			N/A		
	$x_{99,865\%}$	7.22	6.10	18.4%						
$n = 2$	$x_{50\%}$	2.36	2.91	18.9%	1.25	1.75	28.6%	1.04	1.58	34.1%
	$x_{99,865\%}$	7.65	7.92	3.41%	5.30	5.48	3.3%	3.07	3.59	14.5%
$n = 3$	$x_{50\%}$	2.84	3.61	21.33%	1.875	2.31	18.8%	1.18	1.95	39.5%
	$x_{99,865\%}$	7.90	9.81	19.5%	5.70	5.37	6.1%	3.16	3.70	14.6%
$n = 4$	$x_{50\%}$	3.17	3.96	19.9%	2.27	2.61	13.0%	1.32	2.09	36.8%
	$x_{99,865\%}$	8.06	9.67	16.6%	5.97	6.20	3.7%	3.24	4.29	24.5%

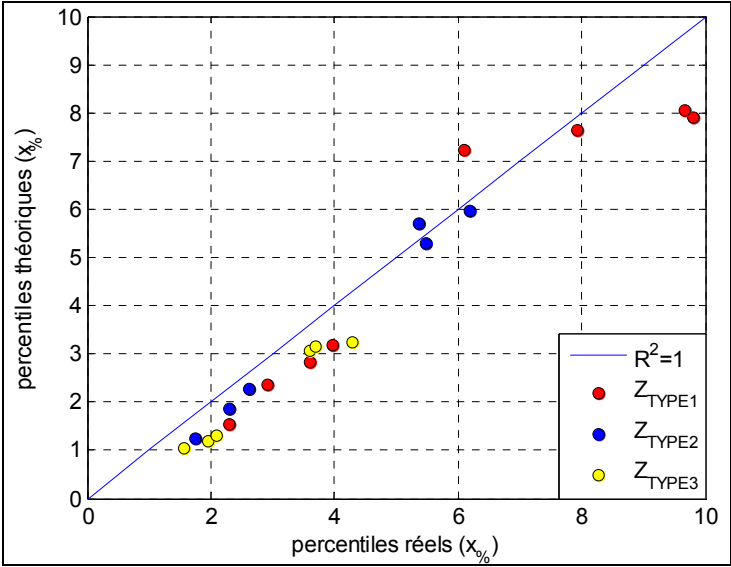
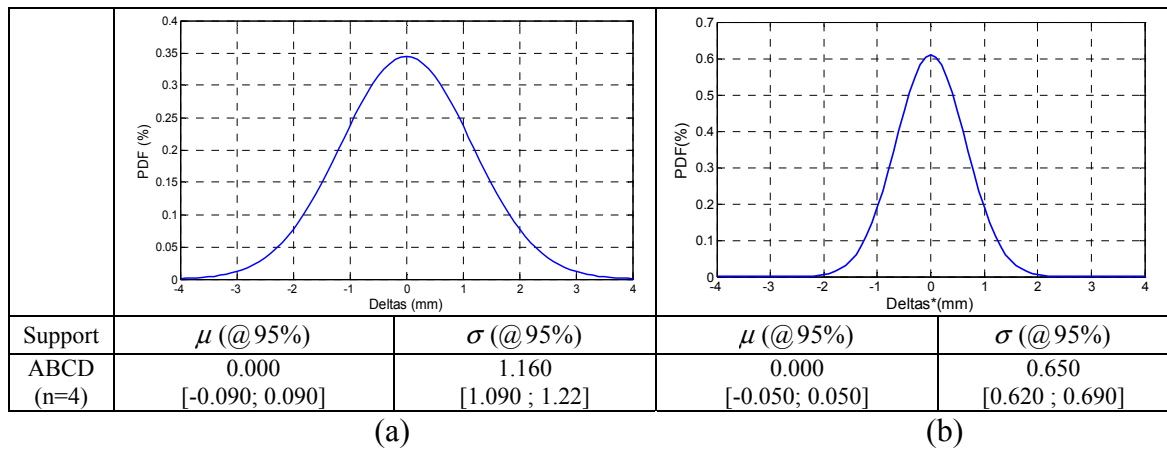


Figure 6-3 Corrélation pour l'étude de cas #1- Extrapolation.

6.1.4 Interpolation de la capabilité

À l'inverse, les PDF des erreurs δ_i et δ_i^* de la géométrie complexe (le cas échéant, $n=4$ supports) peuvent être utilisés pour interpoler la capabilité vers des géométries plus simples. Ces PDF sont illustrés au Tableau 13.

Tableau 13 PDF des déviations de la géométrie complexe (a) PDF des δ_i (b) PDF des δ_i^*



La méthode de validation entre capabilités prédites par le modèle et capabilités mesurées demeure la même que celle de la section précédente. Pour ce cas, le coefficient de corrélation linéaire entre les capabilités mesurées et théoriques atteint 95% ($R^2 = 0.9586$). Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous à la

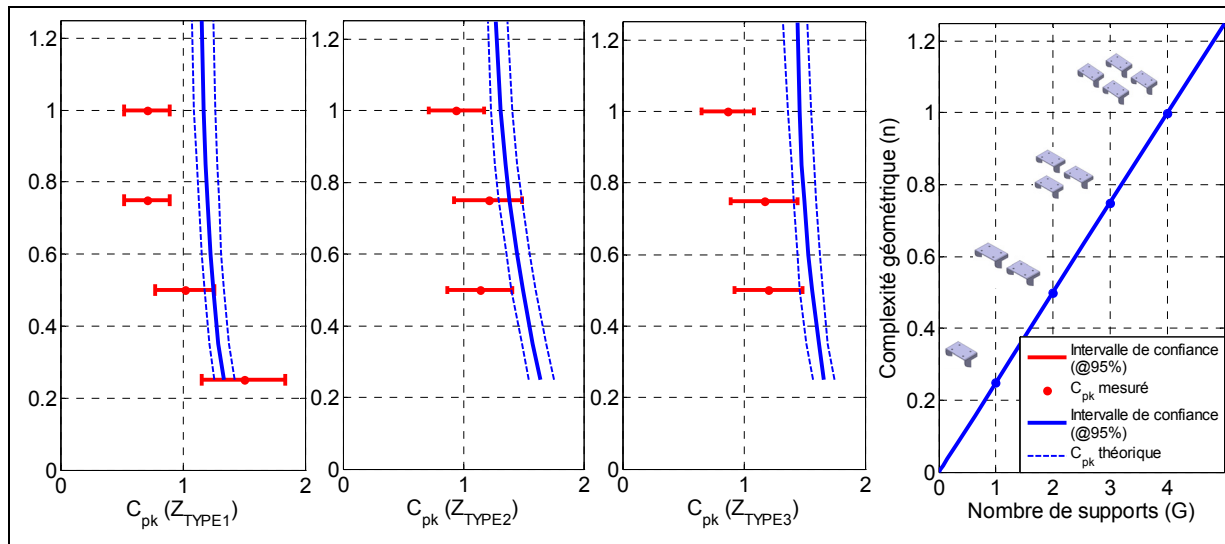


Figure 6-4 Comparatif entre C_{pk} mesurés et C_{pk} théoriques pour l'étude de cas #1 - Interpolation.

Tableau 14 Résultats pour l'étude de cas #1 - Interpolation

Complexité	Capabilité	z_{TYPE1}			z_{TYPE2}			z_{TYPE3}		
		Modèle	Réel	Erreur relative (%)	Modèle	Réel	Erreur relative (%)	Modèle	Réel	Erreur relative (%)
$n = 0.25$	$x_{50\%}$	0.18	2.30	92.1%	N/A			N/A		
	$x_{99.865\%}$	6.03	6.10	1.1%						
$n = 0.5$	$x_{50\%}$	0.74	2.91	74.6%	0.52	1.75	70.3%	0.56	1.58	64.5%
	$x_{99.865\%}$	6.56	7.92	17.2%	4.23	5.48	22.8%	2.75	3.59	23.4%
$n = 0.75$	$x_{50\%}$	1.20	3.61	66.8%	0.66	2.31	71.4%	0.63	1.95	67.7%
	$x_{99.865\%}$	6.85	9.81	30.2%	4.53	5.37	15.6%	2.90	3.70	21.6%
$n = 1$	$x_{50\%}$	1.56	3.96	60.6%	0.80	2.61	69.3%	0.70	2.09	66.5%
	$x_{99.865\%}$	7.06	9.67	27.0%	4.76	6.20	23.2%	2.96	4.29	31.0%

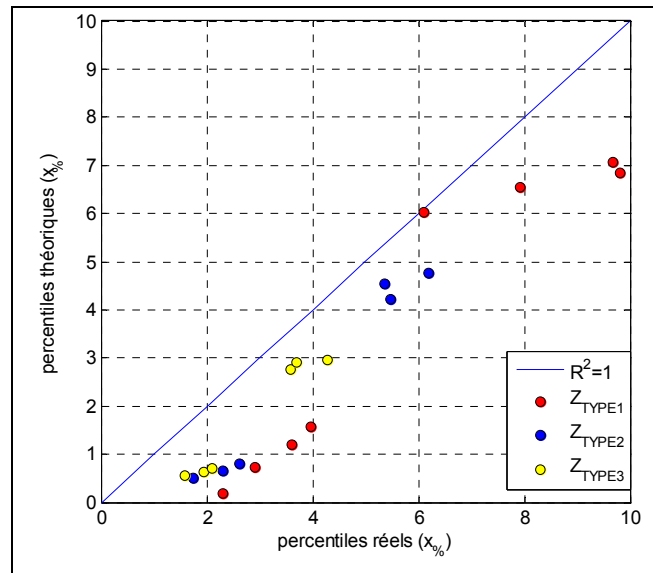


Figure 6-5 Corrélation pour l'étude de cas #1- Interpolation.

6.2 La capacité d'une structure de mur d'autocar

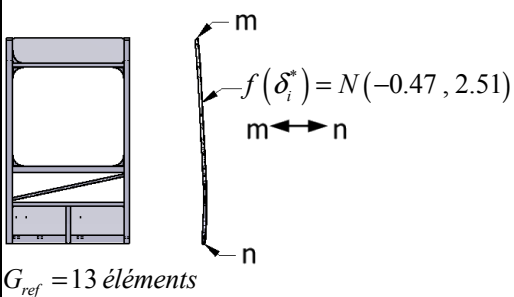
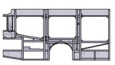


Comme seconde étude de cas, nous analysons l'assemblage mécano-soudé de la structure de mur d'autocar présentée à la section 4.4. Dans l'optique où le manufacturier désire concevoir de nouvelles structures ayant des géométries différentes, nous voulons valider la capacité du modèle à estimer une capacité pour ce type d'assemblage. Les géométries actuellement en production permettront de comparer les capacités réelles ($x_{\%}$), telles que mesurées chez le PI, et les capacités estimées par le modèle ($\hat{x}_{\%}$).

Pour notre étude de cas, chaque géométrie a été mesurée à 18 reprises. Nous considérons le procédé comme *a priori* ergodique. Une tolérance de profil de type 3 (tolérance sans aucune contrainte) de 12 mm sera considérée pour le calcul de l'indice C_{pk} . Le processus de validation est le même que celui adopté à la section 6.1. Il ne sera cependant pas autant détaillé afin d'alléger le texte.

6.2.1 Extrapolation de la capabilité

Avec des données historiques d'une section de mur typique à géométrie simple (Tableau 15), nous voulons extrapoler la capabilité du procédé vers des géométries plus complexes. Après inspection de 18 structures, le comportement des δ_i^* pour la géométrie de référence se modélise par une distribution normale de moyenne $\bar{X} = 0.47^{+0.49}_{-0.49}$ mm (@95%) et d'écart-type $s = 2.51^{+0.40}_{-0.30}$ mm (@95%).

Tableau 15 requis en profil sur les structures de mur d'autocar

 <p>$f(\delta_i^*) = N(-0.47, 2.51)$</p> <p>$G_{ref} = 13 \text{ éléments}$</p>	<p><i>Design #1</i></p>  <p>$\bar{X} = 12$ $\langle ST \rangle$ Cpk $\geq ?$</p> <p>m \longleftrightarrow n</p>					
	<p><i>Design #2</i></p>  <p>$\bar{X} = 12$ $\langle ST \rangle$ Cpk $\geq ?$</p> <p>m \longleftrightarrow n</p>					
	<p><i>Design #3</i></p>  <p>$\bar{X} = 12$ $\langle ST \rangle$ Cpk $\geq ?$</p> <p>m \longleftrightarrow n</p>					
	μ (@95%)	σ (@95%)	$\bar{X}_{\rightarrow 0}$	$s_{\rightarrow 0}$	$\bar{X}_{\leftarrow 0}$	$s_{\leftarrow 0}$
δ^*	-0.45 [-0.94 ; 0.04]	2.51 [2.21 ; 2.91]	0.04	2.21	-0.94	2.91

D'une manière similaire à l'étude précédente, les percentiles $x_{50\%}$ et $x_{99.865\%}$ sont extrapolés pour chaque géométrie en utilisant la PDF de δ_i^* et l'indice de complexité n de chacune des structures. Nous rappelons au lecteur que ces complexités sont évaluées à $n = 5.23$, $n = 8.77$ et $n = 10.53$ (voir CHAPITRE 4).

La Figure 6-6 illustre le comparatif entre les indices mesurés chez le PI et ceux obtenus par le modèle. Le coefficient de corrélation linéaire pour ce cas atteint 89% ($R^2 = 0.8994$) et le comparatif entre percentiles réels ($x_{\%}$) percentiles estimés ($\hat{x}_{\%}$) est effectué au Tableau 16.

