

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, CONCENTRATION EN GESTION DE L'INNOVATION
M. Sc. A.

PAR
Antoine PROTEAU

PRÉDICTION DE LA COMPLEXITÉ D'UN PRODUIT USINÉ : PROPOSITION D'UN
MODÈLE BASÉ SUR L'ANALYSE DU MODÈLE 3D ENRICHIS

MONTREAL, LE 21 JUIN 2016



Antoine Proteau, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Roland Maranzana, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

M. Pascal Lavoie, examinateur externe
Héroux-Devtek Inc., division Laval

M. Virgilio Quintana, examinateur externe
Bombardier Aérostructure et Service d'Ingénierie

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

LE 17 JUIN 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais prendre le temps de remercier toutes les personnes ayant participé, de près ou de loin, à la concrétisation de ce mémoire de maîtrise.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur et co-directeur de recherche M. Roland Maranzana et M. Antoine Tahan. Je les remercie avant tout pour la confiance qu'ils m'ont accordée, leur soutien autant moral qu'académique tout au long de notre collaboration, ainsi que pour leurs nombreuses contributions, essentielles à la qualité de ce travail. Sans vous, ce projet n'aurait pas pu aboutir.

Je tiens également à remercier l'entreprise Héroux-Devtek Inc., et plus précisément, Martin Richard et Pascal Lavoie pour avoir cru en notre projet, ainsi que pour leur engagement et leurs implications. J'aimerais souligner également la contribution de tous les employés d'Héroux-Devtek Inc. Je remercie aussi l'entreprise pour sa contribution financière ayant permis au projet de se concrétiser. Sur ce point, je remercie aussi le Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQNT) et le Conseil de Recherche en Science Naturelle et Génie du Canada (CRSNG) pour leur apport financier qui a permis de me consacrer pleinement à ce projet.

Merci aussi au président et membres du jury de ma soutenance pour avoir pris le temps d'évaluer mon mémoire, ainsi que pour leurs commentaires constructifs.

Pour terminer, je tiens à remercier ma copine, Agathe, pour ses encouragements, son soutien, son immense patience et ses nombreuses contributions. Sans toi, ce projet n'aurait pas été possible. Finalement, je remercie mes parents, Josée et Jean, ainsi que ma famille pour leur support et leur implication tout au long de mes études universitaires.

PRÉDICTION DE LA COMPLEXITÉ D'UN PRODUIT USINÉ : PROPOSITION D'UN MODÈLE BASÉ SUR L'ANALYSE DU MODÈLE 3D ENRICHI

Antoine PROTEAU

RÉSUMÉ

De nos jours, l'usinage reste une des techniques les plus prisées par l'industrie manufacturière pour fabriquer des produits complexes et de haute-précision. Plusieurs travaux de recherche ont démontré qu'une mauvaise gestion des produits à forte complexité est néfaste pour la performance du processus manufacturier des entreprises. Par conséquent, une métrique objective et quantitative, permettant d'identifier les produits à forte complexité en amont du processus manufacturier, est désirée dans un contexte de conception pour la fabrication (DFM). Afin de répondre à ce besoin, ce mémoire de recherche propose un modèle d'estimation de la complexité d'un produit dans le contexte spécifique de l'usinage par machine-outil à commande numérique. En vue de tirer profit des technologies de conception mises à notre disposition, le modèle développé tire ses informations seulement à partir du modèle 3D enrichi. La métrique proposée se base sur un modèle multiplicatif qui est fonction de trois variables : le volume à usiner en fonction du type de matériau, l'ordre de grandeur des éléments géométriques et une valeur de pondération qui tient compte des annotations/tolérances/exigences contenues dans le modèle 3D enrichi. Nos travaux sont basés sur l'analyse de 54 différents produits obtenus à partir de la base de documents techniques de notre partenaire industriel. Les résultats de nos expérimentations démontrent que le modèle identifié affiche de fortes corrélations avec les résultats de l'évaluation de la complexité obtenus à partir d'un processus d'élicitation des connaissances d'un groupe d'experts industriels. De surcroît, une étape de validation empirique de notre modèle démontre que celui-ci peut prédire la complexité d'un produit usiné avec une erreur ne dépassant pas $\pm 15\%$ de la valeur cible tel que définie par le groupe d'experts. Le modèle peut donc, d'ores et déjà, aider les équipes d'ingénierie à identifier les produits à forte complexité dès la phase de conception. Le modèle peut aussi être employé comme une mise à l'échelle permettant de prédire la capacité des procédés du partenaire industriel à rencontrer un requis spécifique sur un nouveau composant.

Mots clés : Complexité des produits, usinage, élicitation des connaissances, conception assistée par ordinateur, conception pour la fabrication, capacité des procédés

PREDICTING THE COMPLEXITY OF A MACHINED PRODUCT: PROPOSAL OF A MODEL BASED ON THE ANALYSIS OF THE ENHANCED 3D MODEL

Antoine PROTEAU

ABSTRACT

These days, product manufacturing through material removing remains one of the most widely used techniques to manufacture high-precision and complex products. Research has shown that complex products which are incorrectly managed will be detrimental to company performance during the manufacturing process. Therefore, a valid and accurate quantitative metric to identify high-complexity products early on in the manufacturing process is most valuable to a company in a design-for-manufacturing context. In the present work, we propose a complexity metric model based solely on the information found in a Model-Based Definition (MBD) Computer-Aided Design (CAD) file. The proposed metric is a multiplicative model based on three factors: the volume to be machined, the order of magnitude of the geometrical elements and the ponderation value of the annotations. Our investigation is based on the analysis of 54 different parts picked from our industrial partner's technical document database. The results of our work demonstrate that our model is highly correlated to a part's evaluated complexity. Furthermore, empirical validation of our complexity metric model has shown that it could predict the complexity value of a part under 15% of discrepancy between the predicted value and its target value. Alternatively, to increase its accuracy and reliability, we recommended to pursue further research in several directions such as features geometric context or to test our model in others industries. Nonetheless, with its current quality, our model could help engineering teams identify high-complexity products as early as the design phase.

Keywords: Part complexity, machining, expert elicitation, computer-aided design, design for manufacturing, process capability

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE.....	5
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	7
2.1 Objectifs généraux	7
2.2 Objectifs spécifiques.....	7
2.3 Méthodologie de recherche.....	8
CHAPITRE 3 DÉFINITIONS ET REVUE DE LITTÉRATURE	11
3.1 Définitions.....	11
3.1.1 Modèle 3D enrichi	11
3.1.2 Annotation.....	12
3.1.3 Spécification	13
3.2 La complexité.....	13
3.2.1 Méthodes d'estimation de la complexité	15
3.3 Système expert.....	22
3.3.1 Connaissances procédurales.....	25
3.3.2 Connaissances déclaratives.....	30
3.4 Conclusion du chapitre 3	36
CHAPITRE 4 CADRE DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES RETENUES	39
4.1 Environnement de recherche.....	39
4.2 Cadre de recherche.....	40
4.3 Hypothèses retenues.....	41
CHAPITRE 5 COLLECTE DES DONNÉES	43
5.1 Les catégories de produits.....	43
5.2 Règles de décision.....	44
5.2.1 Règles de décision reliées aux annotations.....	45
5.2.2 Règles de décision reliées aux spécifications	46
5.3 Indice de matériau.....	47
5.3.1 Indice d'usinabilité.....	47
5.3.2 Indice de contraintes résiduelles	49
5.4 Élicitation des connaissances du groupe d'experts.....	51
CHAPITRE 6 COMPOSITION DU MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ.....	57
6.1 Le volume à usiner selon le matériau utilisé.....	57
6.1.1 Calcul du composant candidat	58

6.2	L'ordre de grandeur des éléments géométriques	61
6.2.1	Calcul du composant candidat	62
6.3	Les annotations	63
6.3.1	Calcul du composant candidat	64
6.4	Les spécifications.....	69
6.4.1	Calcul du composant candidat	70
6.5	Analyses de corrélation linéaire.....	71
6.5.1	Discussion des résultats	77
6.6	Conclusion du chapitre 6	79
CHAPITRE 7 PROPOSITION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ.....		81
7.1	Proposition du modèle	81
7.2	Analyse de la corrélation linéaire	82
7.3	Discussion des résultats	86
7.4	Conclusion du chapitre 7	88
CHAPITRE 8 VALIDATION DU MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ.....		89
8.1	Validation empirique du modèle.....	89
8.2	Validation hors-contexte.....	96
8.3	Discussion des résultats	100
8.4	Conclusion du chapitre 8	105
CHAPITRE 9 DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AUTOMATISATION		107
9.1	Architecture de l'outil.....	107
9.2	Fonctionnement de l'outil.....	112
9.3	Conclusion du chapitre 9	114
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		115
RECOMMANDATIONS		119
ANNEXE I	MÉTHODES D'ÉVALUATION DES ANNOTATIONS EXCLUES.....	125
ANNEXE II	PROPOSITION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ GÉOMÉTRIQUE D'UN PRODUIT USINÉ BASÉ SUR LA MAQUETTE 3D	129
BIBLIOGRAPHIE.....		139

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 3.1	Résumé des méthodes de calcul de la complexité	22
Tableau 3.2	Caractéristiques des connaissances tacites et explicites	24
Tableau 3.3	Résumé des méthodes de représentation des connaissances d'un expert.....	36
Tableau 5.1	Catégories de produits.....	44
Tableau 5.2	Extrait des règles de décision reliées aux annotations	45
Tableau 5.3	Extrait des règles de décision reliées aux spécifications	46
Tableau 5.4	Indice d'usinabilité.....	48
Tableau 5.5	Indice d'usinabilité par classe.....	49
Tableau 5.6	Indice de contraintes résiduelles	50
Tableau 5.7	Indice de contraintes résiduelles par classe	51
Tableau 5.8	Résultats de la première évaluation de la complexité (C_E).....	52
Tableau 5.9	Résultats de l'étude <i>Crossed Gage R&R (XBar/R Method)</i>	52
Tableau 5.10	Résultats du processus d'élicitation par expert.....	54
Tableau 5.11	Résultats de l'étude <i>Crossed Gage R&R (X Bar/R Method)</i>	55
Tableau 6.1	Liste des types d'annotations extraites et utilisées dans les calculs.....	65
Tableau 6.2	Information volumétrique et indice de matériau.....	71
Tableau 6.3	Valeurs des G_i	72
Tableau 6.4	Valeurs des G_i standardisées	73
Tableau 6.5	Coefficient de corrélation Pearson entre les G_i et C_E	74

XIV

Tableau 7.1	Résultats de l'équation (7.1)	83
Tableau 7.2	Coefficient de corrélation entre C et C_E	83
Tableau 8.1	Information volumétrique et indice de matériau pour les données de validation	89
Tableau 8.2	Valeurs des G_i pour les données de validation	90
Tableau 8.3	Valeurs pour le calcul de C et résidus	90
Tableau 8.4	Coefficient de corrélation entre C et C_E pour les données de validation	91
Tableau 8.5	Valeurs théoriques des produits conçus	99
Tableau 8.6	Valeurs de \hat{G}_1 , \hat{G}_2 , G_3 , C_E , C et résidu	100

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 0.1	Complexité des produits usinés	1
Figure 0.2	Ségmentation du mémoire	4
Figure 2.1	Résumé de la méthodologie de recherche.....	10
Figure 3.1	Exemple de modèle 3D enrichi.....	11
Figure 3.2	Exemple d'une annotation de type « dimension linéaire ».....	12
Figure 3.3	Exemple d'une spécification contenue dans une feuille de notes.....	13
Figure 3.4	Exemple de sections de profils extrudés.....	16
Figure 3.5	Exemple de pièces de fonderie	17
Figure 3.6	Exemple d'un moule.....	17
Figure 3.7	Représentation visuelle des sections complexes à usiner	18
Figure 3.8	Exemple d'un produit assemblé	21
Figure 3.9	Composants d'un système expert.....	23
Figure 3.10	Exemple de règle de décision du système MYCIN	26
Figure 3.11	Exemple de règles de décision pour la sélection des paramètres de coupe.....	27
Figure 3.12	Exemple de sortie du système expert de sélection des outils de coupe.....	28
Figure 3.13	Interface du système expert de correction des modèles 3D.....	29
Figure 3.14	Exemple de portiques de chemin de fer.....	31
Figure 3.15	Extrait de l'ontologie développée pour les portiques de chemin de fer.....	31
Figure 3.16	Exemple de système photovoltaïque.....	32

Figure 3.17	Exemple d'ontologie pour les systèmes photovoltaïques	32
Figure 3.18	Représentation par <i>frames</i> de la connaissance d'un inducteur	34
Figure 3.19	Attribut (<i>slots</i>) d'un <i>frame</i>	34
Figure 3.20	Exemple de règles d'affaire utilisées avec une représentation par <i>frames</i>	35
Figure 5.1	Figure de référence	53
Figure 5.2	Distribution des produits selon la moyenne de l'évaluation de la complexité	56
Figure 6.1	Représentation de G_1	57
Figure 6.2	Exemple de la différence dans les quantités de matériau à usiner	60
Figure 6.3	Représentation de G_2	62
Figure 6.4	Représentation de G_3	64
Figure 6.5	Exemple de requis géométrique avec et sans référentiel	65
Figure 6.6	Exemple d'annotation « diamètre »	66
Figure 6.7	Exemple d'annotation « dimension linéaire »	66
Figure 6.8	Visualisation des variables.....	68
Figure 6.9	Représentation de G_4	70
Figure 6.10	Distribution entre \hat{G}_1 et C_E	75
Figure 6.11	Distribution entre \hat{G}_2 et C_E	75
Figure 6.12	Distribution entre \hat{G}_3 et C_E	76
Figure 6.13	Distribution entre \hat{G}_4 et C_E	76

Figure 7.1	Exemple de produits avec une tolérance différente	82
Figure 7.2	Distribution entre C et C_E	84
Figure 7.3	Résultats graphique de la droite de régression.....	85
Figure 7.4	Distribution graphique des résidus en fonction de l'ordre.....	86
Figure 8.1	Distribution entre C et C_E pour les données de validation	91
Figure 8.2	Résultats graphique de la droite de régression pour les données de validation	92
Figure 8.3	Distribution graphique des résidus en fonction de l'ordre pour les données de validation	93
Figure 8.4	Distribution entre les résidus et la valeur estimée C	94
Figure 8.5	Histogramme des résidus	94
Figure 8.6	Comparaison des valeurs de C et C_E	95
Figure 8.7	Résultats du test t de <i>Student</i>	96
Figure 8.8	Distribution des valeurs de \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et G_3	98
Figure 8.9	Produits conçus	98
Figure 8.10	Régions à valider.....	99
Figure 8.11	Distribution des valeurs \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et G_3	100
Figure 9.1	Architecture globale.....	107
Figure 9.2	Architecture de l'application côté client.....	108
Figure 9.3	Interface utilisateur du module central (module d'extraction)	108
Figure 9.4	Interface utilisateur du module d'analyse.....	109
Figure 9.5	Interface utilisateur du module de création et de modification des règles de décision	109

Figure 9.6	Interface utilisateur du module d'administration du système	110
Figure 9.7	Interface utilisateur du module de rapport	111
Figure 9.8	Schéma conceptuel des données	111
Figure 9.9	Schéma fonctionnel de l'outil	112
Figure 9.10	Exemple de rapport d'information	113

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Institut Américain du Fer et de l'Acier)
AMS	<i>Aerospace Material Specification</i> (Spécification de Matériau Aérospatial)
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programmation)
ASME	<i>The American Society of Mechanical Engineer</i> (La Société Américaine des Ingénieurs Mécaniques)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Conception Assistée par Ordinateur)
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Machine à Contrôle Numérique)
CoG	<i>Center of Gravity</i> (Centre de Gravité)
DFM	<i>Design for Manufacturing</i> (Conception pour la Fabrication)
GD&T	<i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i> (Dimensionnement et Tolérancement Géométrique)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Environnement de Développement Intégré)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organisation Internationale pour la Standardisation)
MBD	<i>Model Based Definition</i> (Définition Basée sur la Modélisation)
MSE	<i>Mean Squared Error</i> (Erreur Quadratique Moyenne)
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i> (Fabricant d'Équipement Original)
RDBMS	<i>Relational Database Management system</i> (System de Gestion de Base de Données Relationnelle)
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Language de Requête Structuré)
STL	<i>STereoLithography</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

a	Élément topologique d'une annotation
A_{Part}	Aire du produit
A_{Sphere}	Aire d'une sphère de même volume que le produit
C	Valeur calculée de la complexité d'un produit
C_E	Valeur moyenne de la complexité d'un produit évaluée par le groupe d'expert
d_j	Distance euclidienne
D	Élément topologique d'un référentiel
F_{Part}	Nombre de faces usinées d'un produit
G_i	Composant candidat à l'indice de complexité
i	Écart supérieur ou inférieur d'une tolérance
I_M	Valeur d'une classe de l'indice d'usinabilité
I_S	Valeur d'une classe de l'indice de contraintes résiduelles
in	<i>Inch</i> (Pouce)
j	Une annotation (ex : dimension linéaire, positionnement, etc.)
L_j	Longueur d'un élément cylindrique
m	Nombre total d'annotations analysées
M	Valeur d'un indice d'usinabilité
Max_M	Valeur maximale de l'indice d'usinabilité
Min_M	Valeur minimale de l'indice d'usinabilité

Max_s	Valeur maximale de l'indice de contraintes résiduelles
Min_s	Valeur minimale de l'indice de contraintes résiduelles
n	Nombre total de règles déclenchées
P_1	Nombre total de produit sélectionné pour le développement
P_2	Nombre total de produits sélectionnés pour la validation
r	Règle de décision reliée aux spécifications
R	Ratio entre l'aire de la sphère de même volume et l'aire du produit
S	Valeur d'un indice de contraintes résiduelles
S_j^a	Aire de l'élément topologique d'une annotation
S_j^D	Aire de l'élément topologique d'un référentiel
T_{ji}	Valeur de la tolérance d'une annotation
V_{Part}	Volume du produit
V_{Raw}	Volume du matériau brut servant à fabriquer un produit
V_{Remove}	Différence entre le volume du matériau brut et le volume du produit
W_M	Largeur d'une classe de l'indice d'usinabilité
W_S	Largeur d'une classe de l'indice de contraintes résiduelles
y_r	Valeur d'une règle de décision reliée aux spécifications
z	Référence d'une spécification
β	Modificateur de la valeur du volume de matériau à usiner en fonction de l'indice d'usinabilité

λ_j	Valeur nominal d'une annotation de type « dimension »
v_j	Valeur d'une annotation
Υ	Somme de toutes les valeurs d'annotations

INTRODUCTION

Le développement récent de nombreuses technologies de fabrication avancées, telle que l'impression 3D, ont permis l'essor et l'utilisation de nouveaux procédés de fabrication. Malgré ces nouvelles technologies, l'usinage à l'aide d'une machine-outil à commande numérique (CNC) reste l'une des techniques les plus prisées par l'industrie manufacturière pour réaliser des produits complexes et de hautes-précision. Afin de quantifier la précision d'un procédé, il est commode d'employer le terme «°capabilité°» qui traduit l'aptitude d'un procédé à rencontrer une exigence prédéfinie. Cette capabilité ne peut être considérée comme constante; pour des paramètres du procédé préétablis, elle sera une fonction directe de la complexité des produits fabriqués. Le procédé aura une meilleure capabilité à fabriquer des produits simples, et une capabilité moindre dans le cas de produit à géométries plus complexes (voir Figure 0.1). Dans ce contexte, nous définissons la complexité d'un produit comme étant le reflet de sa « fabricabilité ». En d'autres mots, la complexité peut être définie comme l'ensemble des incertitudes manufacturières d'un produit.