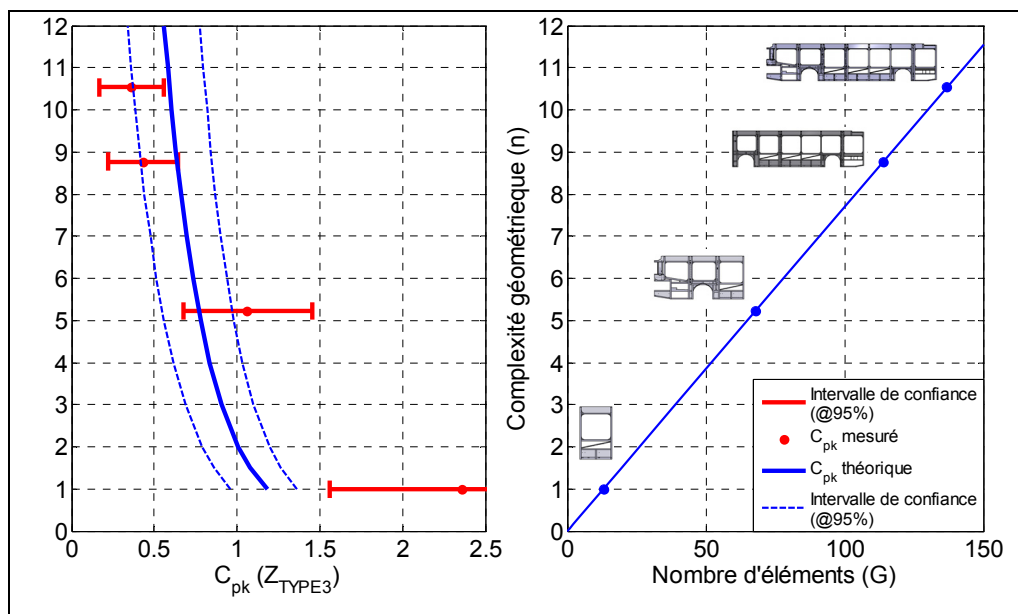


Figure 6-6 Comparatif entre C_{pk} mesurés et C_{pk} théoriques pour l'étude de cas #2 - Extrapolation.

Tableau 16 Résultats pour l'étude de cas #2
- Extrapolation

Complexité	Capabilité	Z_{TYPE3}		
		Modèle	Réel	Erreur relative (%)
$n = 1$	$X_{50\%}$	1.78	5.92	69.9%
	$X_{99.865\%}$	10.61	8.49	24.9%
$n = 5.23$	$X_{50\%}$	5.90	7.25	18.6%
	$X_{99.865\%}$	13.65	11.71	16.6%
$n = 8.77$	$X_{50\%}$	7.59	9.36	18.9%
	$X_{99.865\%}$	14.50	15.46	6.21%
$n = 10.53$	$X_{50\%}$	7.77	10.43	25.5%
	$X_{99.865\%}$	14.61	14.76	1.0%

6.2.2 Interpolation de la capabilité

Dans le cas d'une interpolation de capabilité, la géométrie la plus complexe devient la géométrie de référence (G_{ref}). En réévaluant les complexités géométriques des autres structures selon ce nouveau point de vue, nous obtenons les indices de complexité $n = 0.095$, $n = 0.496$ et $n = 0.832$. La PDF de la variable δ_i^* mesuré sur la nouvelle géométrie de référence se modélise par une distribution normale de moyenne $\bar{X} = 0.47^{+0.27}_{-0.27}$ mm (@95%) et d'écart-type $s = 3.19^{+0.20}_{-0.18}$ mm (@95%). Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

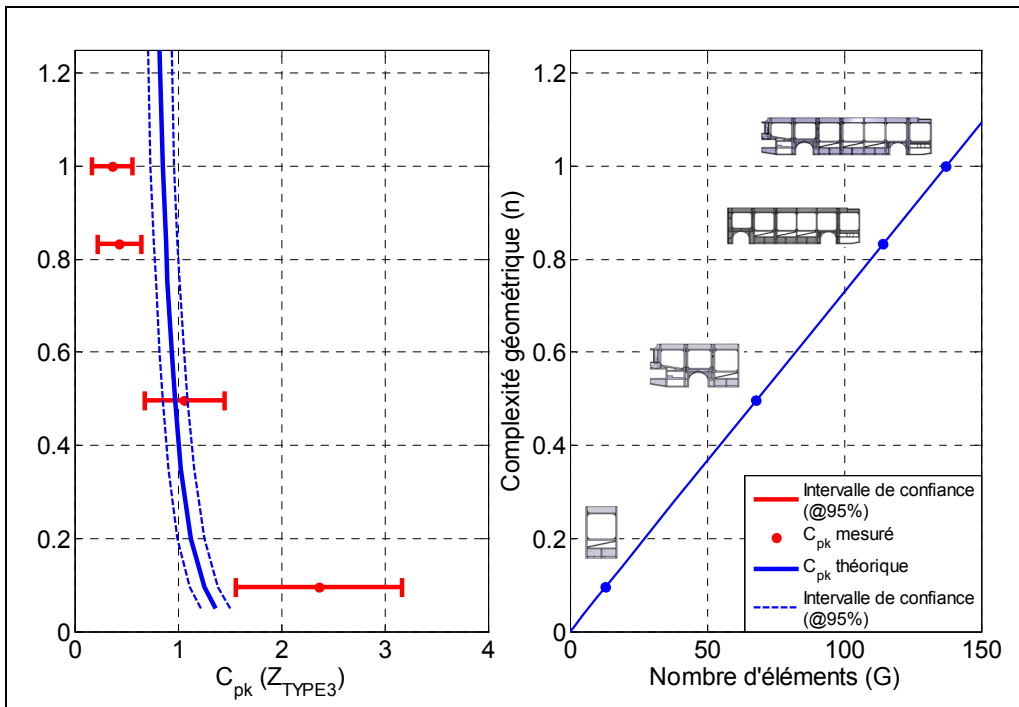


Figure 6-7 Comparatif entre C_{pk} mesurés et C_{pk} théoriques pour l'étude de cas #2 - Interpolation.

Tableau 17 Résultats pour l'étude de cas #2
- Interpolation

Complexité	Capabilité	Z_{TYPE3}		
		Modèle	Réel	Erreur relative (%)
$n = 0.095$	$x_{50\%}$	0.87	5.92	85.3%
	$x_{99.865\%}$	9.91	8.49	16.7%
$n = 0.496$	$x_{50\%}$	1.49	7.25	79.4%
	$x_{99.865\%}$	11.81	11.71	0.9%
$n = 0.832$	$x_{50\%}$	1.90	9.36	79.7%
	$x_{99.865\%}$	12.97	15.46	16.1%
$n = 1$	$x_{50\%}$	2.25	10.43	78.4%
	$x_{99.865\%}$	13.86	14.76	6.1%

6.3 Discussion

Malgré la relative capacité du modèle à prédire les capacités du procédé d'assemblage mécano soudé du PI, il semble que ce dernier soit moins en mesure d'effectuer une interpolation (estimer la capabilité pour $n \leq 1$). En effet, pour l'étude #1, les indices C_{pk} réel et estimé se sont avérés confondus 9 fois sur 10 dans le cas de l'extrapolation comparativement à 6 fois sur 10 dans le cas de l'interpolation. Dans le cas de l'étude #2, on parle de 3 fois sur 4 comparativement à 1 fois sur 4.

En observant les résultats de plus près, on remarque que l'erreur commise provient principalement de l'estimation du percentile 0.5. En se référant aux Tableaux 12, 14, 16 et 17, l'erreur associée à l'estimation de ce percentile atteint une valeur maximale de 92% comparativement à une erreur maximale de l'ordre de 30% pour le percentile 0.99865. Cette erreur liée au percentile 0.5 est dans tous les cas une importante sous-estimation. Par exemple, au Tableau 17 et pour $n = 0.095$, $x_{50\%}$ vaut 0.87 dans le cas de l'estimation du modèle comparativement à une valeur mesurée de 5.92.

Après réflexion et en considérant le modèle tel que construit dans ce mémoire, il semble que ces erreurs soient tout à fait justifiables. En effet, en se reportant aux figures 5-3, 5-6 et 5-9

du CHAPITRE 5, on remarque que la distribution de l'erreur en profil (que ce soit z_{TYPE1} , z_{TYPE2} ou z_{TYPE3}) tendent très fortement vers 0 lorsque $n \leq 1$. En réalité, cela représente une capabilité excessivement bonne, voir inatteignable, et engendre des estimations de $x_{50\%}$ qui tendent vers 0. Une caractéristique importante et tout à fait logique est donc identifiable ici, celle de l'erreur minimale qu'un procédé peut nous fournir. En termes concrets pour nos études de cas, quel est le meilleur assemblage que peut nous fournir le procédé? Tel que présenté dans ce mémoire, le modèle ne tient pas compte de cette considération.

6.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons analysé la capabilité du procédé d'assemblage mécano soudé du PI à produire deux types d'assemblage, soit un système d'attaches et une structure de mur d'autocar. Dans les deux cas, la capabilité du procédé à produire différentes géométries affiche une dégradation en fonction de la complexité géométrique des assemblages.

La méthode proposée dans ce mémoire a donc été utilisée pour modéliser le phénomène, et ce, dans les deux sens. Une extrapolation a permis d'estimer des capabilités pour des géométries plus complexes (dégradation de la capabilité) et inversement, une interpolation a permis d'estimer des capabilités pour des géométries plus simples (amélioration de la capabilité). Pour les deux études de cas réalisées, le modèle affiche clairement une certaine capacité à prédire les capabilités du procédé.

Pour les extrapolations, les indices C_{pk} réel et estimé se sont avérés confondus 9 fois sur 10 pour l'étude #1 et 3 fois sur 4 pour l'étude #2. Ce pointage s'avère très bon considérant le comportement actuel du procédé d'assemblage mécano soudé du PI. Pour les interpolations, on ne peut rejeter la validité du modèle 6 fois sur 10 pour l'étude #1 et 1 fois sur 4 pour l'étude #2. L'idée d'une "erreur minimale" ou de la "meilleure pièce" que peut fournir un procédé de fabrication a été identifiée comme cause qui justifie ces divergences.

CHAPITRE 7

ESTIMATION DE LA CAPABILITÉ DANS LE CAS D'UN PROCÉDÉ D'USINAGE

Comme ajout important aux travaux réalisés chez Nova Bus, ce chapitre présente une étude de cas supplémentaire réalisée au laboratoire LIPPS à l'ÉTS. Le phénomène de dégradation de la capabilité en fonction de la complexité géométrique étant observé sur plusieurs types de procédés, l'objectif ultime est de développer une formulation suffisamment générale pour être appliquées dans d'autres contextes. Ici, nous utiliserons le modèle pour estimer la capabilité d'un procédé d'usinage à produire des surfaces de styles. L'indice de complexité développé au CHAPITRE 4 pour ce type d'élément est exploité pour extrapoler et interpoler la capabilité du procédé.

7.1 Déroulement de l'expérimentation

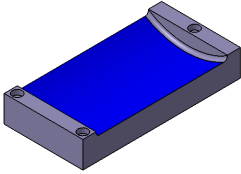
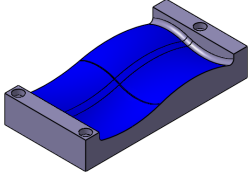
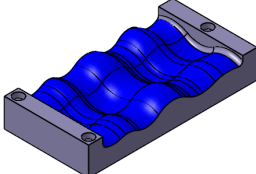
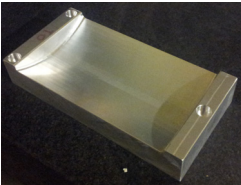
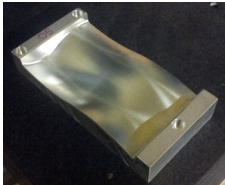

L'expérimentation consiste à fabriquer et inspecter des surfaces de styles de différentes géométries pour en tirer une estimation de la capabilité. Les spécimens devant obligatoirement être fabriqués par le même procédé²³, la géométrie de ces derniers devait tout de même être significativement différente (allant de géométrie simple à complexe) afin d'assurer une dégradation identifiable de la capabilité du procédé. Au final, trois géométries sont modélisées et cinq échantillons par géométrie sont fabriqués et inspectés.

Le matériel utilisé est un brut d'aluminium 6061-T6 de $6 \times 12 \times 3$ po. Ces dimensions ont été choisies en espérant qu'elles sollicitent suffisamment la machine (l'outil de coupe a un espace de 6×12 po. à balayer) et que les effets de distorsion dû à l'enlèvement de matière (*stress relief*) soient minimaux (l'épaisseur de 3 po. assure une certaine rigidité). Les spécimens et leur estimation respective de la métrique G qui permettent d'évaluer la complexité

²³ Nous entendons ici par "*même procédé*" que les pièces ont été usinées par la même machine et selon les mêmes paramètres d'usinage (profondeur de coupe, outil de coupe, montage, etc.), dans la mesure du possible.

géométrique (pour ce type d'élément, il s'agit de la courbure totale, voir CHAPITRE 4) sont présentés au Tableau 18. Les surfaces qui nous intéressent sont mises de couleur bleu pour les mettre en évidence.

Tableau 18 Spécimens usinés pour l'étude de cas #3

	Spécimen 1	Spécimen 2	Spécimen 3
Modèle CAD			
Pièce usinée			
Courbure totale (G)	$G = 252.68 \text{ mm}^{-1}$	$G = 945.54 \text{ mm}^{-1}$	$G = 2781.51 \text{ mm}^{-1}$

Pour la fabrication, une machine-outil à commandes numériques (MOCN) HITACHI-SEIKI® est utilisée. Un montage en étaux a permis de fixer les échantillons à la table de la MOCN (Figure 7-1) et les pièces sont usinées en 5 opérations: usinage des référentiels, dégrossissage, ébauche, semi-finition et finition. Un aperçu des étapes d'usinage est disponible à l'ANNEXE V. La fabrication des échantillons s'est déroulée de façon aléatoire de manière à distribuer l'usure de l'outil de coupe sur les trois géométries et de soustraire tout biais.

Finalement, les pièces sont inspectées par une machine à mesurer les coordonnées (MMT). Un palpage continu sur les surfaces a permis de numériser les échantillons sous la forme de nuages de points (X,Y,Z). Les points de mesures sont distribués sur les surfaces de façon à former un grillage uniforme. Par le fait même, un nombre équivalent de points de mesure est obtenu d'une géométrie à l'autre (on parle de 1183 à 1192 points de mesure par pièce). Le

logiciel d'inspection POLYWORKS[®] est utilisé pour évaluer les erreurs en profil z_{TYPE1} , z_{TYPE2} et z_{TYPE3} . Les résultats d'inspection sont présentés à l'ANNEXE V.

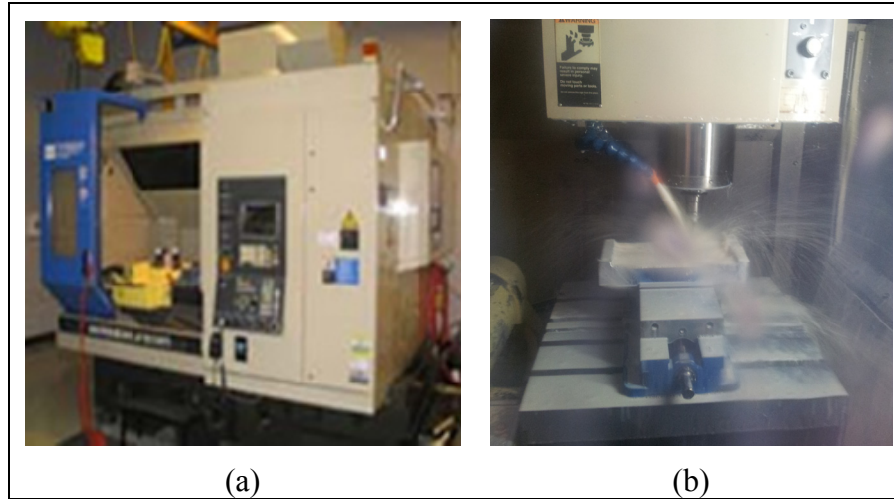


Figure 7-1 (a) Machine-outil (b) Montage utilisé lors de l'usinage.

7.2 Extrapolation de la capabilité

Suite à l'extraction des erreurs δ_i et δ_i^* de la géométrie de référence (ici il s'agit du spécimen #1), le comportement de δ_i se modélise par une distribution normale de paramètres $\bar{X} = 0.055^{+0.083}_{-0.083}$ mm (@95%) et $s = 0.016^{+0.003}_{-0.003}$ mm (@95%). Dans le cas de δ_i^* , on parle de $\bar{X} = 0.000^{+0.002}_{-0.002}$ mm (@95%) et $s = 0.015^{+0.005}_{-0.005}$ mm (@95%). En utilisant les paramètres limites $\bar{X}_{\leftarrow 0}$ et $s_{\leftarrow 0}$ de chaque type d'erreur lors de l'estimation des capabilités du procédé par le modèle, nous sommes confiant à 95% que notre procédé atteint réellement ce niveau de qualité.

Avant de procéder à l'extrapolation, les complexités géométriques G obtenues pour chaque spécimen sont normalisées selon l'équation (4.1). On obtient les indices de complexité $n=1$ pour le spécimen #1, $n=3.74$ pour le spécimen #2 et $n=11.01$ pour le spécimen #3. Les

résultats de l'extrapolation sont illustrés à la Figure 7-2. Sur cette figure, les percentiles 0.99865 estimés par le modèle sont comparés à ceux obtenus par les résultats d'inspection²⁴. Les valeurs maximales mesurées pour chaque géométrie sont également illustrées. L'erreur relative maximale entre percentiles estimés et mesurés est de 32% (Tableau 19).

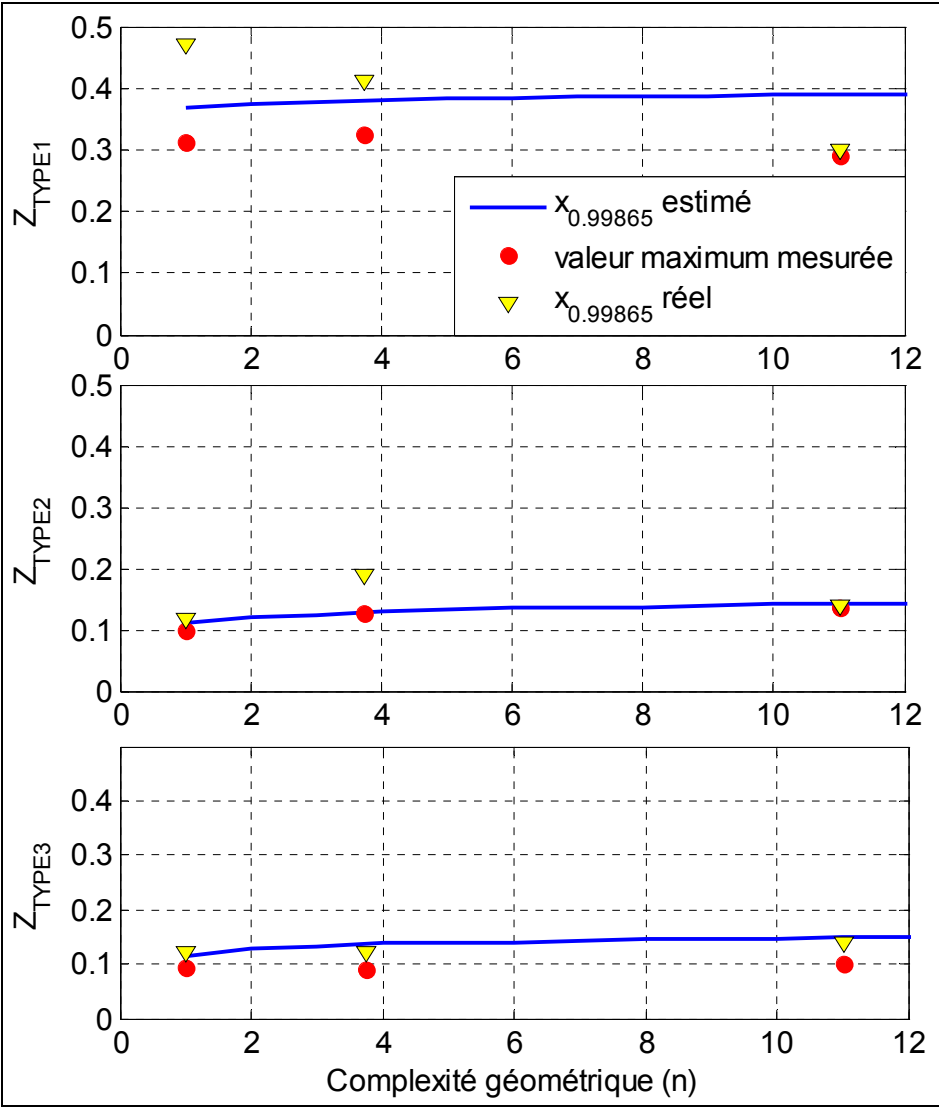


Figure 7-2 Comparatif entre percentiles mesurés et percentiles théoriques - Extrapolation.

²⁴ Ici, une distribution normale a été utilisée pour modéliser les distributions de Z_{TYPE1} , Z_{TYPE2} et Z_{TYPE3} .

Tableau 19 Résultats pour l'étude de cas #3 - Extrapolation

	z_{TYPE1}			z_{TYPE2}			z_{TYPE3}		
Complexité	$x_{99.865\%}$ estimé	$x_{99.865\%}$ réel	Erreur relative (%)	$x_{99.865\%}$ estimé	$x_{99.865\%}$ réel	Erreur relative (%)	$x_{99.865\%}$ estimé	$x_{99.865\%}$ réel	Erreur relative (%)
$n = 1$	0.367	0.478	23.2%	0.101	0.118	14.4%	0.116	0.121	4.1%
$n = 3.74$	0.380	0.407	6.6%	0.128	0.188	31.9%	0.136	0.122	11.5%
$n = 11.01$	0.390	0.300	30.0%	0.142	0.141	0.7%	0.148	0.143	3.5%

7.3 Interpolation de la capabilité

Pour l'interpolation, les indices de complexité sont évalués à $n=1$ pour le spécimen #3 (puisque'il s'agit d'une interpolation, cette géométrie devient la référence G_{ref}), $n=0.34$ pour le spécimen #2 et $n=0.09$ pour le spécimen #1. Les statistiques de l'erreur δ_i sont $\bar{X} = 0.071^{+0.013}_{-0.013}$ mm (@95%) et $s = 0.021^{+0.001}_{-0.001}$ mm (@95%). Pour δ_i^* , ces statistiques sont $\bar{X} = 0.000^{+0.001}_{-0.001}$ mm (@95%) et $s = 0.013^{+0.001}_{-0.001}$ mm (@95%). Évidemment, puisque le modèle ne tient pas compte de la "meilleure pièce" que peut nous fournir le procédé, on s'attend à ce que les capabilités estimées soient meilleures que les capabilités réelles. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 20 et à la Figure 7-3.

Tableau 20 Résultats pour l'étude de cas #3 - Interpolation

	z_{TYPE1}			z_{TYPE2}			z_{TYPE3}		
Complexité	$x_{99.865\%}$ estimé	$x_{99.865\%}$ réel	Erreur relative (%)	$x_{99.865\%}$ estimé	$x_{99.865\%}$ réel	Erreur relative (%)	$x_{99.865\%}$ estimé	$x_{99.865\%}$ réel	Erreur relative (%)
$n = 0.09$	0.281	0.478	41.2%	0.090	0.118	23.7%	0.057	0.121	52.3%
$n = 0.34$	0.302	0.407	25.8%	0.107	0.188	43.1%	0.066	0.122	45.9%
$n = 1$	0.319	0.300	6.3%	0.117	0.141	17.0%	0.072	0.143	49.7%

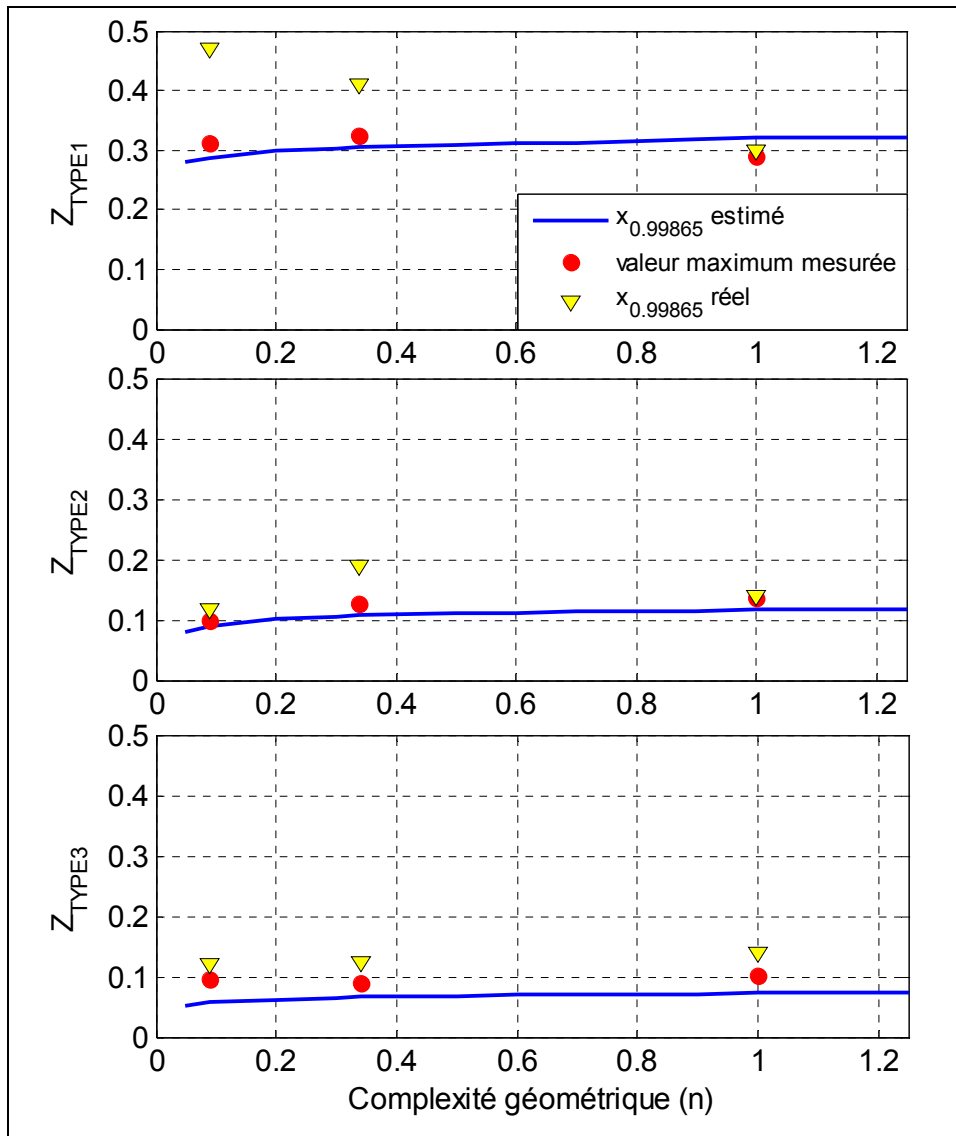


Figure 7-3 Comparatif entre percentiles mesurés et percentiles théoriques - Interpolation.

7.4 Conclusion

Au cours de cette étude supplémentaire, nous avons analysé la capacité d'un procédé d'usinage à produire trois surfaces de styles de géométries différentes. Comparativement aux études de cas du CHAPITRE 6, le phénomène de dégradation de la capacité en fonction de la complexité est ici moins évident à identifier. Le petit nombre d'échantillons usinés (c.-à-d. 5 échantillons par géométries) fait en sorte que l'estimation des capacités réelles du procédé,

exprimées ici par le percentile 0.99865, est incertaine. En effet, il est peu probable que la *pire* erreur ait été observée pour chaque géométrie.

Néanmoins, des résultats intéressants et prometteurs ont été obtenus. Dans le cas de l'extrapolation, 100% des pièces mesurées ont respecté la capabilité prédite par le modèle. L'intention de départ (celle d'être confiant à 95% sur ce que le procédé peu nous fournir) est donc respectée. Dans le cas de l'interpolation, le modèle tend à prédire une capabilité meilleure que la réalité. Deux causes peuvent expliquer cette situation: (i) les statistiques estimées (\bar{X} et s) ne sont pas encore représentative du comportement réel du procédé (taille d'échantillon trop faible) et, (ii) la capabilité maximale du procédé n'est pas respectée par le modèle, tel qu'identifié au CHAPITRE 6.

CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était de développer une méthode qui permet d'estimer la capacité d'un procédé à rencontrer des tolérances géométriques de profil. La méthode devait tenir compte du comportement du procédé, de la complexité géométrique des composants à produire et du type de tolérance de profil (tol_{TYPE1} , tol_{TYPE2} et tol_{TYPE3}). Au final, la méthode devait permettre aux concepteurs d'estimer la capacité d'un procédé dès le stade de conception et d'appliquer des tolérances cohérentes qui assurent la qualité du produit (DFMA). Mathématiquement, l'objectif était d'exprimer la zone de tolérance tol en fonction de l'indice de capacité $C_{p,pk,\dots}$ souhaité, des caractéristiques statistiques du procédé μ, σ et d'un indice n qui exprime la complexité géométrique.