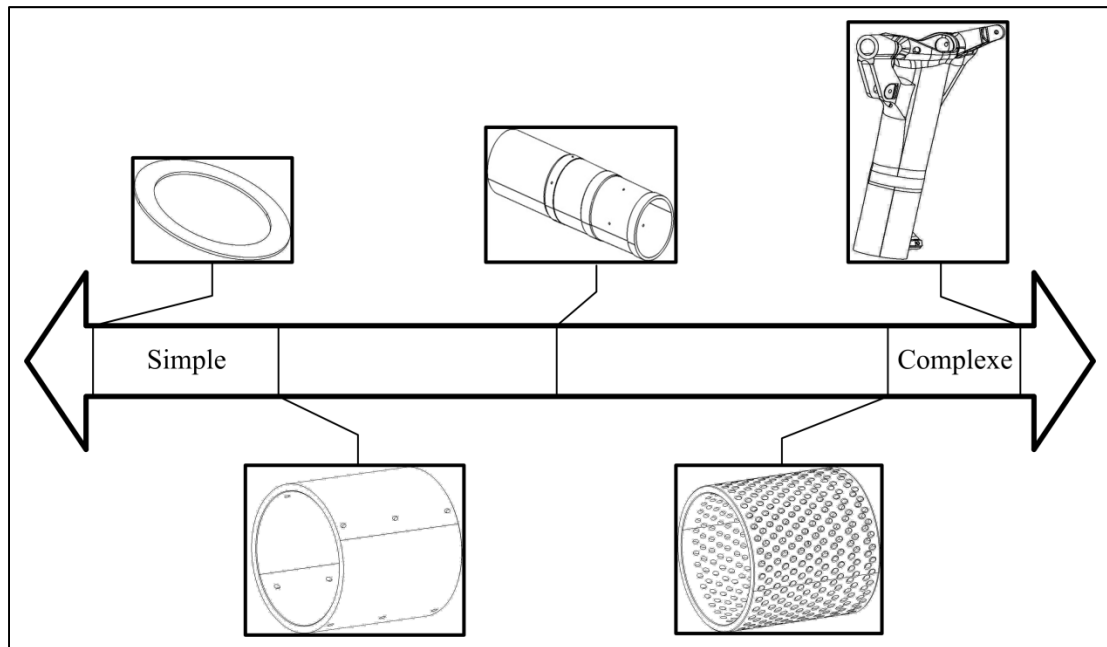


Figure 0.1 Complexité des produits usinés

En revanche, bien que l'étude de la complexité soit un concept en plein essor, celui-ci reste relativement nouveau et encore relativement méconnu des entreprises manufacturières. De plus, le phénomène de mondialisation crée une compétition toujours plus accrue forçant ainsi les entreprises des pays industrialisés à développer et fabriquer des produits d'une complexité sans cesse grandissante, dans des délais plus courts, afin de maintenir leur niveau de compétitivité face aux pays émergents. Dans ce contexte, un outil permettant de créer un lien causal entre capacité du procédé et complexité du produit sera fort utile pour les concepteurs, entre autre, dans leur exercice de synthèse des tolérances et lors de la planification de la production (ex : création des gammes d'opérations); en d'autres mots, nous tenterons de développer un outil informatique dans le but de : « concevoir bon et fabriquer bon du premier coup ».

À notre connaissance, aucune méthode approuvée ne permet aujourd'hui une identification rapide et systématique du niveau de complexité des produits usinés, en plus d'établir un lien directe avec la capacité d'un procédé à rencontrer un cahier des charges. Ainsi, les entreprises sont laissées au dépourvu face à ce nouveau concept et à son potentiel d'applications. Toutefois, il s'agit aussi d'une opportunité de recherche appliquée qui trouve son potentiel et sa justification directement dans les applications concrètes pour le développement de nouveaux produits.

Dans le contexte spécifique de l'usinage, et dans le but de répondre à cette problématique, ce mémoire de maîtrise, réalisé en partenariat avec l'industriel Héroux-Devtek Inc.¹, a pour but le développement d'un modèle d'estimation de la complexité d'un produit usiné dont l'objectif est de créer un lien causal avec les performances du procédé d'usinage à maintenir des spécifications prédéfinies (ex. : tolérances). Par ailleurs, et dans le but de tirer profit des technologies de conception mises à notre disposition, le modèle développé devra puiser ses

¹ Entreprise internationale spécialisée dans la conception, la mise au point, la fabrication, l'assemblage ainsi que la réparation et l'entretien de systèmes et de composants de trains d'atterrissage destinés au marché de l'aérospatiale

intrants dans le modèle 3D enrichi du produit étudié. En utilisant les informations contenues dans le modèle 3D enrichi, il est possible d'automatiser l'évaluation de la complexité d'un produit dès l'étape de sa conception, permettant ainsi de mettre en évidence les spécificités complexes du produit en amont du processus de fabrication. Dès lors, nous conjecturons que l'identification des incertitudes manufacturières permettra également une meilleure adéquation entre l'ingénierie de conception (le *quoi*) et l'ingénierie de fabrication (le *comment*). Dans un contexte de conception pour la fabrication², cette adéquation est une philosophie centrale et incontournable.

Ce mémoire présente les résultats de nos travaux et celui-ci s'organise autour de neuf chapitres. Le CHAPITRE 1 présente la problématique détaillée du projet de recherche, ainsi que les questions de recherche qui seront adressées. Le CHAPITRE 2 décrit les objectifs généraux et spécifiques que nous nous sommes fixés, ainsi que la méthodologie de recherche dont nous nous sommes dotés dans le but d'atteindre les objectifs de ce projet. Le CHAPITRE 3 présente une revue de littérature effectuée dans le but de recenser les travaux importants effectués dans notre domaine de recherche. Le CHAPITRE 4 présente le cadre de recherche dont nous nous sommes pourvus, ainsi que les hypothèses émises en vue de répondre aux questions de recherche formulées.

Le CHAPITRE 5 présente l'intégralité des données empiriques utilisées dans l'élaboration et la validation du modèle. Le CHAPITRE 6 présente les différents composants du modèle, en d'autres mots, la morphologie interne du modèle. Le CHAPITRE 7 et le CHAPITRE 8 présentent la proposition pour un modèle d'estimation, ainsi que le détail de sa validation. Finalement, le CHAPITRE 9 présente un outil informatique développé de manière à rendre accessible l'utilisation du modèle aux industriels.

Pour conclure, la Figure 0.2 présente une version visuelle de la segmentation de ce mémoire de recherche.

² De l'anglais *Design for Manufacturing (DFM)*

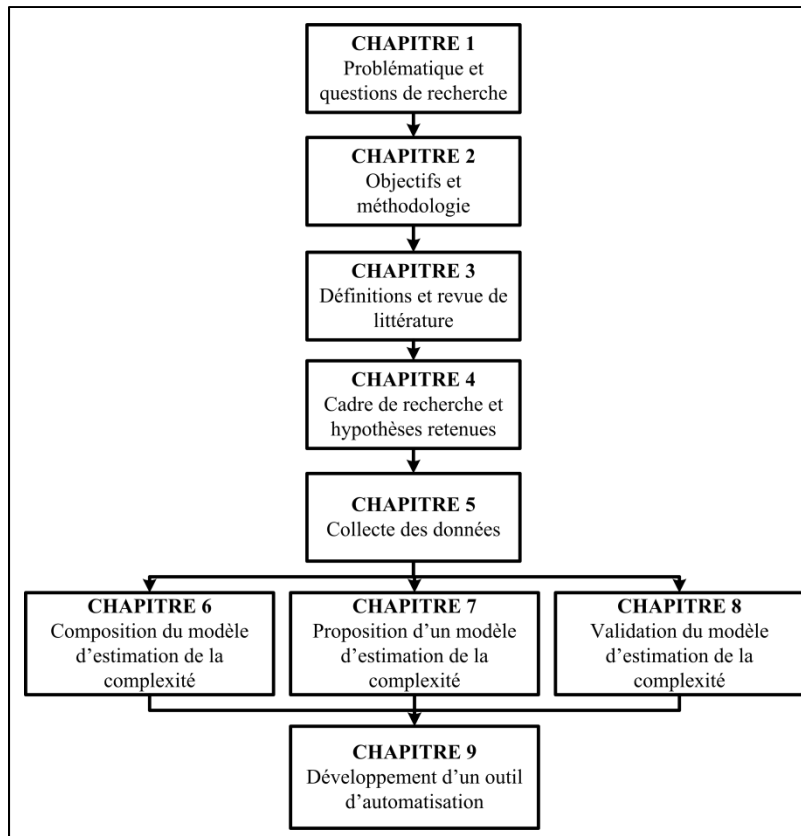


Figure 0.2 Ségmentation du mémoire

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Les avancées technologiques, la mondialisation et le contexte économique ont radicalement transformé les entreprises manufacturières, leurs processus, leurs méthodes de gestion ainsi que leurs conceptions de la performance. Pour se démarquer de la compétition internationale, nos entreprises doivent donc fabriquer des produits d'une complexité sans cesse accrue (Yang et Han, 2006), ce qui exige une main d'œuvre toujours plus spécialisée et des méthodes de fabrication à la fine pointe de la technologie. Par ailleurs, il est connu que la complexité est souvent un facteur d'inefficacité et que celle-ci nuit grandement à la performance d'une entreprise. Nous assistons donc à la dualité entre l'augmentation de la complexité des produits fabriqués par les entreprises manufacturières et le poids de cette complexité sur l'ensemble de leurs processus, ainsi que sur leur performance.

En revanche, il n'existe pas présentement de méthode homologuée ou d'outil permettant aux entreprises d'estimer rapidement un indice de complexité afin de cibler de façon systématique les produits à forte complexité, et ce, en amont de la chaîne logistique ou du processus manufacturier. Ce travail relève, dans la grande majorité des cas, de l'expérience des intervenants du processus. De plus, il est évident qu'une évaluation qualitative (ex : facile, difficile, etc.) basée sur l'expérience des experts industriels peut facilement cacher des incertitudes importantes ou parfois critiques dues à la subjectivité de ceux-ci (Morgan, 2014). Les entreprises sont donc laissées au dépourvu face à ce nouveau concept et à une compétition sans cesse grandissante. Aussi, notre connaissance de cette nouvelle notion reste toutefois limitée, rendant ainsi l'étude de la complexité reliée aux produits usinés un sujet d'actualité en plein expansion.

À l'heure actuelle, nous savons qu'une mauvaise gestion des coûts peut engendrer des effets néfastes pour une entreprise. C'est dans le même ordre d'idées que nous pouvons affirmer qu'une mauvaise gestion de la complexité des produits peut créer plusieurs problèmes et

ainsi impacter les performances financières des entreprises. C'est pourquoi une saine gestion de la complexité débute par l'identification des produits à forte complexité grâce à l'utilisation d'un modèle d'estimation de la complexité quantitatif, objectif et précis.

Par ailleurs, la complexité d'une caractéristique d'un produit est le reflet de la capacité d'un procédé à le maintenir (Lépine, 2014). Dès lors, tous risques omis d'être identifiés en amont ou une mauvaise évaluation de la complexité du produit se traduit par des complications dans le processus de fabrication. Ces complications auront de facto des conséquences sur les coûts de fabrication.

Afin de résumer la problématique énoncée ci-haut, deux questions de recherche sont formulées :

- 1) Comment pouvons-nous exprimer la complexité sous la forme d'un indice fortement corrélé avec la capacité du procédé de fabrication?
- 2) Comment pouvons-nous automatiser l'estimation d'un indice de complexité afin de rendre la méthodologie accessible aux entreprises?

Ces deux questions de recherche fournissent donc les fondements sur lesquels notre projet est mené.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

À partir des questions de recherche formulées au CHAPITRE 1, il est essentiel de définir les objectifs que notre projet de recherche tente d'atteindre. Le présent chapitre propose donc les différents objectifs établis, ainsi que la méthodologie de recherche développée afin de parvenir à l'atteinte des objectifs fixés.

2.1 Objectifs généraux

Une identification rapide du niveau de complexité et des caractéristiques à risque d'un produit, et ce, dès la phase de conception, permettra une meilleure planification des ressources, d'anticiper les performances du procédé, de diminuer de façon drastique les risques de perte de revenu, et ainsi, d'assurer un meilleur rendement global de l'entreprise.

De ce fait, les objectifs généraux de ce mémoire de maîtrise sont les suivants :

- 1) Proposer un modèle et une méthodologie de calcul pour l'estimation d'un indice de complexité;
- 2) Automatiser l'estimation de l'indice de complexité à l'aide d'un outil d'extraction et d'analyse des caractéristiques d'un modèle 3D enrichi.

2.2 Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre les objectifs généraux de ce projet, il est impératif d'atteindre des objectifs spécifiques. Les objectifs spécifiques du projet sont donc les suivants :

- 1) Identifier et quantifier les paramètres affectant la complexité d'un produit;
- 2) Établir une méthodologie d'estimation de la complexité d'un produit;
- 3) Valider, de façon empirique, la précision du modèle conçu;
- 4) Développer un outil informatique permettant l'automatisation de la méthodologie proposée.

La section suivante présente la méthodologie de recherche qui a été proposée et utilisée lors de ce projet.

2.3 Méthodologie de recherche

Notre méthodologie de recherche se divise en six (6) étapes. Cette section présente d'une manière globale les étapes clés exécutées afin d'atteindre les objectifs établis aux sections 2.1 et 2.2.

Premièrement, les systèmes experts et la représentation des connaissances sont le sujet de nombreux travaux au début de l'ère de l'intelligence artificielle, d'où l'importance de faire une revue de ce qui a été accompli. De plus, le concept de la complexité des produits, qui est un sujet relativement nouveau, requière également une revue des différents travaux entrepris dans ce domaine. Par conséquent, le CHAPITRE 3 présente le point de départ de notre projet de recherche qui est de réaliser une revue de la littérature pertinente à notre sujet afin de faire un inventaire de ce qui a déjà été exploré et accompli dans les domaines énoncés. Cette revue de littérature nous procure également des pistes de réflexions et de solutions en ce qui concerne le développement du modèle d'estimation.

Deuxièmement, puisque ce projet de recherche est mené en partenariat avec un industriel du domaine de l'aéronautique, il est important de bien comprendre sa situation. Il est donc impératif de faire une revue complète du fonctionnement de l'entreprise pour analyser systématiquement ses processus, familles de produits, données (humaines et techniques), etc. Cette étape permet de se doter d'une vision plus globale de l'entreprise et de bien cerner ses besoins, ce qui permet une meilleure adéquation entre notre projet de recherche et les objectifs du partenaire industriel.

Troisièmement, le développement d'un modèle d'estimation de la complexité nécessite une quantité importante de données empiriques et divergentes en termes de qualité, type et accessibilité. Ce faisant, la collecte des données disponibles et une consolidation de celles-ci

sont effectuées auprès des différentes ressources mises à notre disposition. Les principales sources de données sont les connaissances des experts industriels sur place, la base de données de documents techniques et la base de données de leur système de gestion. Le CHAPITRE 5 procure au lecteur le détail de tous les types de données collectées dans ce projet, ainsi que le détail des différentes méthodes de collecte utilisées.

Quatrièmement, l'étape cruciale de notre projet est, sans aucun doute, notre proposition d'un modèle pour l'estimation d'un indice de complexité. Le CHAPITRE 6 présente donc au lecteur le détail de la composition et de la construction du modèle d'estimation d'un indice de complexité. À cette étape, un logiciel d'analyse statistique est employé dans le but d'effectuer les analyses statistiques nécessaires.