Comme point de départ, nous avons utilisé l'indice de complexité présenté par Tahan et Levesque (2009) et nous avons développé et proposé une généralisation. Selon le type d'élément géométrique à produire (ex. un patron de trou, un axe, un plan, une surface *freeform*, etc.), la complexité s'exprime par une métrique G qui permet de quantifier l'élément en question (ex. le nombre de trous d'un patron de trou, l'aire d'un plan, la longueur d'un axe, la courbure d'une *freeform*, etc.). Cette métrique est propre au type d'élément étudié et peut être mesurée autant du point de vue géométrique que du point de vue du procédé de fabrication (dimension, surface, volume, puissance, énergie, longueur de parcours, courbure, etc.). Par la suite, en s'appuyant sur le théorème des statistiques d'ordres, nous avons proposé une conjoncture: produire un élément géométrique d'une complexité (G) supérieure à celle d'un élément de référence (défini par G_{ref}) engendre inévitablement une augmentation de la probabilité d'erreur. Ainsi, l'augmentation de G occasionnée par la complexification de géométrie est directement liée à la notion de *difficulté de fabrication*. Pour rendre l'indice cohérent, une opération de normalisation $f: G \rightarrow n$ nous permet d'obtenir un indice normalisé (adimensionnel), valide sur le domaine des nombres réels positifs ($n \in \mathbb{R}^+$) et qui s'interprète comme le nombre de fois que l'élément de référence G_{ref} est reproduit. Suite à cette proposition, des indices de complexité pour trois types d'éléments ont été proposés, soit

un ensemble de plusieurs surfaces identiques, un profil de surface de taille variable et un profil de surface de type *freeform*.

En parallèle, un modèle de corrélation avec la capacité de procédé a été développé. Encore une fois, il s'agit d'une extension au modèle initialement proposé par Tahan et Levesque (2009). À partir des définitions de la norme ASME Y14.5 (2009) sur chaque type de tolérance de profil, des développements mathématiques ont permis de dériver la capacité d'un procédé en fonction de son comportement statistique μ, σ et de l'indice de complexité n . Puisque $n \in \mathbb{R}^+$, l'extrapolation et l'interpolation de la capacité devient possible. L'incertitude associée au modèle a également été étudiée.

Pour valider la méthode, deux études effectuées directement chez Nova Bus ont été réalisées. Pour y parvenir, certains travaux ont dû être effectués. D'abord, nous avons mis à jour les stratégies d'inspection des structures d'autocars. Effectuée à l'usine de SFDL, l'inspection dimensionnelle par laser de poursuite requiert que la prise de points de mesure (c.-à-d. le nombre et l'endroit des points de mesure sur les structures d'autocars), que les procédures d'alignement effectuées par le logiciel d'inspection et que les algorithmes de calculs soient valides. Suite à cette vérification, la base de données qui compile les résultats a pu être réinitialisée. Un logiciel (MINITAB[®]) a également été implanté afin de faciliter les analyses statistiques. De plus, malgré qu'elle n'ait pas été présentée dans ce mémoire, une procédure MSA-*Gage R&R* a également été proposée au PI pour valider ses procédures d'inspections. Avec ces outils, l'usine de SFDL devient apte à fournir à l'ingénierie, basée à STE, des estimations fiables de la capacité de son procédé d'assemblage mécano soudé.

Avec les données recueillies à SFDL, les deux études de cas réalisées ont permis de valider partiellement le modèle. En effet, nous avons réalisé que le modèle était très apte à extrapoler une capacité, mais beaucoup moins performant lors d'une interpolation, c'est-à-dire estimer des capacités lorsque $n \leq 1$. Une propriété importante qui explique cette situation a toutefois été identifiée, celle de la capacité limite que peu atteindre un procédé.

Finalement, comme l'objectif ultime était de proposer un modèle suffisamment général pour être appliqué dans d'autres contextes, une étude de cas portant sur un procédé d'usinage a été réalisée. Malgré que les résultats obtenus soient intéressants, une étude plus exhaustive permettrait de renforcer la validité du modèle pour ce type de procédé. Vu les résultats prometteurs obtenus au cours de trois études de cas, un article a été rédigé parallèlement à ce mémoire. Ce dernier, intitulé *Application of Order Statistics in Forecasting Process Capability of Profile Tolerances defined by ASME Y14.5*, sera soumis au journal scientifique *Journal of Quality Technology* pour évaluation.

RECOMMANDATIONS

Comme soulevé lors de la conclusion, une étude plus exhaustive portant sur un procédé d'usinage est souhaitable. Évidemment, cela n'exclut pas la possibilité d'étudier d'autres procédés de fabrication. Néanmoins, nous entendons par plus exhaustive non seulement une augmentation du nombre d'échantillons usinés, mais également du nombre de géométries. Une distinction plus marquée au niveau de la forme des géométries et plus spécifiquement au niveau de leurs tailles permettrait sans doute une meilleure identification du phénomène de dégradation de la capabilité en fonction de la complexité géométrique. De plus, spécifiquement pour les surfaces de type *freeform*, d'autres métriques indicatives de la complexité géométrique devraient être mises à l'essai. Plus particulièrement, le point de vue *procédé de fabrication* devrait être exploré. Dans ce mémoire, il a été mis de côté par faute de temps. Par contre, une piste potentiellement à explorer a été identifiée.

En s'assurant d'un effort de coupe constant (type d'outil, vitesse d'avance, profondeur de passe et largeur de passe), l'expression de la complexité devient une fonction de la trajectoire d'outil utilisé pour balayer la surface. La métrique devrait tenir compte de la longueur totale du parcours de l'outil, du nombre de changements de direction et des effets d'accélération/décélération engendrés par les variations de courbure d'une surface. Dans le domaine de l'usinage par MOCN, plus particulièrement l'usinage à haute vitesse, il existe plusieurs méthodes qui permettent de "*mesurer*" la qualité d'une trajectoire d'outil. Comme exemple, pour une trajectoire donnée, Pechard *et al.* (2009) proposent de faire la somme des carrées des déviations entre surface théorique (modèle CAD) et surface usinée (surface obtenue par la trajectoire de l'outil). Cette mesure agit ensuite comme fonction de coût et permet d'optimiser la trajectoire d'outil (le cas échéant, de minimiser les déviations par un "*best-fit*" de la trajectoire sur la surface).

Comme autre exemple, mais qui devient cette fois intéressant pour notre application, Pechard *et al.* (2009) proposent également de mesurer la régularité totale d'une trajectoire ²⁵. Dans leur cas, cette métrique est utilisée pour minimiser l'effort machine en s'assurant d'un minimum d'irrégularité sur l'ensemble de la trajectoire d'outil. Dans notre cas, il pourrait s'agir d'une métrique potentielle qui permettrait de distinguer une trajectoire complexe d'une trajectoire simple. D'ailleurs, la méthode proposée par Pechard *et al.* (2009) s'apparente à celle que nous avons utilisée pour quantifier la courbure totale d'une surface, mais appliquée aux trajectoires d'outils.

Pour ce qui est du modèle mathématique développé, ce dernier doit être amélioré de manière à tenir compte de la *capabilité limite* d'un procédé. Autrement dit, à un certain point, la capabilité du procédé ne peut plus s'améliorer même pour des géométries excessivement simples. Le défi réside donc sur la manière d'estimer cette capabilité limite. En s'imaginant dans un contexte où une interpolation de capabilité doit être effectuée, les capabilités auxquelles nous aurions accès seraient des capabilités de géométries complexes. L'idéal serait donc d'extraire la capabilité limite du procédé à partir d'une géométrie dite complexe pour l'utiliser comme un intrant au modèle. Lors de la rédaction de ce mémoire, une piste très embryonnaire a été envisagée. Nous l'illustrons ici par une simple mise en situation.

Considérons un ensemble de $n=10$ surfaces identiques et physiquement distinctes. Pour contrôler leur position l'une par rapport à l'autre, une tolérance de profil de type 3 est appliquée. Sachant que chaque surface est dotée d'une erreur $\delta_i^* \Big|_{i \in [1, 10]}$, nous savons que le résultat pour ce type de tolérance correspond à $\delta_{\max}^* - \delta_{\min}^*$. Or, en mettant en ordre croissant les observations ($\delta_1^* \leq \delta_2^* \leq \dots \leq \delta_{10}^*$), la différence $\delta_i^* - \delta_{i-1}^*$ représente l'erreur entre $n=2$ surfaces, soit l'élément géométrique le plus simple pour ce type de requis. En compilant l'erreur entre deux observations de rangs consécutifs, nous devrions obtenir une estimation de

²⁵ De l'anglais: *Smoothness*

la capacité limite du procédé. Cette approche serait à développer et valider lors de futur travaux.

Finalement, nous suggérons à l'usine de Saint-François-du-Lac de poursuivre les travaux initiés. La validation du système de mesures pour l'ensemble des sous-assemblages demeure la première étape à effectuer. Ce n'est qu'à la suite de cette homologation que les données compilées pourront être considérées comme représentatives du procédé de fabrication. Ces dernières permettront d'analyser le comportement du procédé et d'évaluer périodiquement sa capacité à fabriquer différents sous-assemblages. Les données compilées pour un sous-assemblage pourront également servir dans l'éventualité d'un changement de géométrie. La méthode proposée dans ce mémoire permet aux concepteurs d'estimer la capacité et le tolérancement optimal dès le stade de conception.

Pour l'usine de Saint-Eustache, les recommandations émises pour Saint-François-du-Lac sont également applicables, mais, dans ce cas spécifique, ce sera pour les fournisseurs externes (à travers une base de données?). Dès le début du développement d'un nouveau produit, la communication entre l'ingénierie et les fournisseurs est impérative pour satisfaire à toutes les exigences (fonctionnelles, temporaires et monétaires).

Finalement, et comme tout projet de recherche, plusieurs questions demeurent ouvertes et nécessitent des travaux d'analyses et de validation. Des impératifs d'ordre professionnel nous ont obligés à mettre un terme à nos travaux et à produire un rapport. Nous croyons que nous avons répondu *en partie* aux objectifs de ce mémoire. Inévitablement, ses réponses sont partielles, mais une *recherche* n'est-elle jamais terminée?

ANNEXE I

DÉVELOPPEMENT DE LA FONCTION DE DENSITÉ (PDF) POUR UNE TOLÉRANCE DE PROFIL SANS DDL

Le résultat pour une tolérance de profil de position peut être approximé par la valeur maximale des racines carrées des déviations aux carrées:

$$z_{TYPE1} \approx 2 * \max(\sqrt{\delta_i^2}) \quad (I.1)$$

où δ_i est distribué selon une fonction normale ayant $f(\delta_i)$ comme fonction de densité (PDF) et $F(\delta_i)$ comme fonction cumulative (CDF).

$$f(\delta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} e^{-\frac{(\delta_i - \mu_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}} \quad (I.2)$$

$$F(\delta_i) = \Pr(x \leq \delta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} \int_{x=-\infty}^{x=\delta_i} e^{-\frac{(x - \mu_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}} dx = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_i - \mu_\delta}{\sqrt{2}\sigma_\delta} \right) \right) \quad (I.3)$$

À partir de l'équation 10.1 et de la distribution de δ_i , quatre (4) changements de variables sont nécessaires pour obtenir la distribution d'une zone de profil de position:

$$\delta_i \rightarrow \delta_i^2 \rightarrow +\sqrt{\delta_i^2} \rightarrow \max(\sqrt{\delta_i^2}) \rightarrow 2 * \max(\sqrt{\delta_i^2}) \quad (I.4)$$

Selon Papoulis et Pillai (2002) et en posant $x_i = \delta_i^2$, les PDF et CDF pour x_i sont:

$$f_x(x_i) = \frac{1}{2\sqrt{x_i}} \left[f_\delta(\sqrt{x_i}) + f_\delta(-\sqrt{x_i}) \right] = \frac{e^{-\frac{(\sqrt{x_i} + \mu_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}} \left(1 + e^{\frac{2\mu_\delta\sqrt{x_i}}{\sigma_\delta^2}} \right)}{2\sigma_\delta\sqrt{2\pi x_i}} \quad (I.5)$$

$$F_x(x_i) = F_\delta(\sqrt{x_i}) - F_\delta(-\sqrt{x_i}) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{x_i} - \mu_\delta}{\sqrt{2}\sigma_\delta} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{x_i} + \mu_\delta}{\sqrt{2}\sigma_\delta} \right) \right) \quad (I.6)$$

Le second changement de variable consiste à poser $y_i = +\sqrt{x_i}$. Toujours selon Papoulis et Pillai (2002), la PDF pour y_i est:

$$f_y(y_i) = 2y_i f_x(y_i^2) = \frac{e^{\frac{-(y_i + \mu_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}} \left(1 + e^{\frac{2\mu_\delta y_i}{\sigma_\delta^2}} \right)}{\sigma_\delta \sqrt{2\pi}} \quad (I.7)$$

La CDF est obtenue par intégration:

$$F_y(y_i) = \int_0^{y_i} f_y(y_i) dy = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}y_i + \sqrt{2}\mu_\delta}{2\sigma_\delta} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}y_i - \sqrt{2}\mu_\delta}{2\sigma_\delta} \right) \right) \quad (I.8)$$

Pour obtenir la distribution de déviations maximums, on utilise la théorie des statistiques d'ordres (David et Nagaraja, 2003). En classant en ordre croissant un échantillon de n observations, cette théorie permet de dériver les distributions des variables de rang $k, k+1, k+2, \dots, n$, où la variable de rang n correspond à la valeur maximale de l'échantillon. En posant $k = n$, Tahan et Levesque (2009) ont démontré que la distribution de $\max(y_i)$ est:

$$f_{\max}(y_i, n) = n [F_y(y_i)]^{n-1} f_y(y_i) \quad (I.9)$$

En introduisant les équations (I.7) et (I.8), on obtient:

$$f_{\max}(y_i, n) = \frac{n}{\sigma_\delta \sqrt{\pi} 2^{n-0.5}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}y_i + \sqrt{2}\mu_\delta}{2\sigma_\delta} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}y_i - \sqrt{2}\mu_\delta}{2\sigma_\delta} \right) \right]^{n-1} \left[e^{\frac{-(y_i + \mu_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}} \left(1 + e^{\frac{2\mu_\delta y_i}{\sigma_\delta^2}} \right) \right] \quad (I.10)$$

À la base, cette théorie a été formulée en considérant $n \in \mathbb{N}$. Comme extension, Durrans (1992) propose de remplacer n par γ , une variable continue et strictement positive ($\gamma \in \mathbb{R}^+$). Cette substitution permet par exemple de construire l'intervalle de confiance sur la médiane d'un échantillon de taille $n = 4$ (c.-à-d. le 2.5^{ième} rang, voir Stigler (1977) et Hutson (1999)). Dans notre cas, nous conserverons la notation n pour désigner le rang ou le niveau de complexité d'un élément ($n \in \mathbb{R}^+$).

Finalement, la PDF pour une tolérance de profil de type 1 est obtenue en effectuant une transformation linéaire de type $z = ay + b$:

$$f_{Z_{TYPE1}}(z_i, n) = \frac{1}{|a|} f_{\max} \left(\frac{z_i - b}{a}, n \right) \quad (I.11)$$

$$f_{Z_{TYPE1}}(z_i, n) = \frac{n}{\sigma_\delta \sqrt{\pi} 2^{n+0.5}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} \frac{z_i}{2} + \sqrt{2} \mu_\delta}{2 \sigma_\delta} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} \frac{z_i}{2} - \sqrt{2} \mu_\delta}{2 \sigma_\delta} \right) \right]^{n-1} \left[e^{\frac{\left(\frac{z_i}{2} + \mu_\delta \right)^2}{2 \sigma_\delta^2}} \left(1 + e^{\frac{2 \mu_\delta \frac{z_i}{2}}{\sigma_\delta^2}} \right) \right] \quad (\text{I.12})$$

ANNEXE II

DÉVELOPPEMENT DE LA FONCTION DE DENSITÉ (PDF) POUR UNE TOLÉRANCE DE PROFIL AVEC TROIS DDL

Le résultat pour une tolérance de profil d'orientation est obtenu par la différence entre la déviation maximale δ_{\max} et la déviation minimale δ_{\min} :

$$z_{TYPE2} = \delta_{\max} - \delta_{\min} \quad (\text{II.1})$$

Tel que présenté par Tahan et Levesque (2009), les PDF pour δ_{\max} et δ_{\min} sont obtenues en utilisant la théorie des statistiques de rang, où δ_{\min} est la variable de rang $k = 1$ et δ_{\max} est la variable de rang $k = n$. À partir de la distribution des déviations δ_i , les PDF et CDF obtenues sont les suivantes:

$$f_{\max}(\delta_i, n) = n [F(\delta_i)]^{n-1} f(\delta_i) = n \left[\frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_i - \mu_\delta}{\sqrt{2}\sigma_\delta} \right) \right) \right]^{n-1} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} e^{-\frac{(\delta_i - \mu_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}} \right] \quad (\text{II.2})$$

$$F_{\max}(\delta_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\max}(\delta_i) d\delta_i = \frac{-\left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_i - \mu_\delta}{\sqrt{2}\sigma_\delta} \right)\right)^n}{2^n} + 1 \quad (\text{II.3})$$

$$f_{\min}(\delta_i) = n [1 - F(\delta_i)]^{n-1} f(\delta_i) = n \left[1 - \left(\frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_i - \mu_\delta}{\sqrt{2}\sigma_\delta} \right) \right) \right) \right]^{n-1} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} e^{-\frac{(\delta_i - \mu_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}} \right] \quad (\text{II.4})$$

$$F_{\min}(\delta_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\min}(\delta_i) d\delta_i = \frac{\left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_i - \mu_\delta}{\sqrt{2}\sigma_\delta} \right)\right)^n}{2^n} \quad (\text{II.5})$$

Toujours basé sur Levesque (2009), la PDF de z_{TYPE2} est obtenue par convolution des PDF de δ_{\max} et δ_{\min} . Selon Papoulis et Pillai (2002) et pour $z = x + y$, la PDF de z sera égale à:

$$f_z(z_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(z_i - y_i) f_y(y_i) dy \quad (\text{II.6})$$

Où, dans le cas présent, $f_z = f_{Z_{TYPE2}}(z_i, n)$, $f_x = f_{\max}(z_i + \delta_i)$ et $f_y = -f_{\min}(\delta_i) = f_{\min}(-\delta_i)$. La PDF de Z_{TYPE2} est donc la suivante:

$$f_{Z_{TYPE2}}(z_i, n) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\max}(z_i + \delta_i) f_{\min}(-\delta_i) d\delta \quad (II.7)$$

Étant donné la complexité du modèle mathématique, les PDF de Z_{TYPE2} pour et ont été obtenue numériquement.

ANNEXE III

ALGORITHME PERMETTANT L'ASSOCIATION D'UNE SURFACE SELON LE CRITÈRE DE CHEBYSHEV

Suite à l'inspection des structures d'autocar par laser de poursuite, les composants se retrouvent numérisés sous la forme d'un nuage de m points \mathbf{P}^{MES} :

$$\mathbf{P}^{MES} = \begin{bmatrix} X_1^{MES} & Y_1^{MES} & Z_1^{MES} \\ X_2^{MES} & Y_2^{MES} & Z_2^{MES} \\ X_3^{MES} & Y_3^{MES} & Z_3^{MES} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_m^{MES} & Y_m^{MES} & Z_m^{MES} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

Pour vérifier la conformité d'un composant face à une tolérance de profil avec 6 DDL, ce nuage de points doit être aligné sur le modèle nominal, défini ici par un nuage de points nominal \mathbf{P}^{NOM} et par la matrice de vecteurs normaux unitaires à la surface théorique \mathbf{N} :

$$\mathbf{P}^{NOM} = \begin{bmatrix} X_1^{NOM} & Y_1^{NOM} & Z_1^{NOM} \\ X_2^{NOM} & Y_2^{NOM} & Z_2^{NOM} \\ X_3^{NOM} & Y_3^{NOM} & Z_3^{NOM} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_m^{NOM} & Y_m^{NOM} & Z_m^{NOM} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1^x & n_1^y & n_1^z \\ n_2^x & n_2^y & n_2^z \\ n_3^x & n_3^y & n_3^z \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n_s^x & n_s^y & n_s^z \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Afin de quantifier le désalignement entre \mathbf{P}^{MES} et \mathbf{P}^{NOM} , on doit calculer les déviations δ_i^* associées à chacun des points:

$$\delta_i^* = (\mathbf{P}_i^{MES} - \mathbf{P}_i^{NOM}) \bullet \mathbf{N}_i^{NOM} \quad (\text{III.4})$$

L'ensemble des δ_i^* est par la suite regroupé dans un vecteur colonne δ^* . La norme de ce vecteur devient le scalaire qui quantifie le désalignement (Barari, ElMaraghy et Knopf, 2007):

$$L = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\delta_i^*|^p \right]^{1/p} \quad (\text{III.5})$$

Où l'exposant p permet de sélectionner le critère ($p = 2$ pour le critère des moindres carrées et $p = \infty$ pour le critère de *Chebyshev*).

Pour parvenir à minimiser cette fonction de coût, \mathbf{P}^{MES} doit être ajusté au mieux à la géométrie nominale par une matrice de transformation rigide \mathbf{T} . Cette dernière est composée des trois translations x, y, z et des trois rotations u, v, w :

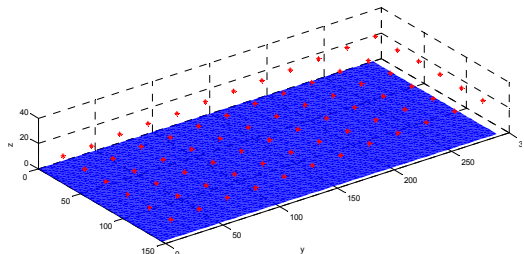
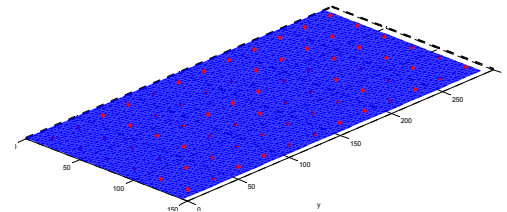
$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos(v)\cos(w) & \cos(w)\sin(u)\sin(v) - \cos(u)\sin(w) & \cos(u)\cos(w)\sin(v) + \sin(u)\sin(w) & x \\ \cos(v)\sin(w) & \cos(u)\cos(w) + \sin(u)\sin(v)\sin(w) & \cos(u)\sin(v)\sin(w) - \cos(w)\sin(u) & y \\ -\sin(v) & \cos(v)\sin(u) & \cos(u)\cos(v) & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

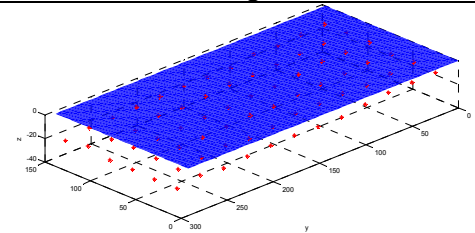
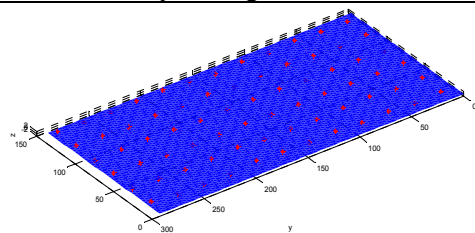
La norme L devient alors une fonction des déplacements u, v, w, x, y, z et du paramètre p . En assemblant les équations (III.4), (III.5) et (III.6), la fonction objective du problème d'optimisation devient:

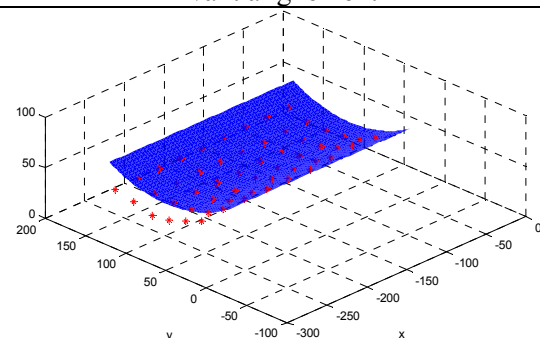
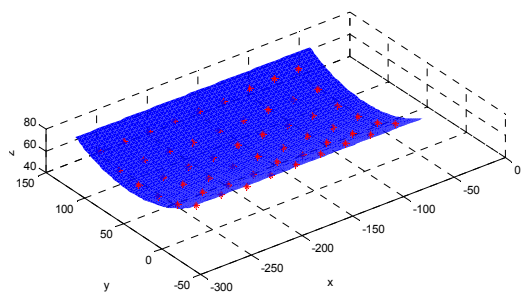
$$Obj = \min \left[\frac{1}{m} \sum_i \left| (\mathbf{P}_i^{\text{MES}} \mathbf{T}^T - \mathbf{P}_i^{\text{NOM}}) \bullet \mathbf{N}_i^{\text{NOM}} \right|^p \right]^{1/p} \quad (\text{III.7})$$

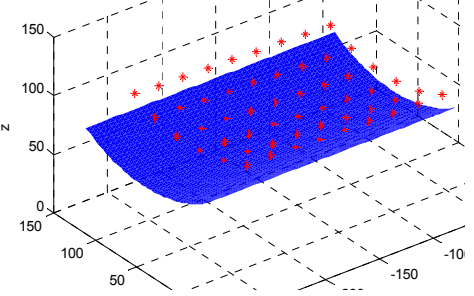
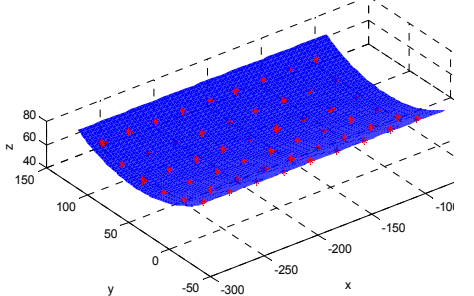
Étant un problème d'optimisation fortement non linéaire, ce dernier peut être résolu par la méthode du simplex de *Nelder-Mead* (Kuo-Hao, 2012). Un algorithme a donc été développé sous MATLAB[®] et validé avant d'être utilisé chez le PI. La validation consiste simplement à générer des erreurs δ_i^* sur différentes géométries et de comparer le résultat obtenu par notre méthode au résultat obtenu avec un logiciel de métrologie capable de respecter les exigences de la norme ASME Y14.5 (2009), c'est-à-dire POLYWORKS[®]. Les résultats obtenus ainsi que l'algorithme sont présentés ci-dessous.

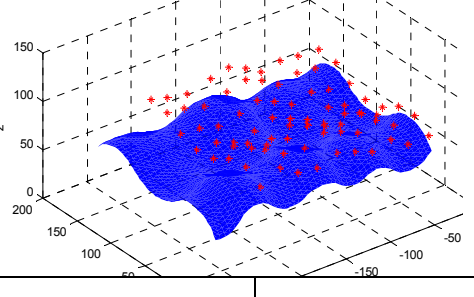
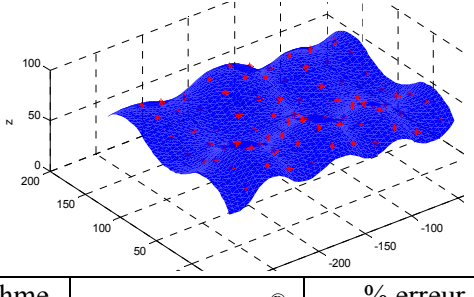
Validation de l'algorithme

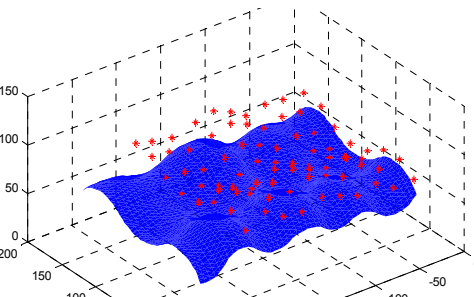
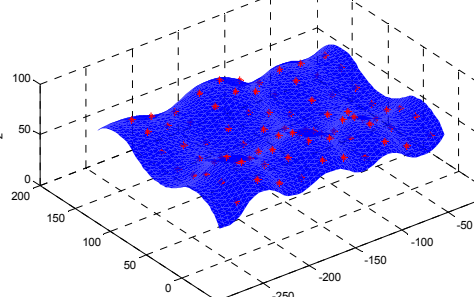
CAS #1				
Avant alignement			Après alignement	
				
Fonction d'erreur	Résultat attendu	Algorithme proposé	POLYWORKS®	% erreur relative
$f(\delta_i^*) = U[0, 1]$	$z_{TYPE3} = 1.000$	0.9950	0.995	0.00%

CAS #2				
Avant alignement			Après alignement	
				
Fonction d'erreur	Résultat attendu	Algorithme proposé	POLYWORKS®	% erreur relative
$f(\delta_i^*) = N(0; 1)$	N/A	3.9040	3.903	0.02%

CAS #3				
Avant alignement			Après alignement	
				
Fonction d'erreur	Résultat attendu	Algorithme proposé	POLYWORKS®	% erreur relative
$f(\delta_i^*) = N(0; 1)$	N/A	4.1654	4.205	0.94%

CAS #4				
Avant alignement		Après alignement		
				
Fonction d'erreur	Résultat attendu	Algorithme proposé	POLYWORKS®	% erreur relative
$f(\delta_i^*) = U[0, 1]$	$z_{TYPE3} = 1.000$	1.0094	0.947	6.59%