Cinquièmement, pour confirmer la validité du modèle, une étape de validation empirique est accomplie. Cette phase consiste à comparer, sur une base statistique, les résultats prédits par le modèle développé aux valeurs de la complexité obtenues par un processus d'élicitation effectué avec un groupe d'experts industriels. Les produits qui ont servis à la validation sont des produits différents de ceux ayant servis au développement de notre modèle. Le CHAPITRE 7 présente au lecteur le détail de la méthodologie combinatoire permettant d'obtenir l'indice de complexité. Le CHAPITRE 8, quant à lui, présente le détail de cette phase de validation, la présentation des résultats, ainsi qu'une discussion des résultats obtenus. Une fois de plus, un logiciel d'analyse statistique est utilisé.

Sixièmement, une fois le modèle d'estimation et sa méthodologie de calcul validée, l'outil informatique qui permet l'automatisation de la méthodologie de calcul est développé et testé. Pour effectuer ces développements, trois logiciels sont utilisés : un logiciel qui fournit un environnement de développement intégré (IDE), un système de gestion de bases de données relationnelle (RDBMS) et un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAD), ainsi que son interface de programmation (API). De plus, des bibliothèques *Open Source* sont utilisées dans le développement de l'outil informatique. Le CHAPITRE 9 présente au lecteur le détail de l'architecture de l'outil, son fonctionnement et son extrait.

Pour conclure, la Figure 2.1 illustre un résumé de la méthodologie sous forme visuelle.

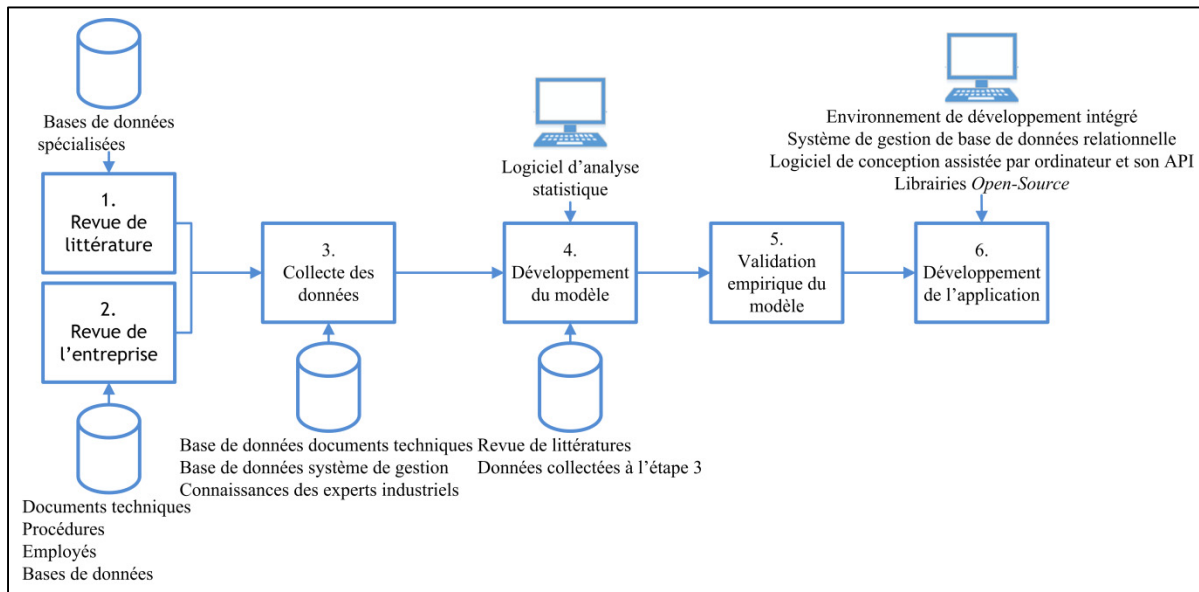


Figure 2.1 Résumé de la méthodologie de recherche

CHAPITRE 3

DÉFINITIONS ET REVUE DE LITTÉRATURE

3.1 Définitions

Avant de débiter cette revue de littérature, il est important de bien définir certains termes ou concepts qui seront utilisés tout au long de ce mémoire.

3.1.1 Modèle 3D enrichi

Un modèle 3D est la résultante de la modélisation d'un produit à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAD). On dit d'un modèle qu'il est enrichi lorsque les annotations (section 3.1.2) sont apposées directement sur le modèle 3D. Cette méthode se veut l'évolution du traditionnel dessin de définition en 2D. La Figure 3.1 présente un exemple de modèle 3D enrichi.

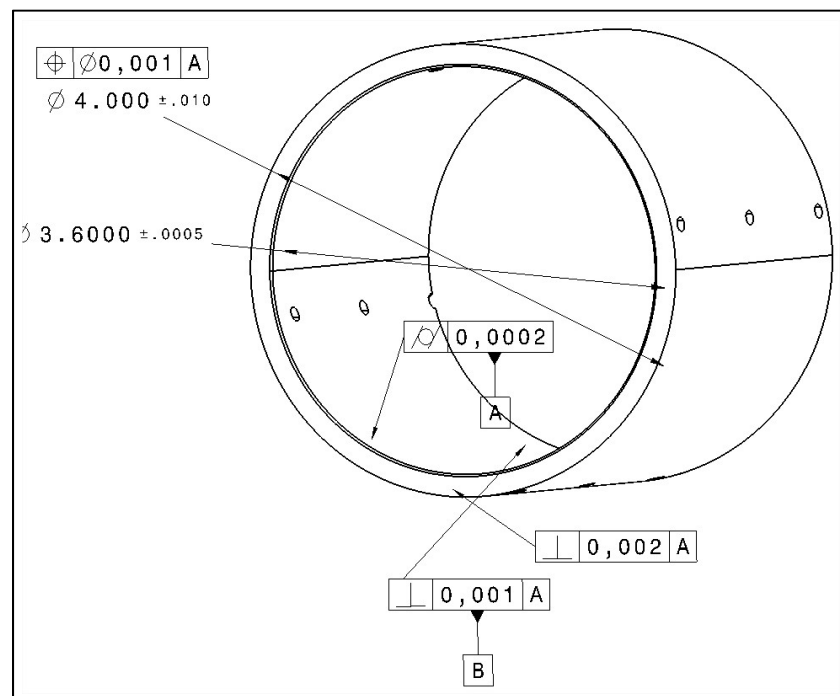


Figure 3.1 Exemple de modèle 3D enrichi

3.1.2 Annotation

Dans notre contexte, une annotation représente une information permettant de préciser un requis géométrique sur un produit (positionnement, perpendicularité, etc.). La Figure 3.2 présente un exemple d'annotation de type dimension linéaire. Une annotation est généralement composée d'une valeur nominale et d'un intervalle de tolérance. Dans notre exemple la valeur nominale est égale à 1.440 in et l'intervalle de tolérance est égal à ± 0.005 in. Le Tableau 6.1 à la section 6.3.1 présente les différents types d'annotation qui peuvent se trouver sur un modèle 3D enrichi.

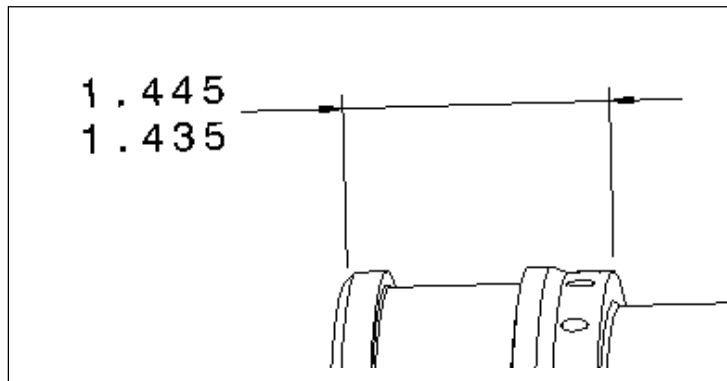


Figure 3.2 Exemple d'une annotation de type
« dimension linéaire »

De plus, on dit d'une annotation qu'elle est reliée sémantiquement à un élément géométrique lorsque celle-ci est associée à l'élément et que l'information de cette association, en plus des informations propres à l'annotation, est enregistrée dans le modèle 3D enrichi. De surcroît, une annotation est liée sémantiquement si celle-ci respecte la logique établie par les normes (ex : ASME Y14.5). Autrement dit, une annotation est sémantique si elle respecte les règles de grammaires et possède une syntaxe cohérente. Par exemple, un requis de battement total appliqué sur l'une des surfaces planes d'un produit prismatique ne serait pas jugé sémantique.

3.1.3 Spécification

Dans notre contexte, une spécification représente une référence à une norme (ex : ISO9001), un standard (ex : ASME Y14.5), un procédé (ex : AMS2759), etc. qui doit être respecté par une entreprise lors de la fabrication d'un produit. Ces spécifications se retrouvent généralement sur la feuille de notes (*Part list*) du produit (Figure 3.3). Pour des raisons de tradition, il est encore rare de trouver ces informations directement dans le modèle 3D enrichi. Dans les faits, mis-à-part au niveau de la gestion des documents, il n'y a pas de différence entre une information intégrée au modèle 3D enrichi ou gérée séparément. Au final, cela dépend encore des habitudes de conception de chaque entreprise. Dans le cas de notre partenaire industriel, les spécifications ne sont pas incluses dans le modèle 3D enrichi, mais plutôt dans une feuille de notes accompagnant le produit.

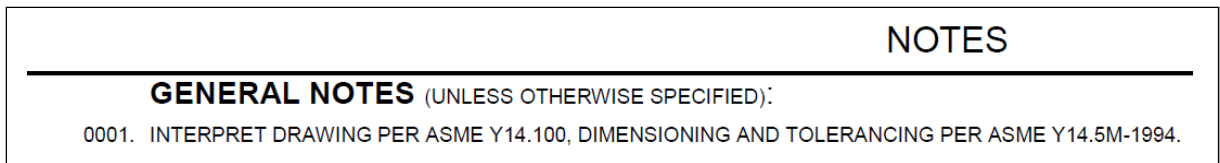


Figure 3.3 Exemple d'une spécification contenue dans une feuille de notes

3.2 La complexité

Complexe, adj., du latin *complexus*, « qui contient ».
« Qui se compose d'éléments différents, dont la
combinaison est difficile à comprendre »
(Larousse, 2015)

En avant-propos de notre revue, il est important de bien définir le terme complexité. À première vue, ElMaraghy et al. (2012) distingue le terme complexité du terme compliqué au sens où un produit complexe présente des incertitudes. Par exemple, l'assemblage d'un avion est un processus compliqué, mais ne présente pas d'incertitude.

De plus, de nombreuses études ont tenté de définir de manière explicite et univoque ce qu'est la complexité. Aujourd'hui, il est difficile d'établir une définition unique ou encore

universelle de la complexité, puisque celle-ci dépend fortement du contexte (ElMaraghy et al., 2012; Jacobs, 2013; Orfi, Terpenney et Sahin-Sariisik, 2011; Rodriguez-Toro et al., 2003; Samy et ElMaraghy, 2010). Par exemple, dans le domaine viticole, Colwell (2005) définit la complexité d'un vin comme étant un vin bien équilibré par rapport aux différentes façons qu'un expert pourrait l'évaluer. Un autre exemple de Colwell (2005) est sa définition de la complexité en gestion de projet basée sur la quantité d'incertitudes qui sont injectées dans le design.

Dans un autre ordre d'idées, Orfi, Terpenney et Sahin-Sariisik (2011) définissent la complexité d'un produit comme étant fonction de cinq dimensions : la variété, la complexité fonctionnelle, la complexité structurelle, la complexité du design et la complexité de la production. Jacobs (2013) spécifie la complexité comme un état défini par la multiplicité, la diversité et l'interrelation des éléments fonctionnels; où un élément peut être un composant, une fonction ou encore une variation dans un produit. Rapidement, nous constatons que pour un même terme - la complexité - une multitude de définitions existent selon le contexte où il est employé. Il est donc probable que le développement du modèle d'estimation soit dépendant de son contexte.

Bien qu'un terrain d'entente ne semble pas encore exister pour aboutir à une définition universelle de la complexité, la littérature semble pointer dans une même direction en ce qui concerne les conséquences négatives d'une mauvaise gestion de la complexité d'un produit fabriqué ou d'un assemblage. En effet, gérer de façon inadéquate la complexité entraîne une hausse des coûts et une diminution de la qualité (Ameri et al., 2008; Jenab et Liu, 2010; Samy et ElMaraghy, 2010; Zhuo et Qunhui, 2007). Joshi et Ravi (2010) soutiennent l'affirmation précédente en ajoutant que la complexité a un effet négatif sur la productivité d'une organisation. De plus, Orfi, Terpenney et Sahin-Sariisik (2011) ajoutent que la fabrication de produits complexes causera une inefficacité dans la phase de réalisation se traduisant par une hausse dans les travaux en cours, une baisse dans les économies d'échelles et un plus grand besoin en contrôle de la qualité. Bien qu'à notre connaissance il n'existe pas de document de référence traçable et reconnu qui explicite de façon exhaustive les maux que

peuvent causer la complexité, nous remarquons que la littérature semble aller dans une direction commune.

En d'autres mots, la multitude de conséquences résultant de la mauvaise gestion d'un produit ou d'un assemblage complexe vient aisément renforcer la nécessité d'investiguer d'avantage le concept de complexité. De façon à contrecarrer les conséquences néfastes de la complexité et d'assurer une identification et une quantification de celle-ci, plusieurs chercheurs du domaine se sont avancés en proposant des méthodes d'estimation.

3.2.1 Méthodes d'estimation de la complexité

De nombreuses méthodes d'estimation de la complexité ont été proposées dans les dernières années, et ce, dans de multiples industries. Par conséquent, la section suivante présente des méthodes utilisées dans la littérature pouvant être pertinentes à notre contexte de recherche.

Premièrement, une méthode de calcul, basée sur ce que nous pourrions appeler des « paramètres », a été explorée. Le principe général est le suivant : dans une industrie ou pour une gamme de produits donnés, des paramètres représentant la complexité sont estimés, puis combinés afin de fournir un indice de complexité. Pour un premier exemple, Qamar, Arif et Sheikh (2004) ont développé une métrique propre à l'industrie de l'extrusion (Figure 3.4). La complexité C est estimée par l'équation (3.1).

$$C = \alpha + \beta \left(\frac{P}{P_0}\right)^\gamma \quad (3.1)$$

Elle est égale au ratio du périmètre d'une section du profile (P_S) et d'une section circulaire équivalente de même surface (P_0). Les paramètres $\alpha = 0.96$, $\beta = 0.05$ et $\gamma = 1.5$ ont été obtenus par régression.

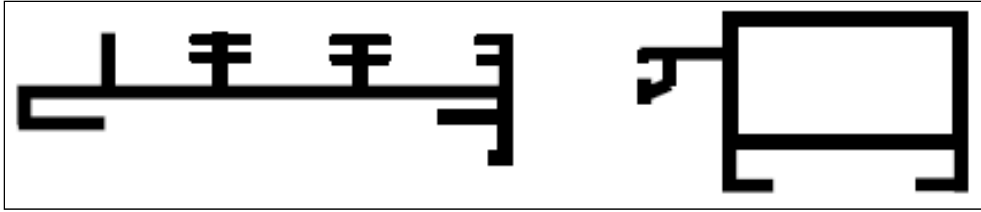


Figure 3.4 Exemple de sections de profils extrudés
Tirée de Qamar, Arif et Sheikh (2004)

Dans le même ordre d'idée, Joshi et Ravi (2010) ont également développé une métrique de complexité géométrique pour l'industrie des produits forgés (Figure 3.5). Selon eux, la complexité estimée CF est fonction de six paramètres : le ratio du volume de la pièce C_{PR} qui correspond au ratio du produit et de la plus petite boîte englobant celui-ci, le ratio de l'aire C_{AR} qui est égale au ratio de l'aire d'une sphère de même volume que le produit et de l'aire du produit, le nombre de cavités C_{NC} , le ratio du volume des cavités C_{CR} qui correspond au volume de toutes les cavités et de la plus petite boîte englobant le produit, le ratio des épaisseurs C_{TR} qui est égal au ratio de l'épaisseur minimal et de l'épaisseur maximal et finalement, le ratio C_{DR} du retrait qui représente la profondeur maximal de l'outillage. Le lecteur peut se référer à Joshi et Ravi (2010) pour une description détaillée de chacun des paramètres. La complexité estimée CF (équation (3.2)) est donc égale à la somme pondérée de chacun des paramètres par les poids ω_i , qui ont été déterminés par régression.

$$CF_{estimated} = \omega_0 + \omega_1 C_{PR} + \omega_2 C_{AR} + \omega_3 C_{NC} + \omega_4 C_{CR} + \omega_5 C_{TR} + \omega_6 C_{DR} \quad (3.2)$$

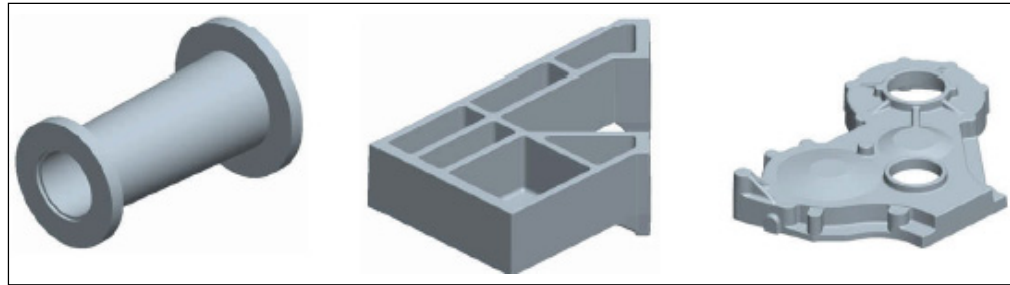


Figure 3.5 Exemple de pièces de fonderie
Tirée de Joshi et Ravi (2010)

Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010) ont proposé une approche similaire pour l'industrie des moules et matrices (Figure 3.6). Dans leur contexte de recherche, la complexité représente un indice de difficulté d'usinabilité. Les paramètres utilisés pour le calcul de la complexité sont, par exemple : le ratio entre la dimension du produit sur l'axe Z et la longueur de l'axe Z du centre d'usinage ou encore, le volume du produit. Le lecteur peut se référer à Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010) pour la liste détaillée des paramètres utilisés. Un élément intéressant de leur travail est qu'ils sont en mesure de représenter visuellement les sections complexes d'une pièce à usiner directement sur le modèle 3D (Figure 3.7).