CAS #5				
Avant alignement		Après alignement		
				
Fonction d'erreur	Résultat attendu	Algorithme proposé	POLYWORKS®	% erreur relative
$f(\delta_i^*) = U[0, 0.127]$	$z_{TYPE3} = 0.127$	0.1338	0.135	0.88%

CAS #6				
Avant alignement		Après alignement		
				
Fonction d'erreur	Résultat attendu	Algorithme proposé	POLYWORKS®	% erreur relative
$f(\delta_i^*) = N(0; 0.127)$	N/A	0.5143	0.514	0.00%

Programmation MATLAB®

```

%-----
%Alignement selon le critère de Chebyshev - Marc Lépine - 2013
%-----
%Ce programme permet de calculer le résultat d'une tolérance de profil de
%type 3 (sans DDL). Le code est fonctionnel sous MATLAB 7.7.0 (R2008b).
%-----
%PARAMÈTRES INTRANTS:
%La fonction reçoit en entré les matrices Pnom, Nnom et Pmes qui
%correspondent respectivement aux points nominaux, aux vecteurs unitaires
%normaux à la surface théorique et aux points mesurés. Ces matrices sont
%de la forme Pnom=[x1,y1,z1;x2,y2,z3;...xm,ym,zm],
%               Nnom=[n1,n1,n1;n2,n2,n3;...nm,nm,nm],
%               Pmes=[x1,y1,z1;x2,y2,z3;...xm,ym,zm].
%-----
%PARAMÈTRE SORTANT:
%La fonction retourne le résultat Z_3 qui correspond à l'enveloppe libre
%de toutes contraintes [x,y,z,u,v,w] et qui contient tous les points de
%mesure. Cette valeur d'enveloppe s'obtient par max(deltas)-min(deltas).
%-----
function Z_3=Tol_profil_Memoire(Pnom,Nnom,Pmes)

[a,b]=size(Pmes);

%1) Approche initiale du nuage de points théoriques par un «best-fit»
% (critère des moindres carrées):
%Création de la fonction à minimiser:
L2=@(t)Fit(t(1),t(2),t(3),t(4),t(5),t(6),Pmes,Pnom,Nnom,'L2');
options=optimset('TolFun',1E-8,'MaxFunEvals',10E8,'MaxIter',10E8);
%Calcul des déplacements t_L2=[x,y,z,u,v,w] qui minimise la somme des
%distances au carrée:
[t_L2,fval,exitflag_L2] = fminsearch(L2,[0,0,10,0,0,0],options);
%Récupération du nouveau nuage de points
[F_L2,deltas_L2,Pmes]=Fit(t_L2(1),t_L2(2),t_L2(3),t_L2(4),t_L2(5),...
    t_L2(6),Pmes,Pnom,Nnom,'L2');

%2) Ajustement finale du nuage de points théoriques selon le critère de
% Chebyshev
%Création de la fonction à minimiser:
C=@(s)Fit(s(1),s(2),s(3),s(4),s(5),s(6),Pmes,Pnom,Nnom,'Linf');
options=optimset('TolFun',1E-8,'MaxFunEvals',10E8,'MaxIter',10E8);
%Calcul des déplacements t_C=[x,y,z,u,v,w] qui minimise la
%déviati on maximale:
[t_C,fval,exitflag_C] =fminsearch(C,[0,0,0,0,0,0],options);

%3) Récupération des déviations normales à la surface substituée
[C,delta_C,Pmes]=Fit(t_C(1),t_C(2),t_C(3),t_C(4),t_C(5),t_C(6),...
    Pmes,Pnom,Nnom,'Linf');

%4) Calcul de l'enveloppe qui contient tous les points de mesures
Z_3=max(delta_C)-min(delta_C);

end
%-----

```

```

function [F,deltas,Pmes]=Fit(x,y,z,u,v,w,Pmes,Pnom,Nnom,type)

[a,b]=size(Pmes);
deltas(a)=0;

%Remaniement des matrices pour permettre les transformations:
Pnom(:,4)=1;
Nnom(:,4)=1;
Pmes(:,4)=1;

%Déplacement de Pmes par la matrice de transformation T:
Pmes=Pmes*T(x,y,z,u,v,w)';

%Calcul des distances di entre points substitués et points mesurés:
d=Pmes-Pnom;

%Calcul des déviations:
for i=1:a
    deltas(i)=dot(d(i,1:3),Nnom(i,1:3)); %#ok<AGROW>
end

Pmes(:,4)='';

%Calcul de la norme du vecteur delta (selon le critère des moindres
carrées
%ou selon le critère de Chebyshev)
if strcmp(type,'L2') %Selon le critère des moindres carrées
    F=norm(deltas);

elseif strcmp(type,'Linf') %Selon Chebyshev
    F=norm(deltas,inf);

end

end

%-----
function T=T(x,y,z,u,v,w)

T=[cos(v)*cos(w),-cos(u)*sin(w)+sin(u)*sin(v)*cos(w), sin(u)*sin(w)+...
    cos(u)*sin(v)*cos(w), x;
    cos(v)*sin(w), cos(u)*cos(w)+sin(u)*sin(v)*sin(w),-sin(u)*cos(w)+...
    cos(u)*sin(v)*sin(w), y;
    -sin(v), sin(u)*cos(v), ...
    cos(u)*cos(v), z;
    0, 0, ...
    0, 1];
end

```

ANNEXE IV

ANALYSES DES CAPABILITÉS DU PROCÉDÉ D'ASSEMBLAGE MÉCANO-SOUDÉ POUR UN SYSTÈME D'ATTACHES

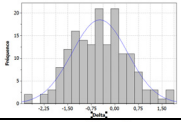
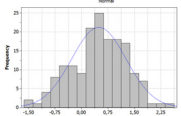
Cette partie présente le détail des différentes analyses qui ont été effectuées pour estimer la capacité réelle du procédé d'assemblage mécano soudé du PI à fabriquer le système d'attaches.

Analyses descriptives des données

Pour effectuer l'analyse de capacité du système d'attaches, les déviations δ_i et δ_i^* de chaque support sont récupérées pour 41 assemblages. L'inspection consiste en 4 points de mesures par support. À l'aide du logiciel MINITAB®, un test de normalité basé sur le critère d'Anderson-Darling est effectué sur les distributions de δ_i et δ_i^* de chaque support. Les hypothèses nulle (H_0) et alternative (H_1) vont respectivement comme suit: H_0 . les déviations δ_i et δ_i^* sont distribuées normalement et H_1 . les déviations ne sont pas distribuées normalement. Le risque d'erreur α est établi à 0.05. Les résultats pour chacun des supports sont présentés au Tableau 21 avec les statistiques descriptives correspondantes²⁶.

Comme seconde analyse, les distributions de l'erreur de chacun des supports sont comparées entrent-elles de manière à vérifier qu'elles sont iid. Pour vérifier que les distributions sont identiques, les intervalles de confiances pour les moyennes et les écarts-types sont reportés sur un graphique (voir Tableau 22 et Tableau 23). Une matrice de nuages de points est utilisée pour vérifier sommairement l'indépendance des données (Tableau 24).

Tableau 21 Analyses descriptives des supports

Support		Histogramme	Statistiques descriptives
A	δ_i		μ (mm) = -0.47528 [-0.6116 ; -0.3390] σ (mm): 0.8839 [0.79745 ; 0.99146] <i>p-value</i> : 0.857
	δ_i^*		μ (mm): 0.4924 [0.3736 ; 0.6113] σ (mm): 0.7706 [0.6953 ; 0.8644] <i>p-value</i> : 0.245

²⁶ Le niveau de confiance associé à ces statistiques est de 95%.

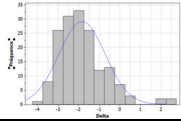
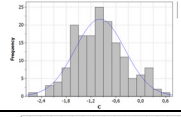
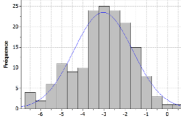
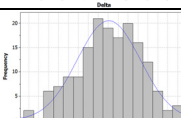
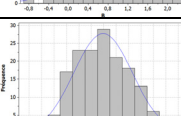
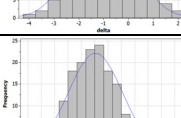
B	δ_i		μ (mm): -1.8358 [-2.0093 ; -1.6622] σ (mm): 1.1254 [1.0154 ; 1.2624] p -value : 0.005
	δ_i^*		μ (mm): -0.9833 [-1.0764 ; -0.8902] σ (mm): 0.6036 [0.5446 ; 0.6771] p -value : 0.205
C	δ_i		μ (mm): -3.0395 [-3.2545 ; -2.8245] σ (mm): 1.3943 [1.2579 ; 1.5640] p -value : 0.01
	δ_i^*		μ (mm): 0.8144 [0.7163 ; 0.9126] σ (mm): 0.6368 [0.5746 ; 0.7143] p -value : 0.595
D	δ_i		μ (mm): -1.0235 [-1.2054 ; -0.8417] σ (mm): 1.1792 [1.0639 ; 1.3228] p -value : 0.358
	δ_i^*		μ (mm): -0.8830 [-0.9743 ; -0.7918] σ (mm): 0.59165 [0.5338 ; 0.6637] p -value : 0.332

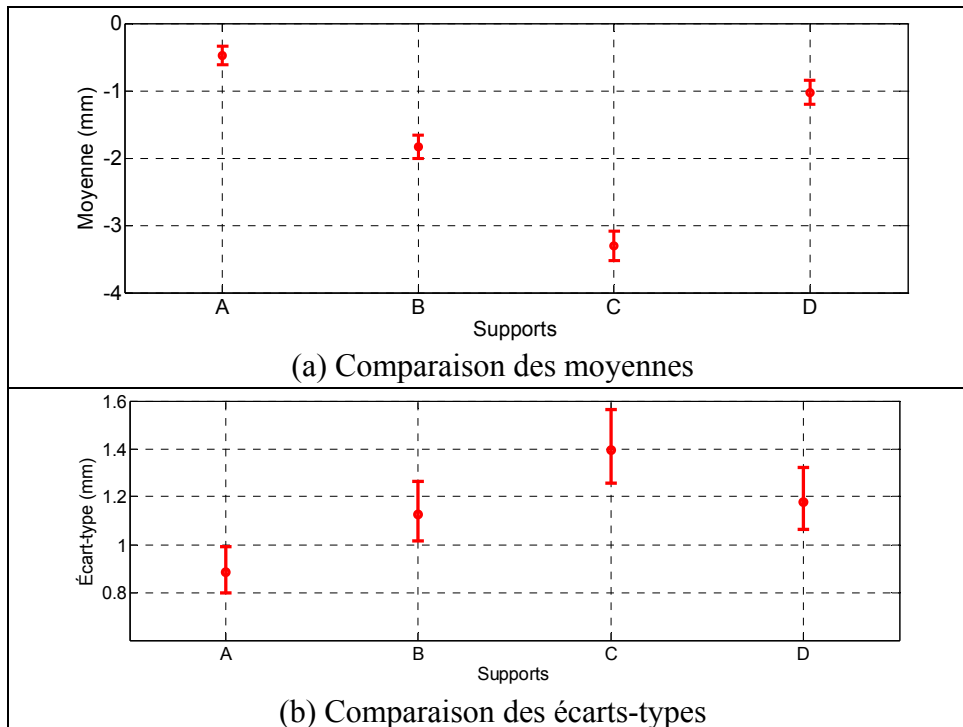
Tableau 22 Comparaison des PDF pour δ_i 

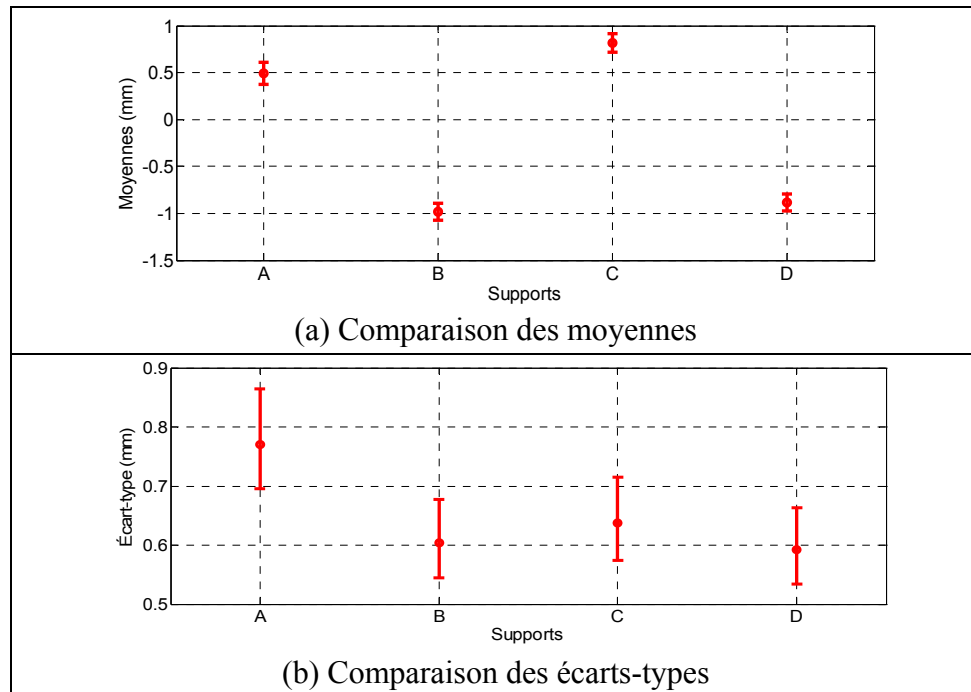
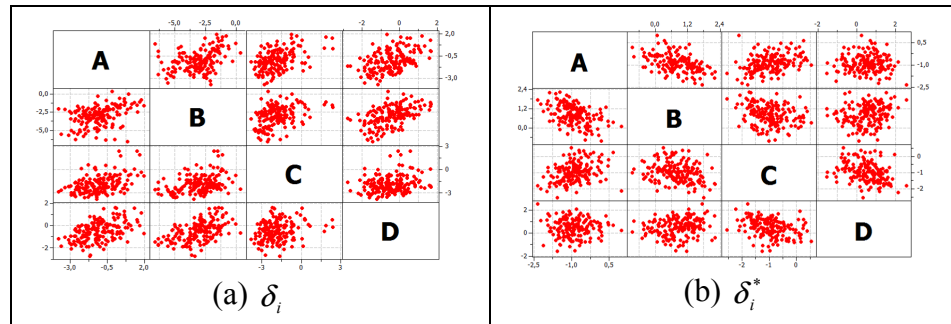
Tableau 23 Comparaison des PDF pour δ_i^* 