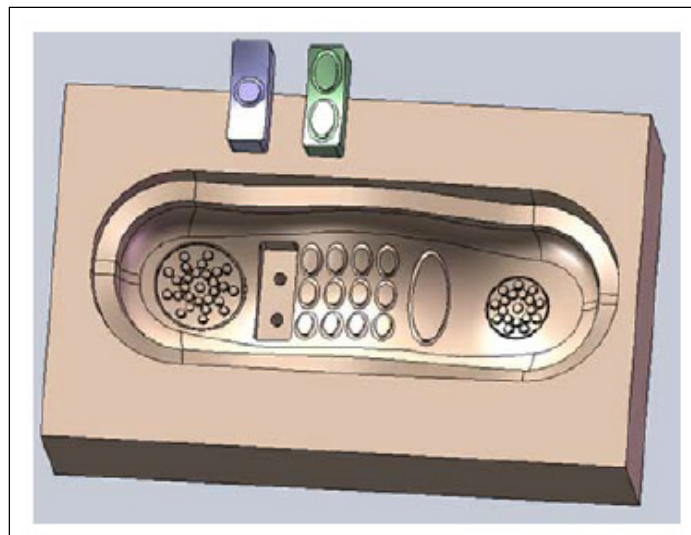


Figure 3.6 Exemple d'un moule
Tirée de Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010)

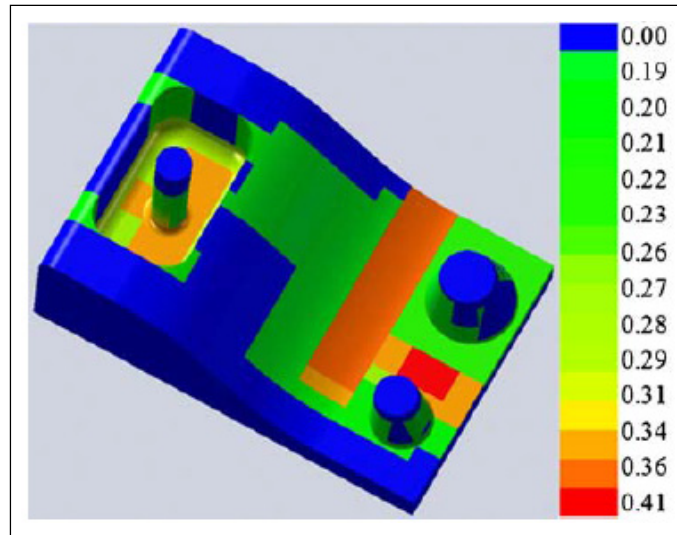


Figure 3.7 Représentation visuelle des sections complexes à usiner
Tirée de Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010)

L'avantage d'une méthode d'estimation par paramètres est que la métrique développée affiche une bonne précision et semble être adaptée au contexte industriel. En revanche, elle semble être difficile à extrapoler à d'autres domaines ou industries. Par exemple, il serait difficile d'appliquer la métrique développée par Joshi et Ravi (2010) au contexte de Qamar, Arif et Sheikh (2004) et vice-versa. Finalement, un élément intéressant de ces exemples est qu'il semble que leurs auteurs n'aient utilisé que les caractéristiques géométriques de la pièce et que tout ce qui a trait à d'autres aspects d'un produit ou d'un assemblage telles que les annotations sont ignorées dans le processus d'estimation de leurs indices de complexité.

Contrairement aux exemples précédents, Zhuo et Qunhui (2007) ont appliqué une méthodologie utilisant des paramètres englobant plusieurs facettes d'un produit. Dès lors, douze paramètres regroupés en quatre catégories (technologies, caractéristiques physiques, organisations et environnements) sont utilisés pour calculer le niveau de complexité. Une autre particularité de cette étude est la méthode employée afin de combiner les paramètres. Les auteurs ont utilisé une méthode appelée *Grey Measurement* qui consiste à évaluer chaque paramètre en fonction d'une classe (*Grey Clusters*) à l'aide de l'équation (3.3).

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, x \notin [a_j^{k-1}, a_j^{k+2}] \\ \frac{x-a_j^{k-1}}{\lambda_j^k - a_j^{k-1}}, x \in [a_j^{k-1}, \lambda_j^k] \\ \frac{a_j^{k+2}-x}{a_j^{k+2}-\lambda_j^k}, x \in [\lambda_j^k, a_j^{k+2}] \end{cases} \quad (3.3)$$

Où a_j^k représente la valeur de la borne inférieure ou supérieure de la classe k et du paramètre x_j et λ_j^k est donnée par l'équation (3.4).

$$\lambda_j^k = \frac{(a_j^k + a_j^{k+1})}{2} \quad (3.4)$$

Finalement, les résultats donnés par l'équation (3.3) sont combinés selon l'équation (3.5) afin de fournir l'indice de complexité σ^k .

$$\sigma^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_j \eta_j) \quad (3.5)$$

Où m représente le nombre total de paramètre x_j et η_j représente le poids de chaque paramètre. Les auteurs maintiennent donc la possibilité de fournir un portrait global d'un produit en appliquant leur méthodologie. En revanche, et contrairement aux exemples présentés plus haut, très peu de paramètres en ce qui concerne la géométrie ou la constitution physique du produit sont utilisés.

Une autre méthode basée sur des paramètres, mais présentant certaines particularités, est développée par Valentan et al. (2012). Ils ont développé un modèle afin d'évaluer la complexité dans un contexte de fabrication additive (impression 3D). À l'inverse du procédé d'usinage, la fabrication additive a été conçue dans le but de fabriquer des produits avec des éléments géométriques très complexes. Autre particularité, ces chercheurs utilisent comme intrants de leur modèle les informations contenues dans le fichier STL. Ce fichier est obtenu à partir d'un logiciel de conception assisté par ordinateur. Bien que ceux-ci n'aient pas utilisé

les informations directement à partir du modèle 3D enrichi, leurs travaux démontrent qu'il est possible d'utiliser les données d'un fichier de conception pour produire de l'information de gestion. Ceci renforce donc notre position quant à l'approche que nous utilisons.

Également, contrairement à toutes les méthodes énumérées jusqu'à maintenant, ces chercheurs sont les premiers à avoir tenté d'estimer le temps d'une opération à partir de leur modèle de la complexité. Il est donc intéressant de voir qu'il pourrait exister, dans le cas de la fabrication additive, une relation entre la complexité et le temps d'une opération (conception, fabrication, ébavurage, etc.). Leur modèle d'estimation de la complexité prend en compte trois paramètres : la surface du modèle, le nombre de triangles et le volume d'un cube englobant le produit. Ceux-ci sont combinés selon l'équation (3.6).

$$\frac{\text{model surface number number of triangles}}{\text{model square block volume}} \quad (3.6)$$

Malgré tout, d'autres informations pouvant être pertinentes ne sont pas utilisées par leur modèle : le type de matériau entrant dans la fabrication, la qualité de la surface (ex : rugosité) ou encore les dimensions du produit.

Dans un autre ordre d'idées, une méthode basée sur l'entropie est explorée pour calculer la complexité d'un produit ou d'un assemblage. La théorie derrière cette méthode propose que la complexité augmente proportionnellement à la quantité d'information contenue dans un produit ou un assemblage (Samy et ElMaraghy, 2010). Les auteurs ont appliqué cette méthode dans un contexte d'assemblage manuel et automatique (Figure 3.8). Selon eux, la complexité d'un produit assemblé ($C_{Product}$) se définit selon l'équation (3.7).

$$C_{Product} = \left[\frac{n_p}{N_p} + CI_{Product} \right] [\log_2(N_p + 1)] + \left[\frac{n_s}{N_s} \right] [\log_2(N_s + 1)] \quad (3.7)$$

Où N_p et N_s représentent respectivement le nombre total de composants et de fixations, n_p et n_s représentent le nombre de composants et de fixations uniques et $CI_{Product}$ est l'index de complexité de l'assemblage.

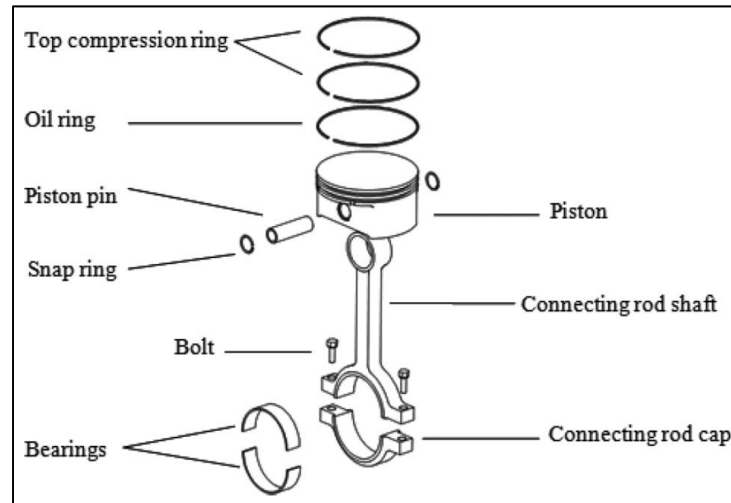


Figure 3.8 Exemple d'un produit assemblé
Tirée de Samy et ElMaraghy (2010)

Une autre méthode explorée par plusieurs chercheurs est basée sur la constitution d'un assemblage. Cette méthode permet de définir la complexité d'un assemblage proportionnellement à la quantité de composants utilisés : plus le nombre de composants augmente, plus la complexité de l'assemblage augmente, et vice-versa (Barclay et Dann, 2000; Jacobs, 2013; Rodriguez-Toro et al., 2003). Orfi, Terpenney et Sahin-Sariisik (2011) appuient cette définition et ont développé l'équation (3.8).

$$\sum_{i=1}^N e_i BOM_i \quad (3.8)$$

Où e_i représente le nombre d'élément dans la composante t et BOM_i représente le niveau du composant i .

Dans leur étude sur la complexité, Barclay et Dann (2000) ont également intégré le concept du nombre de composants. Les auteurs tentent de définir un indice de complexité dans un contexte de développement de nouveaux produits. Ils apportent deux nuances intéressantes. Premièrement, en plus d'utiliser le nombre de composants, ils utilisent le nombre de composants dits « nouveaux ». Deuxièmement, ils font la distinction entre un composant acheté d'un fournisseur ou un composant sous-contracté. Selon eux, ces deux ajouts permettent d'estimer un meilleur indice qu'en utilisant seulement le nombre de composants entrant dans l'assemblage d'un produit.

En résumé, de cette section de la revue de littérature, il nous semble que deux points importants font surface. Premièrement, la complexité dépend du contexte dans lequel elle est étudiée. Deuxièmement, d'après les méthodes énumérées, il semble que la complexité peut être exprimée de façon structurelle (géométrie, composition, etc.) et de façon globale (processus, environnement, etc.). Le Tableau 3.1 résume les différentes méthodes explorées dans cette section.

Tableau 3.1 Résumé des méthodes de calcul de la complexité

Méthode	Domaine	Auteurs
Calcul par paramètres	Extrusion	Qamar, Arif et Sheikh (2004)
	Fonderie	Joshi et Ravi (2010)
	Moules et matrices	Kerbrat, Mognol et Hascoet (2010)
	Fabrication additive	Valentan et al. (2012)
Paramètres et <i>Grey Measurement</i>	N/S	Zhuo et Qunhui (2007)
Entropie	N/S	Samy et ElMaraghy (2010)
Quantité de composants	N/S	Orfi, Terpenney et Sahin-Sariisik (2011) Barclay et Dann (2000)

3.3 Système expert

Nous rappelons au lecteur que la fonction principale de l'outil informatique développé dans le cadre de ce projet est de fournir des informations permettant d'aider à la prise de décisions. C'est-à-dire que l'outil doit permettre de répliquer, avec une précision acceptable, le raisonnement d'un expert lors de l'analyse du modèle 3D enrichi d'un nouveau produit. Un

outil qui présente cette caractéristique se définit comme étant un système expert (Tripathi, 2011). De nombreux travaux sont effectués en intelligence artificielle sur les systèmes experts et la gestion des connaissances, c'est pourquoi il est important de passer en revue la littérature pertinente à notre projet. Les sections qui suivent présentent les caractéristiques d'un système expert, ainsi que les différentes méthodes de gestion des connaissances pouvant être appliquées dans notre contexte de recherche.

Un système expert est un outil informatique qui permet de répliquer le raisonnement d'un expert dans un domaine donné. Tout système expert est caractérisé par trois éléments fondamentaux (Figure 3.9) : une interface utilisateur, un système d'inférence permettant d'exécuter un raisonnement (i.e. le cerveau de l'application) et une base de connaissances contenant la représentation du savoir (généralement d'un ou plusieurs experts) d'un domaine donné (Chang, 1990; Monarchi et Smith, 1992; Shehab et Abdalla, 2006; Tripathi, 2011). Cette dernière est un élément critique dans la construction d'un système expert tant par sa difficulté de représentation que par son importance dans la qualité de l'information fournie par le système (l'extrant) (Ruschitzka, Suchodolski et Wróbel, 2010; Saa et al., 2012). C'est pourquoi, plusieurs méthodes ont été développées afin de tenter de représenter les connaissances d'un expert.

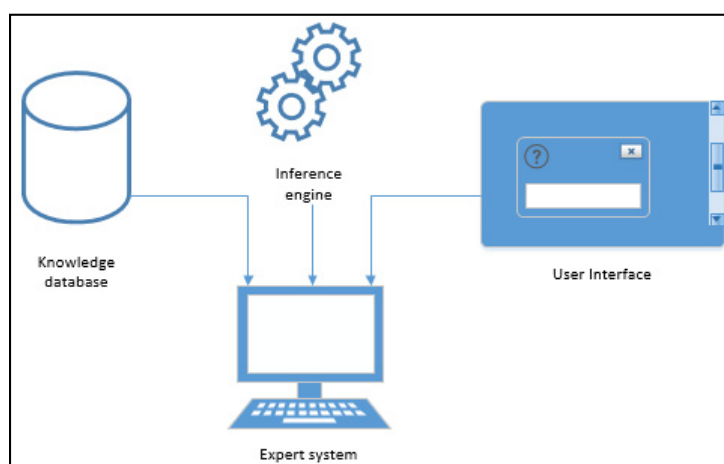


Figure 3.9 Composants d'un système expert

Les connaissances d'un être humain se catégorisent sous deux formes : les connaissances tacites et les connaissances explicites (McInerney, 2002). La première représente une forme de connaissance informelle qui est acquise via l'expérience ou encore qui est le résultat d'une action. La deuxième catégorie provient d'une connaissance tacite ayant subi un processus d'élicitation afin d'être documentée sous une forme s'apparentant à une procédure, un processus ou encore un principe (McInerney, 2002; Okafor et Osuagwu, 2007; Tilotma et Deepali, 2012). Le Tableau 3.2, tiré de McInerney (2002), résume les différentes caractéristiques propres à ces deux catégories de connaissances. Les connaissances tacites, basées sur l'expérience, sont généralement subconscientes ou encore, difficile à articuler. En revanche, les connaissances explicites sont généralement codifiées, partagées ou documentées.

Tableau 3.2 Caractéristiques des connaissances tacites et explicites
Tirée de McInerney (2002)

Implicit or tacit knowledge	Explicit knowledge
Subconscious	Formally articulated
Perceived	Elucidated
Unaware	Aware
Difficult to articulate or unspoken	Fixed
Experienced based	Codified
Transferred through conversation	Documented (written, taped, recorded, digitized, etc.)
Embedded in stories and narratives	Stored in repositories (databases, files, etc.)
Escapes observation	Can be viewed or heard
Held within self	Shared with others
Personal	Organizational
Insights and understandings	Pushed or pulled
Judgments	Reports, lessons learned
Assumptions	

“We can know more than we can tell” (Polanyi, 1983, p. 4).
^a Adapted from Polanyi (1962, 1983) and Baumard (2001).

Tilotma et Deepali (2012) soutiennent la catégorisation des connaissances ci-dessus. Par contre, ceux-ci apportent une autre dimension en affirmant que ce sont les connaissances explicites qui sont utilisées dans la base de connaissances, et que celles-ci peuvent se

regrouper en deux autres catégories : les connaissances procédurales et les connaissances déclaratives. Cette catégorisation est partagée par d'autres auteurs (Okafor et Osuagwu, 2007; Ruschitzka, Suchodolski et Wróbel, 2010) et elle sera donc utilisée pour la suite de notre développement. Les sections suivantes décrivent les deux catégories et leurs méthodes de représentation des connaissances d'un expert pertinentes à notre projet de recherche, ainsi qu'au développement de notre système expert.

3.3.1 Connaissances procédurales

Les connaissances d'un expert que nous appelons « procédurales » sont les connaissances à propos de « comment faire quelque chose » (Tilotma et Deepali, 2012). Ce type de connaissances relève souvent de procédures, stratégies, modèles, etc. En d'autres mots, elles représentent les différentes étapes nécessaires à l'atteinte d'un objectif.

Par sa structure « cause - conséquence » ou « action - réaction », les connaissances procédurales se prêtent bien à une structure basées sur le format d'une règle de type « *IF* [condition] *THEN* [résultat] » appelée règle de décision (*Decision Rule*) (Kaula, 2012). L'avantage de cette structure consiste en sa facilité de construction, d'implantation, de maintenance et d'interprétation (Okafor et Osuagwu, 2007).