Tableau 24 Indépendance des données



Puisque les PDF affichent des différences significatives au niveau des moyennes et des écarts-types, l'erreur associée à chacun des supports ne peut être considérée comme identiquement distribuée. Comme action corrective, il a été recommandé au PI d'ajuster le gabarit de positionnement de manière à corriger l'erreur systématique associée à chacun des supports. Ce simple ajustement assurera des moyennes équivalentes entre les supports et améliorera significativement la capabilité du procédé. Pour notre étude de cas, nous simulerons cet ajustement en recodant les données selon l'équation suivante:

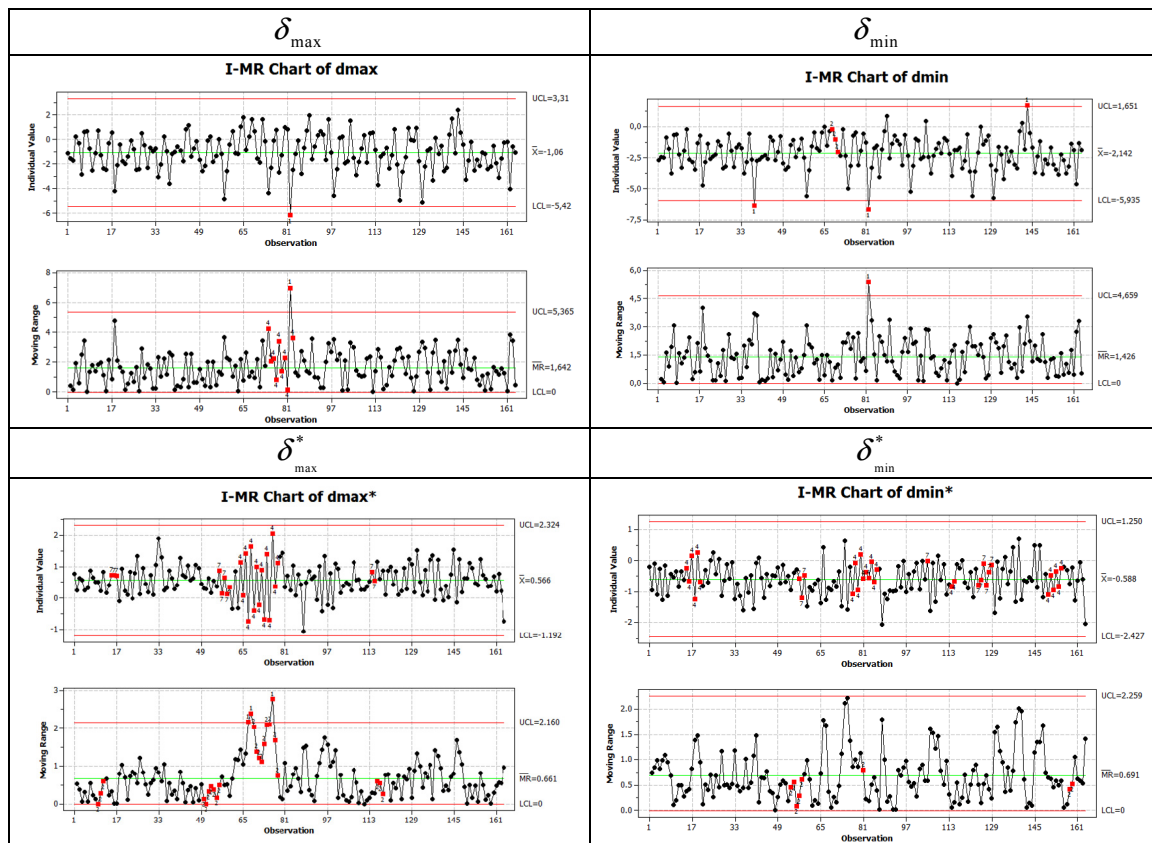
$$\delta_i = \delta_i - \bar{X} \quad (\text{IV.1})$$

Au niveau des différences des écarts-types, le problème requiert une analyse plus approfondie afin de corriger la situation (respect de la gamme d'assemblage, usure du gabarit,

rigidité du gabarit, etc.). Ne s'inscrivant pas dans le cadre de ce mémoire, nous considérerons ces différences comme négligeable pour note étude de cas.

Pour compléter l'analyse descriptive, la stabilité du procédé est jugée à l'aide de cartes de contrôle. Vu les différentes fonctions de mesures (Eq.(5.3), Eq.(5.7) et Eq.(5.11)) qui permettent de calculer les zones de variation associées à chaque type de tolérances de profil, chaque variable indépendante, c'est-à-dire δ_{\max} , δ_{\min} , δ_{\max}^* et δ_{\min}^* , a été l'objet d'une carte de contrôle.

Tableau 25 Cartes de contrôle



Analyses de capacité du procédé

Pour estimer les percentiles $x_{50\%}$ et $x_{99.865\%}$, les écarts géométriques z_{TYPE1} , z_{TYPE2} et z_{TYPE3} sont calculés pour chacun des assemblages et pour différents niveaux de complexité. Vu que le procédé est unilatéral, une fonction de *Weibull* à trois paramètres est utilisée pour modéliser les distributions de chaque type d'erreur:

$$f(z_i) = W(\alpha, \beta, \lambda) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (z_i - \lambda)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{z_i - \lambda}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (IV.2)$$

où α , β et λ sont respectivement les paramètres d'échelle, de forme et de seuil²⁷. L'ajustement de la fonction s'est effectué avec l'aide du logiciel MINITAB® et vérifié par un test d'adéquation basé sur le critère d'Anderson-Darling. Les hypothèses nulle (H_0) et alternative (H_1) sont les suivantes: les données suivent la distribution et les données ne suivent pas la distribution. Les résultats obtenus pour les tests d'adéquation sont regroupés au Tableau 26.

Les capacités du procédé (obtenus par l'équation (6.1)) et les indices C_{pk} de chaque géométrie sont regroupés au Tableau 27.

Tableau 26 Ajustement de la fonction de *Weibull* à trois paramètres

Géométrie (n)	Type d'écart	$\hat{\beta}$	$\hat{\alpha}$	$\hat{\lambda}$	p -value
A ($n=1$)	z_{TYPE1}	1.947	2.105	0.553	> 0.500
	z_{TYPE2}	N/A			
	z_{TYPE3}	N/A			
AB ($n=2$)	z_{TYPE1}	1.809	2.475	0.892	0.023
	z_{TYPE2}	1.445	1.280	0.753	> 0.500
	z_{TYPE3}	1.587	0.809	0.934	> 0.500
ABC ($n=3$)	z_{TYPE1}	1.744	2.893	1.264	0.200
	z_{TYPE2}	1.963	1.714	0.885	0.185
	z_{TYPE3}	1.873	0.916	1.194	0.435
ABCD ($n=4$)	z_{TYPE1}	2.033	3.366	1.150	> 0.500
	z_{TYPE2}	1.767	1.708	1.227	> 0.500
	z_{TYPE3}	1.707	0.989	1.298	> 0.500

Tableau 27 Capabilités du procédé pour différentes géométries de système d'attaches

Géométrie (n)	z_{TYPE1}			z_{TYPE2}			z_{TYPE3}		
	$\hat{x}_{50\%}$	$\hat{x}_{99.865\%}$	C_{pk}	$\hat{x}_{50\%}$	$\hat{x}_{99.865\%}$	C_{pk}	$\hat{x}_{50\%}$	$\hat{x}_{99.865\%}$	C_{pk}
A ($n=1$)	2.297	6.105	1.50	1.088	2.714	3.02	N/D		
AB ($n=2$)	2.913	7.921	1.02	1.746	5.482	1.14	1.576	3.593	1.20
ABC ($n=3$)	3.609	9.806	0.71	2.307	5.370	1.21	1.948	3.705	1.17
ABCD ($n=4$)	3.961	9.670	0.71	2.615	6.198	0.94	2.096	4.290	0.87

²⁷ De l'anglais *Scale*, *Shape* et *Threshold*.

ANNEXE V

USINAGE DES ÉCHANTILLONS

Cette annexe présente les opérations d'usinage qui ont été nécessaires à la fabrication des échantillons ainsi que les résultats d'inspection tels qu'obtenus par POLYWORKS®.

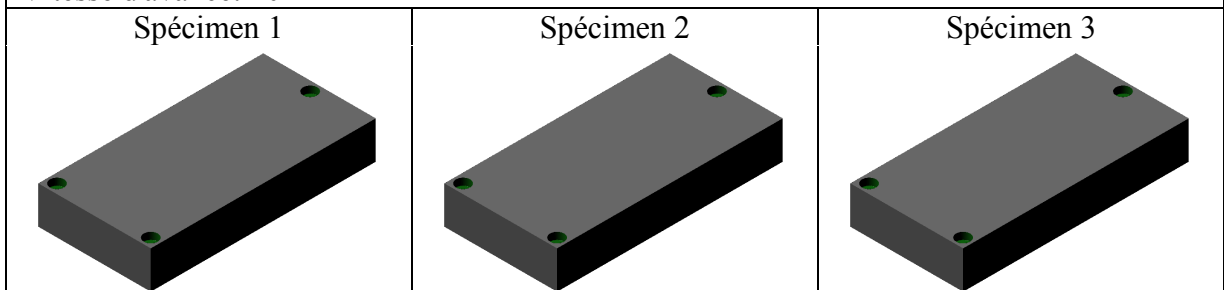
Opérations d'usinage:

Opération #1: Usinage des référentiels

Outil de coupe: Fraise en bout Ø0.500

Vitesse de rotation: 12000 RPM

Vitesse d'avance: 40 IPM

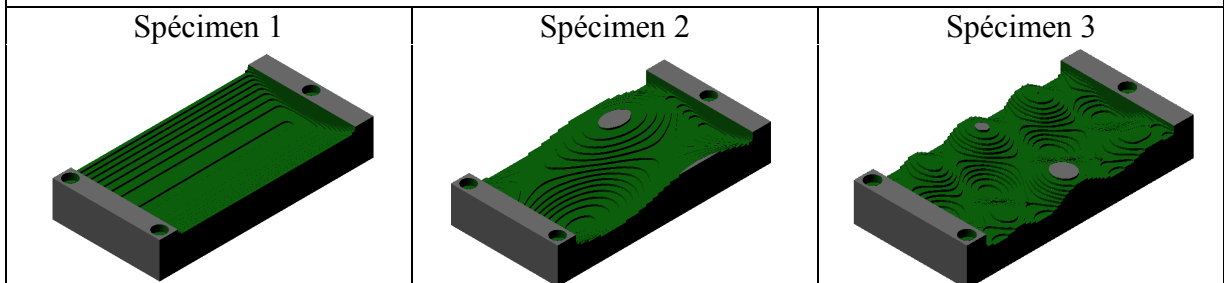


Opération #2: Dégrossissage

Outil de coupe: Fraise en bout Ø0.500

Vitesse de rotation: 12000 RPM

Vitesse d'avance: 200 IPM



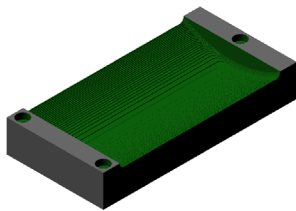
Opération #3: Ébauche

Outil de coupe: Fraise en bout Ø0.500

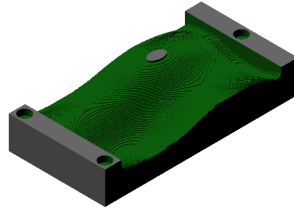
Vitesse de rotation: 12000 RPM

Vitesse d'avance: 200 IPM

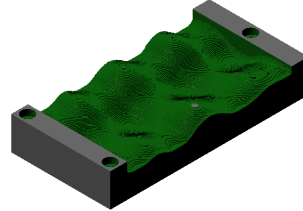
Spécimen 1



Spécimen 2



Spécimen 3

**Opération #4: Semi-finition**

Outil de coupe: Fraise à embout sphérique Ø0.375

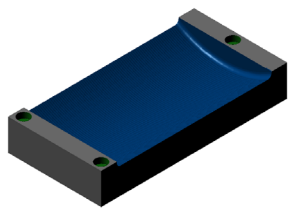
Vitesse de rotation: 12000 RPM

Vitesse d'avance: 100 IPM

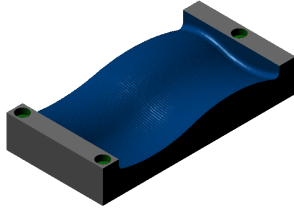
Hauteur de crête: 0.5 mm

Surépaisseur: 0.127 mm

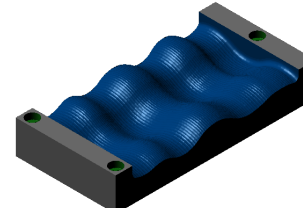
Spécimen 1



Spécimen 2



Spécimen 3

**Opération #5: Finition**

Outil de coupe: Fraise à embout sphérique Ø0.375

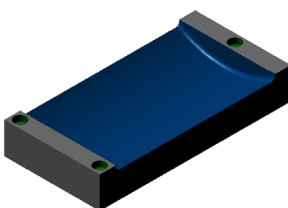
Vitesse de rotation: 12000 RPM

Vitesse d'avance: 100 IPM

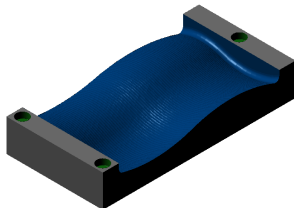
Hauteur de crête: 0.1 mm

Surépaisseur: 0 mm

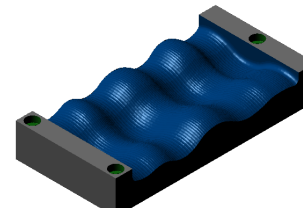
Spécimen 1



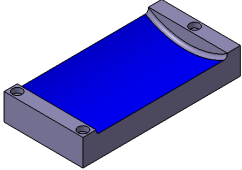
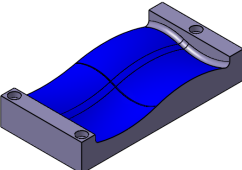
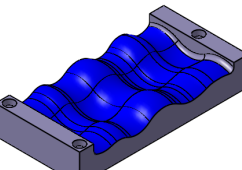
Spécimen 2



Spécimen 3



Résultats d'inspection:

Géométrie	# d'échantillon ²⁸	z_{TYPE1} (mm)	z_{TYPE2} (mm)	z_{TYPE3} (mm)	δ_i (mm)	δ_i^* (mm)
	3	0.143	0.088	0.067	$\bar{X} = -0.038$ $s = 0.018$	$\bar{X} = -0.002$ $s = 0.014$
	11	0.244	0.073	0.068	$\bar{X} = 0.091$ $s = 0.014$	$\bar{X} = 0.001$ $s = 0.014$
	14	0.310	0.075	0.078	$\bar{X} = 0.119$ $s = 0.014$	$\bar{X} = 0.001$ $s = 0.016$
	1	0.311	0.097	0.097	$\bar{X} = 0.111$ $s = 0.019$	$\bar{X} = 0.001$ $s = 0.019$
	7	0.089	0.083	0.048	$\bar{X} = -0.010$ $s = 0.013$	$\bar{X} = -0.001$ $s = 0.010$
	9	0.239	0.083	0.049	$\bar{X} = 0.074$ $s = 0.012$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.009$
	12	0.287	0.128	0.089	$\bar{X} = 0.065$ $s = 0.015$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.009$
	15	0.317	0.101	0.083	$\bar{X} = 0.099$ $s = 0.013$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.009$
	2	0.324	0.126	0.074	$\bar{X} = 0.083$ $s = 0.015$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.009$
	5	0.212	0.103	0.050	$\bar{X} = -0.051$ $s = 0.017$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.009$
	8	0.243	0.118	0.077	$\bar{X} = 0.059$ $s = 0.021$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.013$
	10	0.255	0.112	0.102	$\bar{X} = 0.076$ $s = 0.021$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.013$
	13	0.272	0.112	0.066	$\bar{X} = 0.083$ $s = 0.019$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.012$
	4	0.269	0.122	0.074	$\bar{X} = 0.072$ $s = 0.021$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.013$
	6	0.289	0.137	0.096	$\bar{X} = 0.064$ $s = 0.021$	$\bar{X} = 0.000$ $s = 0.013$

²⁸ Le numéro d'échantillon correspond au rang auquel ce dernier a été fabriqué.