Un des premiers systèmes experts développés avec cette structure de représentation fût le système MYCIN, créé par Edward Shortliffe (Shortliffe, 1976a; 1976b). Le but de ce système était de fournir une aide à la décision en fournissant un diagnostic médical préliminaire basé sur les symptômes du patient. Le système questionne l'utilisateur pour obtenir des informations médicales afin de poser un diagnostic quant à la possible bactérie pouvant causer les symptômes. La Figure 3.10 présente un exemple de règle de décision utilisé par le système afin de produire le diagnostic. Dans sa première version, environ 200 règles de décision constituaient sa base de connaissance (Shortliffe, 1976a; 1976b).

```
IF:  1) THE STAIN OF THE ORGANISM IS GRAMPOS, AND
      2) THE MORPHOLOGY OF THE ORGANISM IS COCCUS,
      AND
      3) THE GROWTH CONFORMATION OF THE ORGANISM
      IS CLUMPS
THEN: THERE IS SUGGESTIVE EVIDENCE (.7) THAT THE
      IDENTITY OF THE ORGANISM IS STAPHYLOCOCCUS
```

Figure 3.10 Exemple de règle de
décision du système MYCIN
Tirée de Shortliffe (1976a); (1976b)

En plus du domaine de la médecine, d'autres systèmes ont été développés dans différentes industries. Par exemple, l'assurance (Abdullah, Sawar et Ahmed, 2009; 2010) ou encore l'industrie de la finance (Kaula, 2012). Le secteur de la fabrication par un procédé d'usinage avec machine-outil CNC n'a également pas été ignoré. En effet, Rubio et al. (2013) ont développé un système expert basé sur des règles de décision dans ce contexte. La problématique que leur système vient résoudre concerne le choix des paramètres de coupe optimaux des outils de fraisage. Les auteurs maintiennent que ce processus est laissé à l'intuition des opérateurs et donc, que les entreprises ne profitent pas des avantages qu'une méthode quantitative offre. La Figure 3.11 présente un exemple des règles de décision développées pour ce système expert. Une particularité intéressante de celui-ci est que l'extrant du système est défini par une fonction de coût. Autrement dit, la fonction de coût oriente le choix des paramètres de coupe optimaux. Il est donc intéressant de voir qu'il est possible de combiner des règles de décision avec une fonction mathématique. Le lecteur peut se référer à Rubio et al. (2013) pour le détail de la fonction, ainsi que du schéma conceptuel du système expert.

Schematic representation of the expert rules.	
Rule	Knowledge base
1.	Since stability lobes are calculated from a linear approximation a stability region inexactitude is added. Also, a robustness factor which influences the axial depth of cut is taken into account
2.	Cutting space parameters extracted from lobes and restrictions in spindle power availability and cutting force controllers
3.	Considerations about controlling the forces; using model reference adaptive control for keeping forces under prescribed upper limit
4.	Sampling period considerations to maximize computer resources
5.	Spindle power consumption restrictions
6.	Feed drive limitations
7.	Giving appropriate the initial cutting space parameter to decrease searching time
<i>Rules to inference with the cost function</i>	
8.	Initial weighting factors selection; the selection of right initial weighting factors plays an important role in achieving good solutions in short time
9.	Declaration of standardizing factors
10.	Selection of cutting parameters criterion; coarse and fine criterion
11.	Automatic rule of weighting factors modification
12.	Automatic weighting factors modification through gradient descendent method. An alternative way to modify automatically the weighting factors is proposed
13.	Renormalization of the weighting factors if they are re-programmed automatically through rules 11 and 12
14.	Re-parameterization of weighting factors
<i>Feedback and expert HMI rules</i>	
15.	Chatter vibration detection algorithm is added to be more reliable
16.	Chatter suppression algorithm to lead the system to stable and reliable cutting conditions
17.	Monitoring signals
18.	Interaction with expert engineers and operators

Figure 3.11 Exemple de règles de décision pour la sélection des paramètres de coupe
Tiré de Rubio et al. (2013)

Dans un contexte similaire, Tan et al. (2015) ont développé un système expert permettant de sélectionner les outils de coupe optimaux dans un contexte d'usinage par rotation (i.e. le produit à être usiné est en rotation autour d'un axe central). Les auteurs soutiennent, dans le même ordre d'idées que Rubio et al. (2013), que le processus de sélection des outils est long et compliqué lorsque celui-ci est laissé à l'expérience des opérateurs. La Figure 3.12 présente un exemple de sortie de leur système expert. Dans cette figure, l'application suggère une machine-outil en fonction des besoins de l'utilisateur. Le concept exploré par les auteurs est intéressant, puisque c'est une problématique que nous pouvons trouver dans les entreprises manufacturière. Par contre, il aurait été intéressant que les auteurs présentent une étude de cas comparative pour démontrer la validité de leur système.

RESUL		MACHINE MODEL	LFS10_2SP	Enter	Print	Be
MACHINE	SCORE	MANUFACTURER	OKUMA			USER INPUT
LFS10_2SP	0.895	MODEL	LFS10_2SP			
LT300_M	0.861					
LT200_M	0.594					
IIT_40A	0.509	MACHINE HEIGHT	2500			NULL
SmartAT-20	0.500	MACHINE LENGTH	1876			NULL
SmartQT-15	0.500	MACHINE WIDTH	1300			NULL
SmartAT_25	0.500					
		MAX SWING DIAMETER	450			450
		MAX CUTTING DIAMETER	120			120
		MAX CUTTING LENGTH	80			80
		SPINDLE TYPE	140 FLAT			A2_8
		NUMBER OF SPINDLE	2			1
		SPINDLE DIRECTION	HORIZONTAL			HORIZON TAL
		MOTOR POWER	10			NULL
		MAX SPINDLE SPEED	6000			NULL
		SPINDLE BORE	53			NULL
		NUMBER OF ATC SYSTEM	2			NULL
		TOTAL NUMBER OF TOOLS	20			NULL
		STANDARD TOOL SIZE	20			NULL
		INDEXING TIME	0.3			NULL
		X TRAVEL	130			NULL
		Z TRAVEL	145			NULL
		X RAPID TRANSVERSE RATE	24000			NULL
		Z RAPID TRANSVERSE RATE	24000			NULL

Figure 3.12 Exemple de sortie du système expert de sélection des outils de coupe
Tirée de Tan et al. (2015)

Nous constatons donc que des systèmes experts ont été développés dans notre contexte de recherche, ce qui nous conforte dans notre approche. Par contre, nous désirons utiliser les informations contenues dans le modèle 3D enrichi. Ce faisant, est-ce que des systèmes experts ont été développés autour des logiciels de conception assistée par ordinateur? Oui, Yang et Han (2006) ont développé un système expert en utilisant les données d'un modèle 3D couplé à des règles de décision. La problématique qu'ils ont résolu grâce à leur système est qu'il est coûteux pour une entreprise de corriger les différentes erreurs dans un modèle 3D. Ces erreurs sont soit la résultante d'un manque d'expérience de la part du concepteur ou bien une erreur lors des échanges de données. Au niveau de la base de connaissance, il est intéressant de voir que les auteurs ont réussi à convertir les connaissances des concepteurs experts en règles de la forme « *IF* [condition] *THEN* [résultat] ». La Figure 3.13 un exemple de l'interface utilisateur du système expert développé.

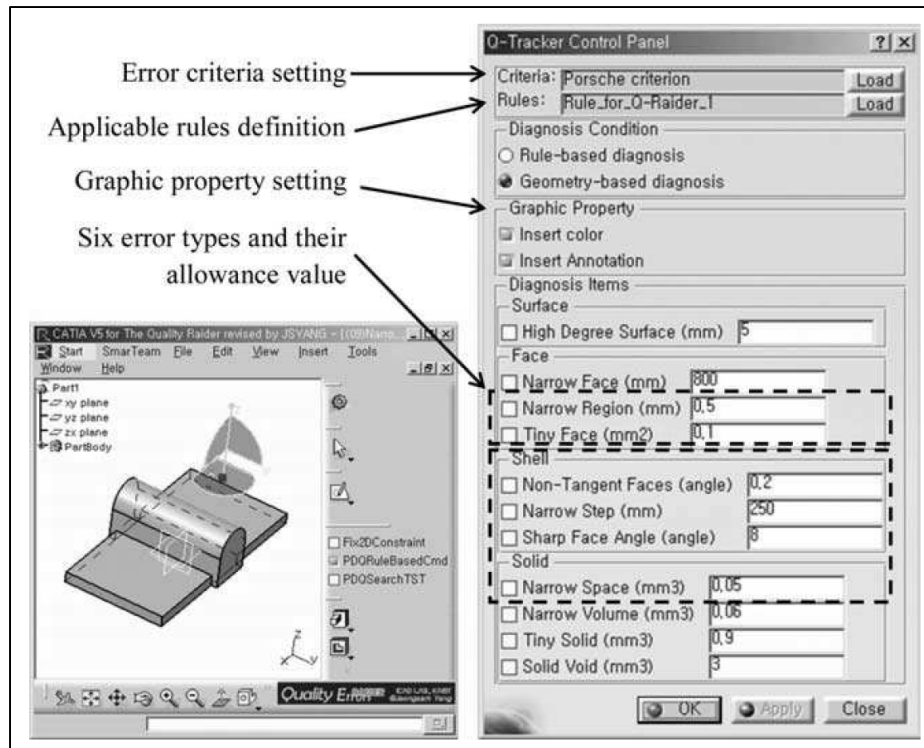


Figure 3.13 Interface du système expert de correction des modèles 3D
Tirée de Yang et Han (2006)

Comme dernier exemple, Amici, Campana et Mancini (2007) ont aussi développé un système expert en relation avec les logiciels de conception assistée par ordinateur. Les auteurs ont créé un système permettant de fournir une conception optimale pour une section des systèmes d'échappements des automobiles. Ce système, basé sur une série de règles de décision, permet de réduire les efforts de conception.

Finalement, nous voyons que ce type de représentation a été largement exploré, et ce, depuis les premiers systèmes experts. Grâce aux exemples énumérés ci-dessus, nous constatons également que les connaissances de type procédurales s'expriment bien grâce aux règles de décision et fournissent des résultats intéressants. Dans un autre ordre d'idées, l'étendue des connaissances qui peut être représentée par cette méthode est fortement limitée par sa structure prédéfinie (« *IF* [condition] *THEN* [résultat] »). Par exemple, les idées, les concepts, les faits, etc. se représentent difficilement par cette structure. La section suivante présente donc des méthodes développées afin de répondre à ces exigences.

3.3.2 Connaissances déclaratives

Les connaissances d'un expert que nous appelons « déclaratives » font référence à la représentation d'objets, d'idée, de concept, etc. (Tilotma et Deepali, 2012). Par exemple, les connaissances que la Terre est ronde et que la Terre est une planète sont des connaissances déclaratives.

Contrairement aux connaissances procédurales, cette forme de connaissance ne suit pas une structure « cause-conséquence ». Dès lors, ce type de connaissance trouve son utilisation dans la représentation d'un concept. Grâce à cette caractéristique, il est possible de remarquer l'absence de règle de décision dans la représentation de ce type de connaissances. Également, la difficulté d'abstraction étant plus élevée avec ce type de connaissance qu'avec les connaissances procédurales, de nombreuses méthodes sont développées afin d'obtenir une méthode de représentation idéale. Les sections qui suivent présentent certaines méthodes pouvant être appliquées à notre contexte de recherche.

3.3.2.1 Ontologie

Une première méthode qui est développée et expérimentée dans plusieurs travaux est une représentation des connaissances par la méthode appelée « ontologie ». Le terme ontologie a une longue histoire en philosophie et le dictionnaire Larousse le définit comme étant l'« [...] étude de l'être en tant qu'être, de l'être en soi. » (Larousse, 2015). Par contre, dans notre contexte, ce terme est repris sous une autre forme où il est défini par Tah et Abanda (2011) comme étant une représentation de l'information. Saa et al. (2012) acceptent cette définition, mais lui apportent une précision en définissant une ontologie comme étant une classification exhaustive et définitive des entités, ainsi que des relations entre les entités.

Ensuite, ces derniers ont développé une ontologie dans le domaine de la conception des portiques de chemins de fer (Figure 3.14). Cette ontologie permet donc, à une personne n'étant pas nécessairement versée dans l'art, de comprendre ce concept qui est, de prime abord, compliqué. La Figure 3.15 présente un extrait de l'ontologie développée par cette

équipe. On y retrouve donc les différentes entités, ainsi que toutes les relations entre celles-ci.

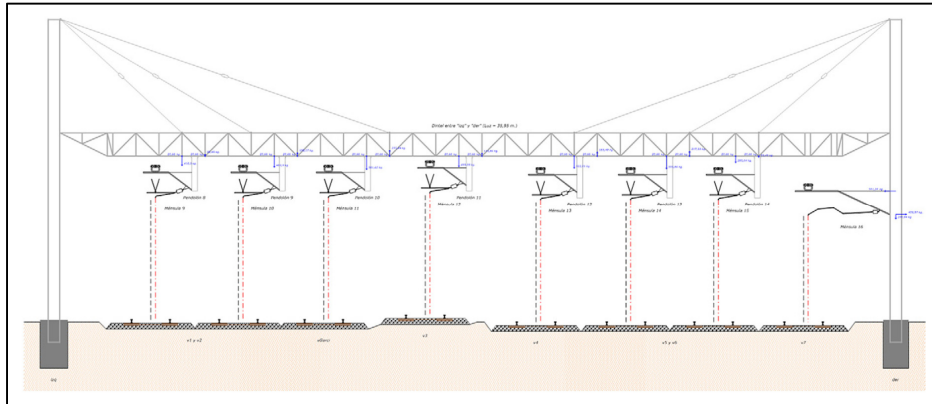


Figure 3.14 Exemple de portiques de chemin de fer
Tirée de Saa et al. (2012)

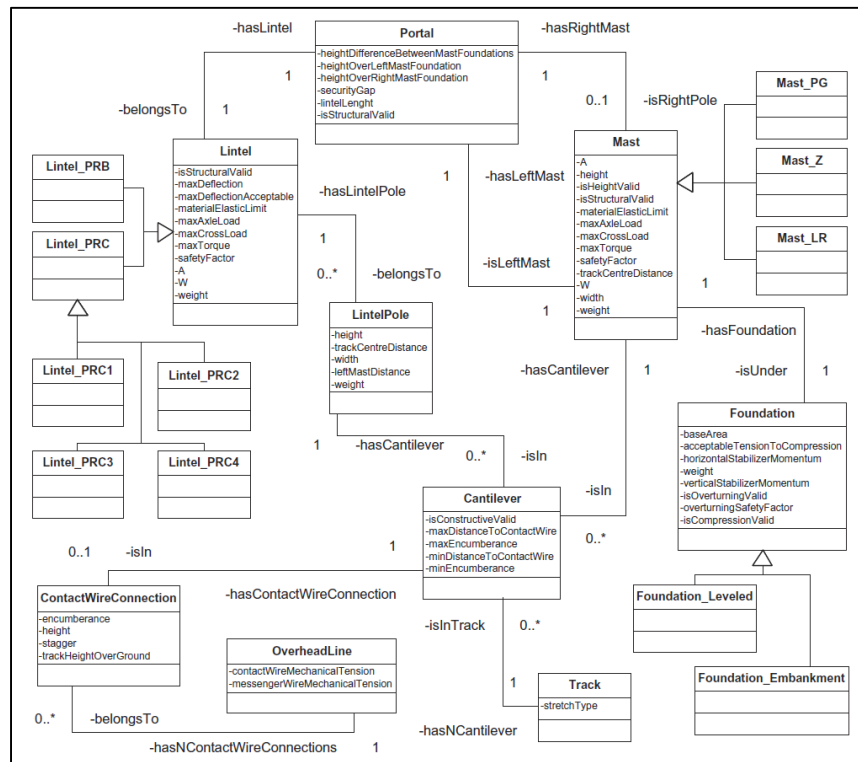


Figure 3.15 Extrait de l'ontologie développée pour
les portiques de chemin de fer
Tirée de Saa et al. (2012)

Tah et Abanda (2011) ont également développé une représentation ontologique, mais dans le domaine des systèmes photovoltaïques (Figure 3.16). La présentation de Saa et al. (2012) permet une compréhension plus facile de ce concept. La Figure 3.17 présente un extrait de l'ontologie développée.

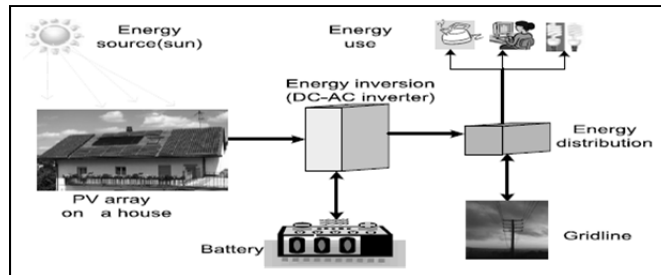


Figure 3.16 Exemple de système photovoltaïque
Tirée de Tah et Abanda (2011)

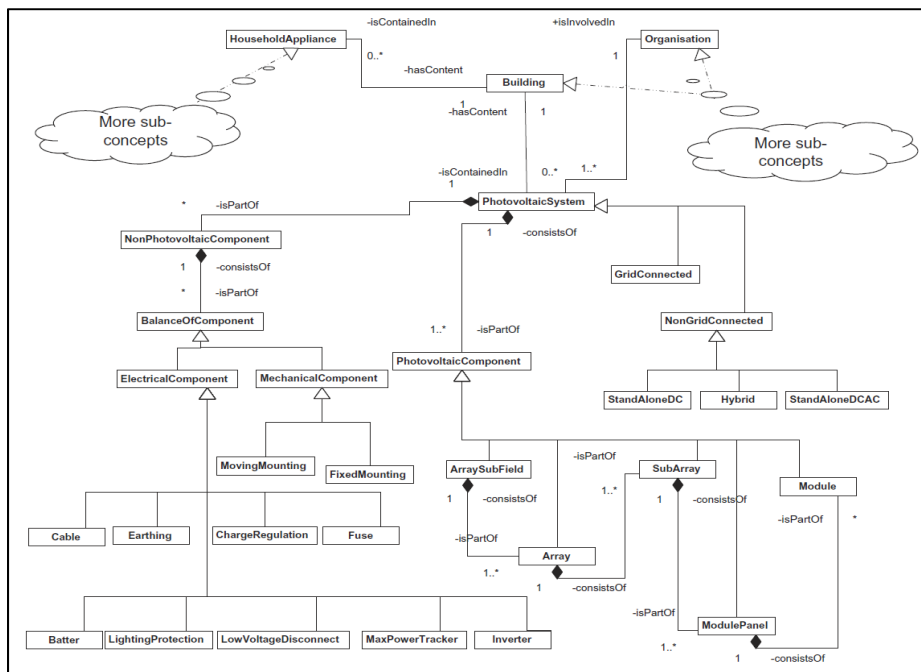


Figure 3.17 Exemple d'ontologie pour les systèmes photovoltaïques
Tirée de Tah et Abanda (2011)

L'avantage d'une représentation des connaissances par une méthode telle que l'ontologie est qu'elle intègre une structure à un concept dans le cadre d'une terminologie unique (Saa et al.,

2012). Par contre, dans les deux exemples précédents, la représentation des connaissances par l'ontologie n'était pas suffisante pour la conception d'un système expert. En effet, des règles de décisions ont dû être combinées à l'ontologie afin que le système expert, développé dans chaque exemple, soit fonctionnel. Par conséquent, lorsque des connaissances déclaratives doivent être intégrées au système expert, une approche combinatoire semble être priorisée. C'est également cette approche qui est utilisée dans les travaux d'Abanda et al. (2011) pour le développement d'une ontologie dans le domaine de la distribution des terrains commerciaux au Zambie.

3.3.2.2 Frame

Une deuxième méthode utilisée pour représenter les connaissances déclaratives est la méthode des *Frames*. Cette méthode a été introduite par Minsky (1974) comme étant une méthode pour représenter une situation stéréotype et l'adapter selon les détails de celle-ci. Un *Frame* est généralement composé d'une ou plusieurs *Slots* qui représentent le détail ou des attributs du *Frame*. Par ailleurs, cette méthode peut être comparée à la programmation orientée objet dans laquelle chaque objet possède des attributs (ex : une voiture possède une couleur) (Rattanapruteep et Chittayasothorn, 2006). De façon plus récente, Sadeghian et Lavers (2004) définissent ce concept comme étant une méthode pour structurer des données.

Sadeghian et Lavers (2004) utilisent la méthode de représentation des *Frames* pour représenter les connaissances d'un expert dans le domaine de la conception des noyaux d'inducteur. La Figure 3.18 présente une version graphique de la représentation par *frames* pour l'ensemble d'un inducteur :

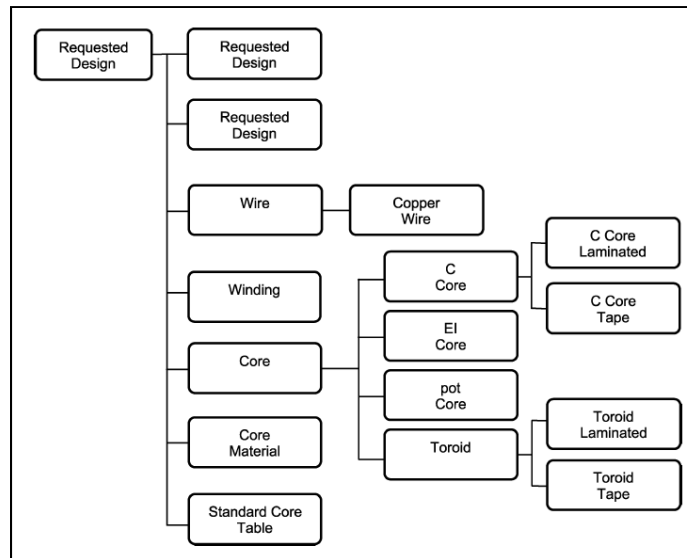


Figure 3.18 Représentation par *frames* de la connaissance d'un inducteur
Tirée de Sadeghian et Lavers (2004)

Il est possible de remarquer que la représentation par *Frames* ressemble, à haut niveau, à la nomenclature (*Bill of Materials*) d'un produit. De plus, la Figure 3.19 présente les attributs (*Slots*) d'un inducteur :

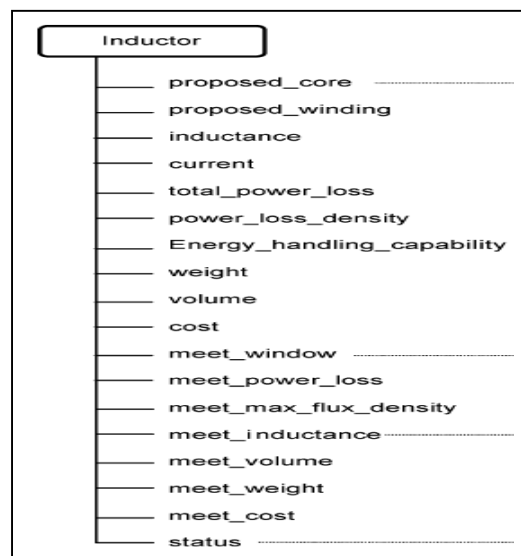


Figure 3.19 Attribut (*slots*) d'un *frame*
Tirée de Sadeghian et Lavers (2004)

L'avantage d'une méthode de représentation à l'aide des *Frames* est qu'il est facile de visualiser les connaissances et que celles-ci sont exprimées en termes connus pour une personne versée dans l'art (Sorenson et al., 2008). D'autre part, et tout comme la méthode de représentation par ontologie, la représentation par *Frames* n'est pas suffisante pour exploiter les connaissances dans un système expert. Il faut donc combiner cette méthode avec des règles de décision. C'est le cas de l'exemple précédent, où Sadeghian et Lavers (2004) ont utilisé les *frames* pour représenter les connaissances reliées à leur concept et ont élaboré des règles de décision pour exploiter celles-ci (Figure 3.20).

R-modify-11-Window-Problem-Decrease-Number-of-Turns
R-modify-12-Window-Reduce-Wire-Size
R-modify-13-Window-Problem-Select-New-Core-Bigger-Window-Area
R-modify-14-Loss-Density-Problem-Decrease-Number-of-Turns
R-modify-15-Loss-Density-Problem-Increase-Wire-Size
R-modify-16-Loss-Density-Problem-Select-New-Core-Smaller-MLT
R-modify-17-Loss-Density-Problem-Increase-Air-Gap
R-modify-18-Loss-Density-Problem-Select-New-Core-Reduce-Iron-Weight
R-modify-19-Loss-Density-Problem-Select-New-Core-Increase-Surface-Area
R-modify-21-Flux-Density-High-Decrease-Number-of-Turns
R-modify-22-Flux-Density-High-Increase-Air-Gap
R-modify-23-Flux-Density-High-Select-New-Core-Decrease-Core-Area
R-modify-24-Flux-Density-Low-Increase-Number-of-Turns
R-modify-25-Flux-Density-Low-Decrease-Air-Gap
R-modify-26-Flux-Density-Low-Select-New-Core-Increase-Core-Area
R-modify-27-Inductance-High-Decrease-Number-of-Turns
R-modify-28-Inductance-High-Increase-Air-Gap
R-modify-29-Inductance-High-Select-New-Core-Decrease-Core-Area
R-modify-31-Inductance-Low-Increase-Number-of-Turns
R-modify-32-Inductance-Low-Decrease-Air-Gap
R-modify-33-Inductance-Low-Select-New-Core-Increase-Core-Area
R-modify-34-Change-Design-Status
R-modify-35-Deactivate-Modify-Activate-Test

Figure 3.20 Exemple de règles d'affaire utilisées avec une représentation par *frames*
Tirée de Sadeghian et Lavers (2004)

Finalement, le Tableau 3.3 résume les différentes catégories de connaissances, ainsi que les différentes méthodes associées à celles-ci.

Tableau 3.3 Résumé des méthodes de représentation des connaissances d'un expert

Catégorie	Méthode	Auteurs
Procédurales	Règles de décision	Shortliffe (1976a; 1976b) Rubio et al. (2013) Yang et Han (2006) Tan et al. (2015) Amici, Campana et Mancini (2007) Abdullah, Sawar et Ahmed (2009; 2010) Kaula (2012)
Déclaratives	Ontologie	Saa et al. (2012) Abanda et al. (2011) Tah et Abanda (2011)
Déclaratives	<i>Frames</i>	Sadeghian et Lavers (2004)

3.4 Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre, une revue sommaire de la littérature pertinente à notre sujet a été présentée. La première partie de cette revue portait sur les divers travaux menés autour du concept de la complexité. Nous avons constaté que d'autres chercheurs sont intéressés par ce sujet et ont tenté d'élaborer des modèles d'estimation de la complexité afin de quantifier celle-ci. Malgré nos recherches, nous n'avons pas découvert de travaux portant sur la complexité dans le domaine des produits usinés par une machine-outil CNC. À ce point de notre étude, des questions restent donc toujours en suspens : comment pouvons-nous définir et quantifier la complexité dans le contexte spécifique des produits usinés par machine-outil CNC? Pouvons-nous utiliser seulement les informations du modèle 3D enrichi pour estimer un indice de complexité?

La deuxième partie de cette revue portait sur les travaux s'apparentant aux systèmes experts. Nous avons observé que plusieurs systèmes experts avaient été mis en place dans des industries de natures différentes (usinage, énergie, finance, assurance, etc.). De surcroît, nous avons étudié des systèmes experts qui ont été développés et implantés dans des contextes s'apparentant à notre domaine de recherche. Malgré notre investigation, nous n'avons pas recensé de travaux où les auteurs utilisent les annotations d'un modèle 3D enrichi pour

alimenter un système expert. Nous restons donc sans réponse quant à la faisabilité de notre approche.

Malgré tout, la littérature nous a démontré que des méthodes ont été développées de manière à répliquer et stocker, sous forme de données électroniques, la connaissance des experts industriels. Cette partie de la revue nous permet donc de faire une sélection éclairée des méthodes à prioriser pour utiliser et conserver les connaissances des experts de notre partenaire industriel.

CHAPITRE 4

CADRE DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES RETENUES

La revue de littérature nous procure une meilleure compréhension des différents travaux effectués récemment en rapport avec notre problématique. Subséquemment, cette revue nous permet d'établir un point de départ, présenté dans ce chapitre, qui détaille tous les postulats retenus. Tout d'abord, nous présentons au lecteur l'environnement dans lequel notre projet se déroule. Ensuite, nous énumérons des hypothèses pour établir une première approche afin de modéliser la complexité dans le cas spécifique des produits usinés. Finalement, un cadre de recherche est proposé afin de situer et encadrer la portée de notre travail.

4.1 Environnement de recherche

Notre projet se déroule en partenariat avec l'entreprise Héroux-Devtek Inc. (Canada). Héroux-Devtek Inc., est un leader mondial dans la conception, fabrication, réparation et assemblage de composants et de systèmes de train d'atterrissage pour divers fabricants d'équipement original (OEM) de l'industrie aéronautique.

Notre projet est réalisé avec une division, située à Laval (Québec), d'Héroux-Devtek Inc. Cette division est spécialisée dans l'usinage de haute précision de matériaux (acier outil, aluminium, titane, etc.) pour la fabrication, réparation et assemblage de composants de train d'atterrissage. La division de Laval est en mesure de mettre à notre disposition toutes les ressources nécessaires (matérielles, données informatiques et humaines) permettant le bon déroulement de notre projet et l'atteinte de ses objectifs.

4.2 Cadre de recherche

Devant l'envergure initiale de ce projet, il est important de bien baliser la portée de celui-ci. C'est pourquoi des limitations sont introduites dès les premières phases dans le but d'encadrer notre projet. Les points suivants présentent donc le cadre de recherche de notre projet :

- 1) Comme limitation, seulement la famille de procédés du partenaire industriel sont considérés. Essentiellement, il s'agit d'un atelier d'usinage de haute précision³;
- 2) L'interprétation du tolérancement dimensionnel et géométrique des produits est faite selon le formalisme ASME Y14.5 (version 1994 et 2009);
- 3) Nous considérons l'avis des experts du partenaire industriel, lors du processus d'élicitation, comme cohérent et représentatif;
- 4) Nous considérons les modèles 3D comme une source parfaitement fidèle à la définition nominale du produit. En d'autres termes, les erreurs/difficultés dues à une mauvaise version du modèle 3D ne sont pas traitées dans le présent projet;
- 5) Nous considérons seulement les annotations sémantiques du fichier modèle 3D enrichi comme source fiable pour les requis dimensionnels et géométriques (tolérances de profil, positionnements, etc.);
- 6) Sauf indication contraire, tout traitement statistique est effectué en s'appuyant sur des normes à portée internationale (ex : ISO 22514);
- 7) Nous considérons seulement les feuilles de notes en format PDF non scannée. Il est possible d'utiliser un format scanné du fichier PDF à l'aide de techniques de reconnaissance optique de caractères, mais pour des raisons d'intendance, nous préférons nous limiter à ce format;
- 8) Nous considérons que les intrants de notre modèle proviennent seulement des informations contenues dans les fichiers suivants :
 - a) Le modèle 3D enrichi du produit devant être analysé;

³ De plus, certains procédés spéciaux sont effectués à l'interne : Test Non-Destructif (NDT), *Brush plating of cadmium by electrodeposition* et *Chemical conversion*

- b) Le modèle 3D du brut servant à la fabrication du produit;
- c) Le fichier PDF de la feuille de notes.

Ce choix est basé sur notre objectif de produire un modèle d'estimation qui peut être utilisé dès la phase de conception. Ce faisant, nous n'utilisons pas les données qui proviennent d'autres sources telles que la machine-outil CNC, la gamme d'opérations ou encore du choix des outils de coupe. Finalement, afin de rester synthétique dans cet ouvrage, nous considérons que le terme « Modèle 3D enrichi » comprend les éléments a) à c) énumérés ci-dessus.

4.3 Hypothèses retenues

Tout d'abord, rappelons-nous la première question de recherche : comment pouvons-nous exprimer la complexité sous la forme d'un indice fortement corrélé avec la capacité du procédé de fabrication? Comme première approche, nous suggérons que la complexité d'un produit usiné est fonction de quatre (4) éléments :

- 1) Le volume à usiner [in^3] : c'est-à-dire, la quantité de matière qu'il faut retirer du matériau brut
- 2) L'ordre de grandeur des éléments géométriques (*features*) [-] : Un élément géométrique est défini comme étant un élément primitif (ex. : cylindre, poche, etc.);
- 3) Les annotations [-] : Tel que défini à la section 3.1.2;
- 4) Les spécifications [-] : Tel que défini à la section 3.1.3.

CHAPITRE 5

COLLECTE DES DONNÉES

Dans le cadre de ce projet de recherche, une grande quantité de données est nécessaire pour l'élaboration du modèle d'estimation. Ce faisant, quatre catégories de données sont collectées auprès de l'entreprise partenaire. La première catégorie représente les différentes familles de produit fabriqués par le partenaire industriel, la deuxième catégorie se compose des différentes règles de décision, la troisième représente les indices liées aux matériaux servant à la fabrication des produits et finalement, la dernière catégorie est le résultat d'un processus d'élicitation des connaissances d'un groupe d'experts industriels composé de trois agents seniors de méthodes et du directeur de l'ingénierie manufacturière.

Les trois premières catégories peuvent être considérées comme des entrants à un modèle (que nous cherchons à définir) et dont l'influence est, a priori, significative pour la dernière catégorie qui est l'extrait du modèle.

Les sections suivantes présentent en détail chaque catégorie de données.

5.1 Les catégories de produits

Dans notre contexte, les catégories de produits constituent des ensembles de produits fabriqués par le partenaire industriel. Ceux-ci sont regroupés en différentes catégories selon un degré de similarité géométrique, difficulté de fabrication et de fonctionnalité. Il s'agit donc d'une classification issue d'une opération de regroupement (*clustering*).

La classification en catégories discrètes possède une double utilité. Elle permet de cerner quelles sont les principales catégories de produits fabriqués par l'entreprise, puis de définir l'étendue de notre recherche en terme de produits analysés.

Afin de déterminer les différentes familles de produits, la première étape est une période d'observation *in situ* afin d'identifier quels sont les principaux produits fabriqués. De façon subjective, une liste non-exhaustive est dressée. Puis, afin de contrôler la validité des données collectées, une phase de validation est effectuée avec le groupe d'experts. Les résultats de cette validation et les différentes familles de produits définies se trouvent au Tableau 5.1 :

Tableau 5.1 Catégories de produits

Numéro	Nom	Numéro	Nom
1	<i>Piston OLEO</i>	8	<i>Cylinder</i>
2	<i>Head end</i>	9	<i>Piston rod</i>
3	<i>Yoke</i>	10	<i>Grip</i>
4	<i>Bellcrank</i>	11	<i>Link</i>
5	<i>Torque tube</i>	12	<i>Pin</i>
6	<i>Housing</i>	13	<i>Lock link</i>
7	<i>Axle beam</i>	14	<i>Rod end</i>

5.2 Règles de décision

Tout d'abord, dans notre contexte, les règles de décision se définissent comme étant la représentation explicite de la connaissance d'un expert. Ces règles de décision peuvent se répertorier en deux catégories :

- Règles de décision reliées aux annotations d'un produit;
- Règles de décision reliées aux spécifications d'un produit.