BIBLIOGRAPHIE

- American National Standards Institute and American Society of Mechanical Engineers. 1955. *Preferred Limits and Fits for Cylindrical Parts: ANSI ASA B4.1-1955, UDC 621.753.1/.3*. American Society of Mechanical Engineers.
- American Society of Mechanical Engineers. 2009. *Dimensioning and Tolerancing*. ASME Y14.5-2009: American Society of Mechanical Engineers, 207 p.
- Backes, Andre Ricardo, Danilo Medeiros Eler, Rosane Minghim et Odemir Martinez Bruno. 2010. « Characterizing 3D shapes using fractal dimension ». In *15th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, CIARP 2010, November 8, 2010 - November 11, 2010*. (Sao Paulo, Brazil) Vol. 6419 LNCS, p. 14-21. Coll. « Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) »: Springer Verlag.
- Barari, A., H. ElMaraghy et G. Knopf. 2007. « Evaluation of Geometric Deviations in Sculptured Surfaces Using Probability Density Estimation ». In *Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing*, sous la dir. de Davidson, Joseph K., p. 135-146. Springer Netherlands.
- Barari, Ahmad, Hoda A. ElMaraghy et Waguih H. ElMaraghy. 2009. « Design for manufacturing of sculptured surfaces: A computational platform ». *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 9, n° 2, p. 1-13.
- Bhat, Vinod, et Edward C. De Meter. 2000. « Analysis of the effect of datum-establishment methods on the geometric errors of machined features ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, n° 13, p. 1951-1975.
- Bothe, Davis R. 2006. « Assessing capability for hole location ». *Quality Engineering*, vol. 18, n° 3, p. 325-331.
- Bourdet, P., et L. Mathieu. 1998. *Tolérancement et métrologie dimensionnelle: Qualité des produits dans les entreprises*. Cetim.
- Bourdet, Pierre. 2007. *Spécification géométrique des produits : cotation et tolérancement ISO (2007)*. Paris : Dunod : L'Usine Nouvelle.
- Carbone, Thomas A. 2005. « Integrating operations and product development methodologies for improved product success using advanced product quality planning ». In *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, 2005 IEEE/SEMI*. p. 228-233. IEEE.

- Cardone, Antonio, Satyandra K. Gupta et Mukul Karnik. 2003. « A survey of shape similarity assessment algorithms for product design and manufacturing applications ». *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 3, n° 2, p. 109-118.
- Chrysler Corporation, Ford Motor Company et General Motors Corporation. 2005. *Statistical Process Control SPC*, Second Edition. Southfield, Mich.: Automotive Industry Action Group, 221 p.
- Colwell, Bob. 2005. « Complexity in design ». *Computer*, vol. 38, n° 10, p. 10-12.
- Cox, N.D. 1986. *How to Perform Statistical Tolerance Analysis*. American Society for Quality Control, Statistics Division.
- Craig, Mark. 1996. « Dimensional management versus tolerance assignment ». *Assembly Automation*. Vol. 16, n° 2, p. 12-16.
- David, H.A., et H.N. Nagaraja. 2003. *Order Statistics (third edition)*. New-Jersey: Wiley, 458 p.
- Delaney, Kevin Dominic, et Pat Phelan. 2009. « Design improvement using process capability data ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, n° 1, p. 619-624.
- Durrans, S. Rocky. 1992. « Distributions of fractional order statistics in hydrology ». *Water Resources Research*, vol. 28, n° 6, p. 1649-1655.
- ElKott, Diaa F., et Stephen C. Veldhuis. 2005. « Isoparametric line sampling for the inspection planning of sculptured surfaces ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 37, n° 2, p. 189-200.
- ElMaraghy, Waguih, Hoda ElMaraghy, Tetsuo Tomiyama et Laszlo Monostori. 2012. « Complexity in engineering design and manufacturing ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, n° 2, p. 793-814.
- Fu, Jing, Sanjay B. Joshi et Timothy W. Simpson. 2008. « Shape differentiation of freeform surfaces using a similarity measure based on an integral of Gaussian curvature ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 40, n° 3, p. 311-323.
- Guid, Nikola, Crtomir Oblonsek et Borut Zalik. 1995. « Surface interrogation methods ». *Computers & Graphics (Pergamon)*. Vol. 19, n° 4, p. 557-557. < [http://dx.doi.org/10.1016/0097-8493\(95\)00034-A](http://dx.doi.org/10.1016/0097-8493(95)00034-A) >.

- He, Kunjin, Zhengming Chen et Lihua Zhao. 2011. « A new method for classification and parametric representation of freeform surface feature ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 57, n° 1-4, p. 271-283.
- Hutson, Alan D. 1999. « Calculating nonparametric confidence intervals for quantiles using fractional order statistics ». *Journal of Applied Statistics*, vol. 26, n° 3, p. 343-353.
- ISO. 2007. *Statistical methods in process management Capability and Performance. Part 4: Process capability estimates and performance measures*. ISO 22514-4:2007: International Standard Organisation, 58 p.
- ISO. 2009. *Quality management systems: Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations*. ISO/TS 16949:2009: International Standard Organisation, 56 p.
- Ji, S., Xiaoli Li, Y. Ma et H. Cai. 2000. « Optimal tolerance allocation based on fuzzy comprehensive evaluation and genetic algorithm ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 16, n° 7, p. 461-468.
- Joshi, Durgesh, et Bhallamudi Ravi. 2010. « Quantifying the shape complexity of cast parts ». *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 7, n° 5, p. 685-700.
- Joshi, Pushkar, et Carlo Sequin. 2007. « Energy minimizers for curvature-based surface functionals ». *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 4, n° 1-6, p. 607-617.
- Kerbrat, O., P. Mognol et J. Y. Hascoet. 2010. « Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing ». *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 2, n° 3, p. 208-215.
- Korosec, M., J. Balic et J. Kopac. 2005. « Neural network based manufacturability evaluation of free form machining ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, n° 1, p. 13-20.
- Korosec, Marjan. 2007. « Technological information extraction of free form surfaces using neural networks ». *Neural Computing & Applications*, vol. 16, n° 4, p. 453-463.
- Kotz, S., et C.R. Lovelace. 1998. *Process Capability Indices in Theory and Practice*. Arnold.
- Kuo-Hao, Chang. 2012. « Stochastic Nelder-Mead simplex method - A new globally convergent direct search method for simulation optimization ». *European Journal of Operational Research*, vol. 220, n° 3, p. 684-94.
- Levesque, Sylvain. 2009. « Modelisation des variations dimensionnelles et geometriques d'une structure soudee dans le cas d'une structure d'autocar ». M.Ing. Canada, Ecole de Technologie Superieure (Canada), 152 p.

- Li, Y., et P. Gu. 2005. « Sculptured surface tolerance verification with design datums ». *International Journal of Production Research*, vol. 43, n° 7, p. 1465-1482.
- Lockamy, Archie, et Anil Khurana. 1995. « Quality function deployment: total quality management for new product design ». *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 12, n° 6, p. 73-84.
- Mannar, Kamal, et Darek Ceglarek. 2009. « Functional capability space and optimum process adjustments for manufacturing processes with in-specs failure ». *IIE Transactions*, vol. 42, n° 2, p. 95-106.
- Manson, Steven M. 2001. « Simplifying complexity: a review of complexity theory ». *Geoforum*, vol. 32, n° 3, p. 405-414.
- Montgomery, D.C. 2007. *Introduction To Statistical Quality Control, 4Th Ed.* Wiley India Pvt. Limited.
- Montgomery, Douglas C., et G.C. Runger. 2010. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons Canada, Limited.
- Niavarani, Mohammad R., Rassoul Noorossana et Babak Abbasi. 2012. « Three new multivariate process capability indices ». *Communications in Statistics - Theory and Methods*, vol. 41, n° 2, p. 341-356.
- Obeidat, Suleiman M., et Shivakumar Raman. 2009. « An intelligent sampling method for inspecting free-form surfaces ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, n° 11-12, p. 1125-1136.
- Osada, Robert, Thomas Funkhouser, Bernard Chazelle et David Dobkin. 2002. « Shape distributions ». *ACM Transactions on Graphics*, vol. 21, n° 4, p. 807-832.
- Papoulis, A., et S.U. Pillai. 2002. *Probability, random variables, and stochastic processes*. McGraw-Hill, 852 p.
- Pearn, W. L., F. K. Wang et C. H. Yen. 2007. « Multivariate Capability Indices: Distributional and Inferential Properties ». *Journal of Applied Statistics*, vol. 34, n° 8, p. 941-962.
- Pechard, P. Y., C. Tournier, C. Lartigue et J. P. Lugarini. 2009. « Geometrical deviations versus smoothness in 5-axis high-speed flank milling ». *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 49, n° 6, p. 454-61.
- Pillet, Maurice. 2004. « Inertial tolerancing ». *The TQM Magazine*, vol. 16, n° 3, p. 202-209.

- Pullan, Thankachan T., M. Bhasi et G. Madhu. 2010. « Application of concurrent engineering in manufacturing industry ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 23, n° 5, p. 425-440.
- Qamar, S. Z., A. F. M. Arif et A. K. Sheikh. 2004. « A new definition of shape complexity for metal extrusion ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155-156, n° 1-3, p. 1734-1739.
- Raghunandan, R., et P. Venkateswara Rao. 2008. « Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 202, n° 1-3, p. 240-245.
- Savio, E., L. De Chiffre et R. Schmitt. 2007. « Metrology of freeform shaped parts ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, n° 2, p. 810-835.
- Shahriari, Hamid, et Mohammadreza Abdollahzadeh. 2009. « A new multivariate process capability vector ». *Quality Engineering*, vol. 21, n° 3, p. 290-299.
- Shmukler, Alex, et Anath Fischer. 2010. « Verification of 3D freeform parts by registration of multiscale shape descriptors ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 49, n° 9-12, p. 1093-1106.
- Singh, P. K., P. K. Jain et S. C. Jain. 2009. « Important issues in tolerance design of mechanical assemblies. Part 2: Tolerance synthesis ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 223, n° 10, p. 1249-1287.
- Skinner, Katina R., Douglas C. Montgomery, George C. Runger, John W. Fowler, Daniel R. McCarville, Teri Reed Rhoads et James D. Stanley. 2002. « Multivariate statistical methods for modeling and analysis of wafer probe test data ». In., 4 Vol. 15, p. 523-530. Coll. « IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing »: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. < <http://dx.doi.org/10.1109/TSM.2002.804901> >.
- Sprent, Peter. 2001. *Applied nonparametric statistical methods* / : P. Sprent and N.C. Smeeton. Boca Raton : Chapman & Hall/CRC.
- Srinivasan, Vijay, Craig M. Shakarji et Edward P. Morse. 2012. « On the enduring appeal of least-squares fitting in computational coordinate metrology ». *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 12, n° 1.
- Stigler, Stephen. 1977. « Fractional Order Statistics, with Applications ». *Journal of the American Statistical Association*, vol. 72, n° 359, p. 544-550.

- Swift, K. G., et J. D. Booker. 1996. « Engineering for conformance ». *TQM Magazine*, vol. 8, n° 3, p. 54-60.
- Taam, Winson, Perla Subbaiah et James W. Liddy. 1993. « A note on multivariate capability indices ». *Journal of Applied Statistics*, vol. 20, n° 3, p. 339-351.
- Tahan, Antoine S., et Jason Cauvier. 2012. « Capability estimation of geometrical tolerance with a material modifier by a Hasofer-Lind index ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 134, n° 2.
- Tahan, S. Antoine, et Sylvain Levesque. 2009. « Exploiting the process capability of position geometric tolerance according GD and T ASME Y14.5M ». In *2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009, July 6, 2009 - July 9, 2009*. (Troyes, France), p. 1267-1272. Coll. « 2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009 »: IEEE Computer Society.
- Wang, F. K. 2000. « Comparison of three multivariate process capability indices ». *Journal of Quality Technology*, vol. 32, n° 3, p. 263-275.
- Whitney, D.E. 2004. *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford University Press, USA.
- Wu, Chien-Wei. 2012. « An efficient inspection scheme for variables based on Taguchi capability index ». *European Journal of Operational Research*, vol. 223, n° 1, p. 116-122.
- Wu, Chien-Wei, W. L. Pearn et Samuel Kotz. 2009. « An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance ». *International Journal of Production Economics*, vol. 117, n° 2, p. 338-359.
- Xiao, Jiangchao, et Nan Yang. 2010. « A similarity assessment algorithm of mechanical part based on shape distribution ». In *2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, ICACTE 2010, August 20, 2010 - August 22, 2010*. (Chengdu, China) Vol. 6, p. V691-V694. Coll. « ICACTE 2010 - 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Proceedings »: IEEE Computer Society. <
<http://dx.doi.org/10.1109/ICACTE.2010.5579379> >.
- Zhang, Xuzeng, et Utpal Roy. 1993. « Criteria for establishing datums in manufactured parts ». *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 12, n° 1, p. 36-50.