Suite au processus d'élicitation des connaissances des experts chez le partenaire industriel, il nous est possible de constater que les connaissances sont généralement exprimées sous la forme « cause-conséquence ». De ce fait, la méthode de représentation par règle de décision explorée à la section 3.3.1 est un choix idéal pour représenter les connaissances des experts du partenaire industriel.

Tel qu'énoncé ci-dessus, la collecte de ces données s'est faite à l'aide d'un processus d'élicitation visant à transformer les connaissances tacites des experts en connaissances explicites représentées sous la forme « *IF* [condition] *THEN* [résultat] ». Le processus

d'élicitation s'effectue à l'aide de rencontres périodiques avec le groupe d'experts industriels. Lors de ces rencontres, des produits fabriqués entrant dans l'une ou l'autre des catégories de produits (Tableau 5.1) sont présentés. À partir de ce moment, chaque participant exprime, en ses mots, les difficultés ou complexités liées au produit évalué. Les résultats de ce processus se trouvent aux sections 5.2.1 et 5.2.2.

5.2.1 Règles de décision reliées aux annotations

Les règles de décision reliées aux annotations sont purement basées sur les informations d'une annotation (valeur nominale, intervalle de tolérance et type) et ne prend pas en compte la géométrie à laquelle celle-ci est attachée sémantiquement. Les règles sont donc basées sur deux paramètres :

- Le type de l'annotation,
- L'intervalle de tolérance.

Le processus d'élicitation nous permet de rendre explicite plus de 85 règles reliées aux annotations. Le Tableau 5.2 présente un extrait de ces règles où T_{ji} représente la valeur de la borne supérieur ou inférieur i de l'intervalle de tolérance T de l'annotation j .

Tableau 5.2 Extrait des règles de décision reliées aux annotations

Numéro	Type	Règle
1	Position	$IF T_{ji} \geq 0.020 THEN Complexity = 0$
2	Position	$IF 0.020 < T_{ji} \geq 0.010 THEN Complexity = 1$
3	Position	$IF 0.010 < T_{ji} \geq 0.005 THEN Complexity = 2$
4	Position	$IF 0.005 < T_{ji} \geq 0.002 THEN Complexity = 3$
5	Position	$IF T_{ji} < 0.002 THEN Complexity = 4$

5.2.2 Règles de décision reliées aux spécifications

Dans un premier temps, une liste non-exhaustive qui contient la majorité des spécifications que le partenaire industriel doit respecter est développée. Dans le contexte des spécifications, nous présumons que la complexité est divisée en deux catégories : la complexité manufacturière et la complexité d'approvisionnement. Ces deux aspects représentent d'une part, l'incertitude reliée au respect de la norme lors de la fabrication du produit, et d'une autre part, l'incertitude reliée à la disponibilité et la conformité des sources d'approvisionnement. Ce dernier est vrai principalement dans le cas des spécifications de procédés spéciaux (ex : peinture, anodisation, etc.). Par conséquent, pour le processus d'élicitation des connaissances reliées aux spécifications, nous avons inclus l'acheteur technique sénior au groupe d'experts industriel. Finalement, pour chaque spécification la complexité est définie d'un point de vue manufacturier et d'un point de vue approvisionnement.

Le processus d'élicitation avec ces experts a permis de définir plus de 285 règles de décisions reliées aux spécifications. Le Tableau 5.3 présente un extrait de ces règles où z représente la référence d'une spécification.

Tableau 5.3 Extrait des règles de décision reliées aux spécifications

Numéro	Nom	Règle
1	<i>PENETRANT INSPECTION</i>	<i>IF z = HPS-106 THEN Manufacturing Complexity = 1 and Procurement Complexity = 1</i>
2	<i>CAD PLATING</i>	<i>IF z = HPS-107 THEN Manufacturing Complexity = 1 and Procurement Complexity = 1</i>
3	<i>SULPHURIC ACID ANODIZING</i>	<i>IF z = HPS-110 THEN Manufacturing Complexity = 1 and Procurement Complexity = 1</i>
4	<i>CHROMIC ACID ANODIZE</i>	<i>IF z = HPS-111 THEN Manufacturing Complexity = 1 and Procurement Complexity = 1</i>
5	<i>SHOT PEENING</i>	<i>IF z = HPS-126 THEN Manufacturing Complexity = 2 and Procurement Complexity = 2</i>

5.3 Indice de matériau

Dans notre contexte de recherche, ce que nous appelons un indice de matériau représente un indice reflétant la complexité reliée à un matériau (ex : titane TI-6AL-4V) utilisé dans la fabrication d'un produit. Peu de littérature fournissent une méthodologie permettant de quantifier les incertitudes manufacturières d'un matériau. Pour cette raison, et de concert avec le groupe d'experts industriels, nous avons décidé d'un standard qui est utilisé dans le calcul de notre modèle. Ce standard se base sur deux aspects d'un matériau :

- L'indice d'usinabilité (*Machinability Rating*),
- L'indice de contraintes résiduelles (*Residual Stress Rating*).

Les sections 5.3.1 et 5.3.2 expliquent ces deux aspects, ainsi que les données qui sont collectées.

5.3.1 Indice d'usinabilité

L'indice d'usinabilité, tel qu'utilisé dans notre contexte, tire son origine des travaux de l'*American Iron and Steel Institute* (AISI). Dans leurs travaux, ils considèrent l'usinabilité comme étant la facilité avec laquelle un matériau est travaillé à l'aide d'un outil de coupe. Cet indice est calculé en faisant le ratio de la vitesse d'usinage d'un matériau à l'aide d'un outil ayant une durée de vie de 60 minutes et de la vitesse d'usinage du matériau de référence. Le matériau de référence est l'acier B1112 ayant une dureté de 160 Brinell. Cette référence s'est vu attribuer un indice d'usinabilité de 100% (Schneider Jr, 2002). Un matériau qui a un indice d'usinabilité supérieur à 100% est donc plus facile à usiner que l'acier B1112 et vice versa.

Il est possible de trouver les principaux indices d'usinabilité sur les documents techniques des différents producteurs de matériaux. Pour nos besoins, et afin de compléter notre collecte de données, une évaluation de l'usinabilité de certains matériaux est effectuée de concert avec le groupe d'experts industriels. Cette évaluation est basée sur l'analyse de la composition chimique et des propriétés mécaniques des matériaux dont les indices

d'usinabilité étaient indisponibles. Le Tableau 5.4 présente les différentes valeurs d'usinabilités (M) utilisées dans le cadre de ce projet.

Tableau 5.4 Indice d'usinabilité

Grade	M	Source	Grade	M	Source
AL 2024	150%	Producteur	4130	72%	Producteur
AL 6061	190%	Producteur	4140	66%	Producteur
AL 7049	120%	Experts	4340	57%	Producteur
AL 7050	120%	Experts	300M	57%	Producteur
AL 7075	120%	Producteur	9310	40%	Producteur
AL 7085	120%	Producteur	135	45%	Experts
AL 7175	120%	Experts	AerMet 100	45%	Experts
AL A356	140%	Producteur	Custom 465	25%	Experts
303	75%	Producteur	440C	39%	Producteur
304	40%	Producteur	Ti-6AL-4V	22%	Producteur
PH13-8Mo	40%	Producteur	Ti-10V-2FE-3L	15%	Experts
15-5PH	45%	Producteur	Ti-5AL-5V-5MO-3CR	8%	Experts
17-4PH	45%	Producteur	Bronze C630	30%	Experts

De manière à obtenir un standard pour le calcul de notre indice de complexité, les valeurs du Tableau 5.4 sont séparées en classe. La largeur des classes W_M est obtenue à l'aide de l'équation (5.1).

$$W_M = \frac{Max_M - Min_M}{n} \quad (5.1)$$

Où Max_M représente la valeur maximale de l'indice d'usinabilité M , Min_M représente la valeur minimale de l'indice d'usinabilité et n le nombre de classe désirée. Dans notre contexte, nous utilisons $n = 10$. Ensuite, une valeur entière (I_M) allant de 1 (indice élevé) à 10 (indice faible) est assignée à chaque classe. Le Tableau 5.5 présente les résultats de cette transformation.

Tableau 5.5 Indice d'usinabilité par classe

Classe [% , %[	I_M	Classe [% , %[	I_M
[8%, 26%[	10	[99%, 117%[	5
[26%, 44%[	9	[117%, 135%[	4
[44%, 63%[	8	[135%, 154%[	3
[63%, 81%[	7	[154%, 172%[	2
[81%, 99%[	6	[172%, 190%]	1

Pour terminer, ce sont les valeurs (I_M) de chaque classe (Tableau 5.5) qui sont utilisées pour tous les calculs impliquant l'indice d'usinabilité.

5.3.2 Indice de contraintes résiduelles

Le concept de l'indice de contraintes résiduelles est proposé par le groupe d'experts industriels, car selon eux, l'indice d'usinabilité ne peut pas totalement expliquer le comportement d'un matériau lors de son usinage. Par conséquent, le concept de contraintes résiduelles est proposé pour expliquer cette autre facette du comportement. Il se définit comme étant la capacité d'un matériau à ne pas se déformer lorsque des contraintes sont libérées par le passage d'un outil de coupe. Bien que subjective, les valeurs de contraintes résiduelles sont évaluées par le groupe d'experts industriels.

Tout comme l'indice d'usinabilité, l'indice de contraintes résiduelles s'exprime en pourcentage. En revanche, l'étendue de cet indice est de 0% à 100%. Un indice de 0% exprime une forte déformation, donc un matériau ayant une forte réaction au passage d'un outil de coupe et à l'opposé, un matériau qui possède un indice de 100% exprime une réaction très faible, donc un matériau ayant une très faible réaction au passage d'un outil de coupe. Le Tableau 5.6 présente les résultats de l'évaluation des principaux matériaux utilisés chez le partenaire industriel.

Tableau 5.6 Indice de contraintes résiduelles

Grade	Format	S	Grade	Format	S
AL 2024	Plaque	100%	4130	Plaque	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	80%		<i>Forging</i>	90%
AL 6061	Plaque	100%	4140	Plaque	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	80%		<i>Forging</i>	90%
AL 7049	Plaque	100%	4340	Plaque	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	70%		<i>Forging</i>	90%
AL 7050	Plaque	100%	300M	Plaque	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	70%		<i>Forging</i>	90%
AL 7075	Plaque	100%	9310	Plaque	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	70%		<i>Forging</i>	90%
AL 7085	Plaque	100%	135	Plaque	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	70%		<i>Forging</i>	95%
AL 7175	Plaque	50%	AerMet 100	Plaque	100%
	Extrusion	40%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	30%		<i>Forging</i>	90%
AL A356	Plaque	100%	Custom 465	Plaque	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	70%		<i>Forging</i>	90%
303	Plaque	100%	440C	Plaque	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	100%
	<i>Forging</i>	95%		<i>Forging</i>	95%
304	Plaque	100%	Ti-6AL-4V	Plaque	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	95%
	<i>Forging</i>	95%		<i>Forging</i>	90%
PH13-8Mo	Plaque	100%	Ti-10V-2FE-3L	Plaque	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	95%
	<i>Forging</i>	95%		<i>Forging</i>	90%
15-5PH	Plaque	100%	Ti-5AL-5V-5MO-3CR	Plaque	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	95%
	<i>Forging</i>	95%		<i>Forging</i>	90%
17-4PH	Plaque	100%	Bronze C630	Plaque	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	95%
	<i>Forging</i>	95%		<i>Forging</i>	70%

De même que pour l'indice d'usinabilité, des classes de largeur égales ont été créées. L'équation (5.2) permet d'obtenir la largeur des classes W_S pour l'indice de contraintes résiduelles S .

$$W_s = \frac{Max_s - Min_s}{n} \quad (5.2)$$

Où Max_s représente la valeur de l'indice de contraintes résiduelles la plus élevée, Min_s représente la valeur de l'indice de contraintes résiduelles la plus faible et n le nombre de classe désirée. Une fois de plus, nous utilisons $n = 10$. Ensuite, une valeur entière (I_s) allant de 1 (indice élevé) à 10 (indice faible) est assignée à chaque classe. Le Tableau 5.7 présente les résultats de cette transformation.

Tableau 5.7 Indice de contraintes résiduelles par classe

Classe [% , %]	I_s	Classe [% , %]	I_s
[30%, 37%[	10	[65%, 72%[	5
[37%, 44%[	9	[72%, 79%[	4
[44%, 51%[	8	[79%, 86%[	3
[51%, 58%[	7	[86%, 93%[	2
[58%, 65%[	6	[93%, 100%]	1

Pour terminer, ce sont les valeurs (I_s) de chaque classe (Tableau 5.7) qui sont utilisées pour tous les calculs impliquant l'indice de contraintes résiduelles.

5.4 Élicitation des connaissances du groupe d'experts

L'évaluation de la complexité des produits usinés par le groupe d'experts industriels est une information cruciale dans le développement de notre indice de complexité. En effet, c'est avec celle-ci que nous évaluons notre modèle d'estimation de la complexité. Ces données se doivent donc d'être justes et précises. Cette évaluation s'est faite en deux temps comme suit.

Premièrement, une liste de 19 produits est envoyée au groupe d'experts. La tâche qui leur est demandée est d'évaluer chaque produit, au niveau de leur complexité, et d'assigner une

valeur allant de 0 (aucune complexité) à 10 (complexité fortement élevé). Le résultat de cette évaluation se trouve au Tableau 5.8.

Tableau 5.8 Résultats de la première évaluation de la complexité (C_E)

Produit	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	C_E
1	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
2	7.0	7.0	8.0	8.0	7.5
3	9.5	9.5	9.0	8.0	9.0
4	8.0	8.0	7.0	6.0	7.3
5	5.0	5.0	9.0	7.0	6.5
6	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
7	3.5	3.5	7.0	3.0	4.3
8	7.5	7.5	7.0	5.0	6.8
9	2.0	2.0	5.0	3.0	3.0
10	3.5	3.5	7.0	5.0	4.8
11	5.5	5.5	7.0	4.0	5.5
12	3.0	7.0	7.0	2.0	4.8
13	2.5	7.0	7.0	3.0	4.9
14	4.0	8.0	7.0	4.0	5.8
15	3.0	3.0	4.0	2.0	3.0
16	5.0	7.0	8.0	7.0	6.8
17	2.0	6.0	6.0	3.0	4.3
18	7.0	8.0	9.0	7.0	7.8
19	7.0	8.0	9.0	6.0	7.5

Ensuite, nous effectuons une étude *Gage R&R* pour valider si notre système de mesure est statistiquement bon. Les résultats se trouvent au Tableau 5.9.

Tableau 5.9 Résultats de l'étude *Crossed Gage R&R (XBar/R Method)*

Source	Écart type	Variation de l'étude	Variation de l'étude (%)
Reproductibilité	0.94	5.64	50.78
Total Gage R&R	0.94	5.64	50.78
Produit-à-Produit	1.59	9.57	86.15
Variation Total	1.85	11.11	100.00

Statistiquement, pour qu'un système de mesure soit jugé acceptable, la variation en pourcentage de l'étude *Gage R&R* doit être inférieure à 10%. D'après le Tableau 5.9, le pourcentage de variation de l'étude de notre système de mesure est de 50.78%. Nous pouvons donc assumer que notre système comporte des failles.

Deuxièmement, et afin de nous assurer que notre système de mesure soit statistiquement acceptable, une figure de référence (Figure 5.1) qui présente une échelle de la complexité est construite et approuvée par le groupe d'experts industriels.


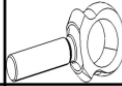
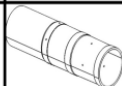
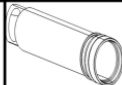
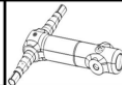
Complexity factor	Qualifier	Material	Example
0	None		
1	Very low	TI-6AL-4V	
2			
3	Low	15-5PH	
4			
5			
6	High	TI-6AL-4V	
7			
8	Very high	300M	
9			
10	Extremely high	300M Forging	

Figure 5.1 Figure de référence

Troisièmement, 65 modèles 3D enrichis sont sélectionnés, et ce, de manière à couvrir les catégories de produit (section 5.1). Ensuite, ceux-ci sont envoyés auprès du même groupe d'experts. La différence entre le travail de la première vague et celle-ci réside dans le fait que chaque expert doit évaluer chacun des 65 produits en fonction de la figure de référence (Figure 5.1).

De plus, afin de nous assurer de la validité des informations qui sont utilisées, les produits qui n'ont pas reçu plus de 50% d'évaluation (un minimum de 3 répondants sur 4) sont retirés de l'évaluation. Un manque de compétences ou encore des connaissances restreintes sur le produit expliquent pourquoi les experts ont préférés ne pas évaluer certains produits. Un total de 11 produits est retiré.

Également, certaines évaluations présentent une grande divergence dans l'étendue des résultats (valeur maximal – valeur minimal). Une rencontre avec le groupe d'expert est donc effectuée dans le but de corriger les possibles erreurs causées par la subjectivité et l'expérience lors de l'évaluation de chacun des répondants. Une étendue de 1.5 points est tolérée. Il est possible de remarquer qu'au Tableau 5.10 le produit #29 et le produit #47 ont une étendue de plus de 1.5 points. Ceci est attribuable au fait que l'expert #4 a conservé sa position, jugeant que le produit #29 est plus complexe que ce que pensent les autres experts et que le produit #47 est moins complexe. Les résultats du processus d'élicitation de la complexité (C_E) correspondent à la moyenne simple de l'évaluation des experts et se trouvent au Tableau 5.10.

Tableau 5.10 Résultats du processus d'élicitation par expert

Produit	1	2	3	4	C_E	Étendue
1	0.0	0.3	0.0	1.0	0.3	1.0
2	0.5	0.0	0.0	1.0	0.4	1.0
3	1.0	0.7	0.0	1.0	0.7	1.0
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0
6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0
7	2.0	1.2	0.5	1.0	1.2	1.5
8	1.5	1.3	0.5	2.0	1.3	1.5
9	2.0	1.5	0.5	2.0	1.5	1.5
10	1.5	1.5	1.0	2.0	1.5	1.0
11	2.0	1.7	1.0	2.0	1.7	1.0
12	2.0	1.7	1.0	2.0	1.7	1.0
13	2.0	1.8	1.5	2.0	1.8	0.5
14	2.0	2.2	1.5	3.0	2.2	1.5
15	2.0	2.0	3.0	2.0	2.3	1.0
28	4.0	5.0	5.0	5.0	4.8	1.0
29	2.5	3.0	3.5	6.0	5.0	3.5
30	4.5	5.5	5.0	6.0	5.3	1.5
31	5.0	5.3	6.0	5.0	5.3	1.0
32	6.0	6.0	5.5	5.0	5.6	1.0
33	6.5	5.5	5.5	5.0	5.6	1.5
34	5.7	6.0	6.0	5.0	5.7	1.0
35	5.0	6.5	6.0	6.0	5.9	1.5
36	5.5	5.5	6.5	6.0	5.9	1.0
37	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	0.0
38	7.5	6.0	6.0	6.0	6.4	1.5
39	6.0	7.0	6.5	7.0	6.6	1.0
40	6.0	7.0	7.0	7.0	6.8	1.0
41	7.0	7.0	7.0	6.0	6.8	1.0
42	7.0	8.0	7.5	7.0	7.4	1.0

Produit	1	2	3	4	C_E	Étendue
16	3.5	2.5	2.0	2.0	2.5	1.5
17	3.0	2.7	2.0	3.0	2.7	1.0
18	2.5	3.0	3.0	3.0	2.9	0.5
19	3.5	2.5	2.5	3.0	2.9	1.0
20	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	0.0
21	3.5	3.0	3.5	4.0	3.5	1.0
22	3.5	4.0	4.0	4.0	3.9	0.5
23	4.0	5.0	4.5	4.0	4.4	1.0
24	4.5	4.5	5.0	4.0	4.5	1.0
25	4.5	4.0	5.5	4.0	4.5	1.5
26	4.0	4.5	4.5	5.0	4.5	1.0
27	4.5	4.5	4.0	5.0	4.5	1.0

Produit	1	2	3	4	C_E	Étendue
43	8.0	8.0	8.5	7.0	7.9	1.5
44	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	0.0
45	8.7	9.0	8.0	9.0	8.7	1.0
46	8.7	9.0	8.0	9.0	8.7	1.0
47	8.5	9.0	9.0	8.5	8.8	0.5
48	9.0	9.3	10.0	9.0	9.3	1.0
49	9.0	9.3	10.0	9.0	9.3	1.0
50	10.0	9.7	10.0	9.0	9.7	1.0
51	9.5	9.8	10.0	10.0	9.8	0.5
52	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	0.0
53	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	0.0
54	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	0.0

Ensuite, nous faisons de nouveau une étude *Gage R&R* afin de valider si notre système de mesure est désormais acceptable. Le Tableau 5.11 présente les résultats de l'étude *Gage R&R* faite à l'aide du logiciel statistique.

Tableau 5.11 Résultats de l'étude *Crossed Gage R&R (X Bar/R Method)*

Source	Écart type	Variation de l'étude	Variation de l'étude (%)
Reproductibilité	0.05	0.32	7.34
Total <i>Gage R&R</i>	0.06	0.33	2.73
Produit-à-Produit	2.12	12.74	99.96
Variation Total	2.12	12.75	100.00

Tel qu'énoncé précédemment, pour qu'un système de mesure soit considéré comme acceptable, le pourcentage de variation de l'étude *Gage R&R* doit être inférieur à 10%. Selon le Tableau 5.11, notre système de mesure a un pourcentage de variation de l'étude égale à 2.73%. Conséquemment, nous assumons que notre système de mesure pour évaluer la complexité est recevable et donc, que le niveau de reproductibilité entre les experts répond au critère de conformité.

Finalement, des 54 produits du Tableau 5.10, nous avons choisi à l'aveugle 11 produits représentatifs (1-5-14-19-22-29-36-41-44-47-54) et couvrant l'étendue de la complexité (de 0 à 10) pour être utilisés lors de l'étape de validation empirique du modèle. Les 43 produits

restants sont utilisés pour construire et développer notre indice de complexité. La Figure 5.2 présente la distribution des différents produits en fonction de la moyenne simple de l'évaluation de la complexité de chaque expert.

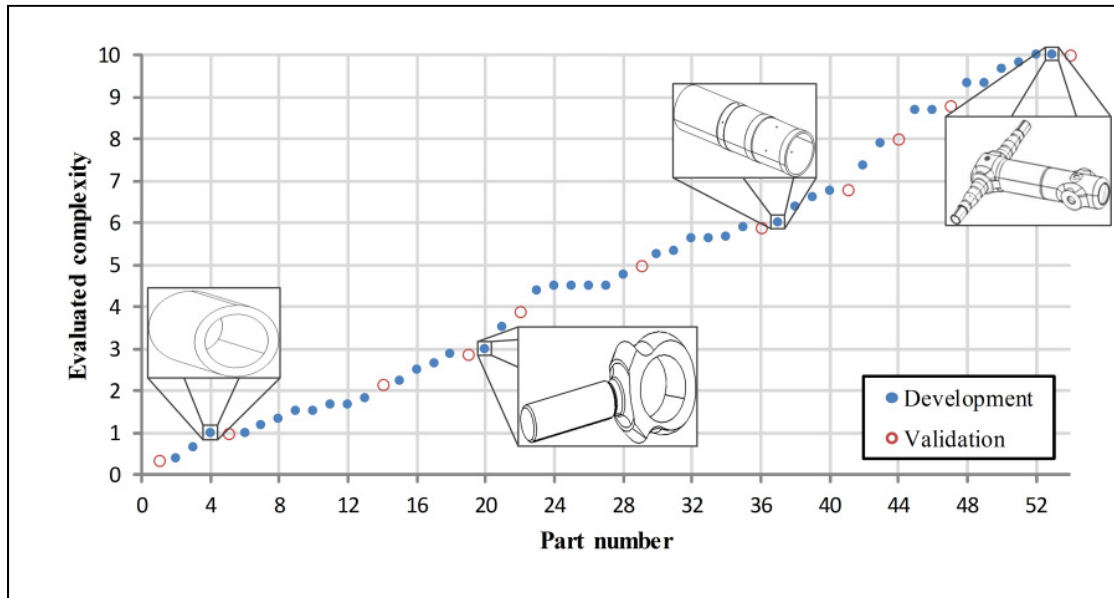


Figure 5.2 Distribution des produits selon la moyenne de l'évaluation de la complexité

CHAPITRE 6

COMPOSITION DU MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ

Rappelons-nous que l'objectif de ce travail de recherche est de développer un modèle d'estimation de la complexité à partir des informations contenues dans le modèle 3D enrichi d'un produit. Cette section présente donc chacun des composants candidats du modèle d'estimation et leur corrélation avec les résultats du processus d'élicitation fait par le groupe d'experts (Tableau 5.10). Les quatre composants candidats (G_i) sont :

- G_1 : Le volume à usiner en fonction du matériau utilisé;
- G_2 : L'ordre de grandeur des éléments géométriques;
- G_3 : Les annotations;
- G_4 : Les spécifications.

6.1 Le volume à usiner selon le matériau utilisé

Le premier composant candidat représente la quantité (volume) usinée pondérée en fonction du type de matériau utilisé pour la fabrication du produit. La Figure 6.1 présente la construction de ce composant candidat.

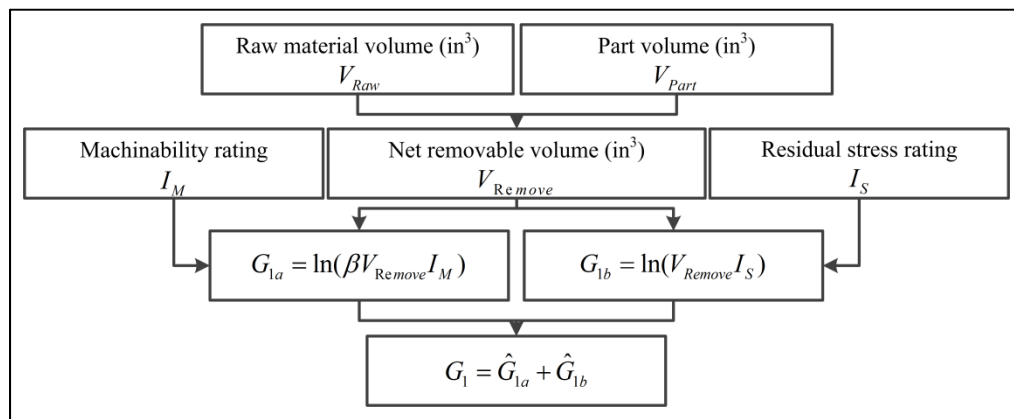


Figure 6.1 Représentation de G_1

6.1.1 Calcul du composant candidat

6.1.1.1 Volume à usiner

La première partie du composant candidat est le volume (V) net à usiner (V_{Remove}). Cette partie représente la différence entre le volume du matériau brut (V_{Raw}) utilisé pour la fabrication du produit et le volume du produit final (V_{Part}). Cette différence représente donc la quantité du matériau qui est usinée afin d'obtenir le produit final. Le volume net à usiner est donné par l'équation (6.1).

$$V_{Remove} = V_{Raw} - V_{Part} \quad (6.1)$$

Le volume V_{Raw} est obtenu directement à partir du modèle 3D du matériau brut utilisé pour la fabrication du produit et V_{Part} est obtenu à partir du modèle 3D enrichie du produit. Pour le calcul de ces quantités, nous utilisons la fonction *Measure Inertia* du logiciel de conception assistée par ordinateur.

La deuxième partie du composant candidat fait référence au matériau utilisé pour la fabrication (ex : titane TI-AL-4V). Dans notre contexte, l'influence du matériau se divise en deux éléments : l'indice d'usinabilité (*Machinability Rating*) et l'indice de contraintes résiduelles (*Residual Stress Rating*).

6.1.1.2 Volume à usiner en fonction de l'indice d'usinabilité

Tel que discuté à la section 5.3.1, l'indice d'usinabilité représente la facilité avec laquelle un matériau peut être travaillé (fraisage, perçage, etc.) à l'aide d'un outil de coupe. Grâce aux données collectées à la section 5.3.1, il est possible de calculer la valeur du volume de matériau à usiner en fonction de l'indice d'usinabilité (I_M) (Tableau 5.5) que nous appelons G_{1a} .

De plus, en termes de procédé, l'usinage d'un produit consiste en deux étapes : l'ébauche et la finition. Nous croyons que ces deux étapes n'ont pas le même impact sur la complexité d'un produit. En fait, nous conjecturons que la majorité de l'effet relié à l'usinabilité est explicable par l'étape de finition et non pas par l'étape d'ébauche. Afin de refléter ce concept, le volume à usiner en fonction de l'indice d'usinabilité s'obtient à partir de l'équation (6.2).

$$G_{1a} = \ln(\beta V_{Remove} I_M) \quad (6.2)$$

$$\beta = \begin{cases} 0.90 & \text{if } \frac{V_{Remove}}{V_{Raw}} < 0.8 \\ 0.15 & \text{if } \frac{V_{Remove}}{V_{Raw}} \geq 0.8 \end{cases}$$

D'une part, l'équation (6.2) suppose que si la majorité du volume d'un brut est usiné, le travail consacré à la portion ébauche est plus important. Conséquemment, la valeur de G_{1a} est réduite. D'autre part, si le volume usiné d'un brut est minimal ou si un *forging* est utilisé, peu de travail est consacré à l'ébauche. Dans ce cas, la valeur de G_{1a} est minimalement réduite. La Figure 6.2 présente un exemple de quantité de matériau à usiner.

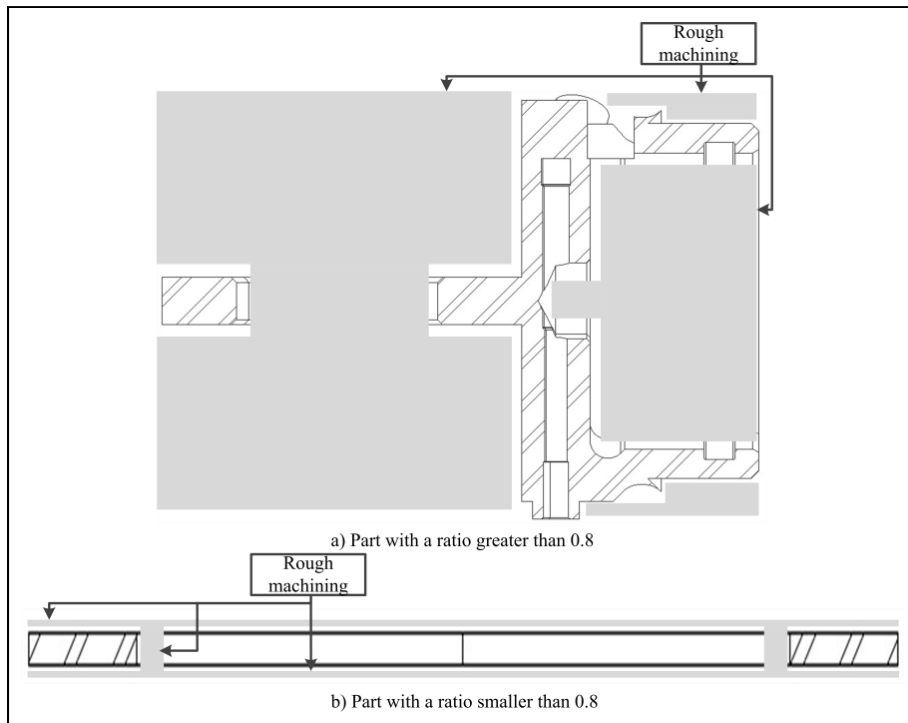


Figure 6.2 Exemple de la différence dans les quantités de matériau à usiner

6.1.1.3 Volume à usiner en fonction de l'indice de contraintes résiduelles

Tel que discuté à la section 5.3.2, l'indice de contraintes résiduelles représente la capacité d'un matériau à ne pas se déformer lorsque des contraintes sont libérées par le passage d'un outil de coupe. Grâce aux données collectées à la section 5.3.2, il est possible de calculer la valeur du volume de matériau à usiner en fonction de l'indice de contraintes résiduelles (I_S) (Tableau 5.7) que nous appelons G_{1b} et qui est donné par l'équation (6.3).

$$G_{1b} = \ln(V_{Remove} I_S) \quad (6.3)$$

Contrairement à l'indice d'usinabilité, nous croyons que les contraintes résiduelles sont continuellement libérées lors du processus d'usinage d'un produit. Conséquemment, sa complexité n'est pas modifiée.

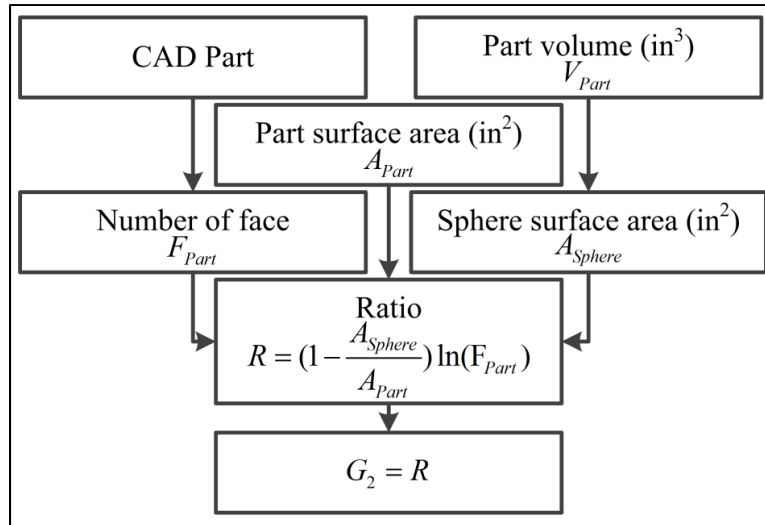
Il est à noter que nous introduisons à l'équation (6.2) et (6.3) une fonction logarithmique pour calculer les composants G_{1a} et G_{1b} . Cette fonction est utilisée puisque, graphiquement, le résultat de ces équations présente une fonction de type logarithmique. Conséquemment, pour ramener les valeurs sous une forme linéaire, nous utilisons une fonction logarithmique. Ce faisant, le lecteur peut assumer que cette logique est applicable, à moins d'indication contraire, à chaque fois qu'une fonction logarithmique est utilisée.

Finalement, G_{1a} et G_{1b} sont standardisées (\hat{G}_{1a} et \hat{G}_{1b}) en assignant à chaque résultat une valeur de 1 à 10 (1 représentant la plus petite valeur et 10 la plus élevée). L'indice de volume net à usiner en fonction du matériau (G_1) est donc obtenu avec l'équation (6.4):

$$G_1 = \hat{G}_{1a} + \hat{G}_{1b} \quad (6.4)$$

6.2 L'ordre de grandeur des éléments géométriques

Tiré des travaux de Joshi et Ravi (2010), le deuxième composant candidat représente le ratio (R) entre l'aire (A) d'une sphère de même volume (A_{Sphere}) que le volume du produit (V_{Part}) et l'aire du produit (A_{Part}) multiplié par le logarithme naturel du nombre de faces usinées. Tout d'abord, rappelons l'hypothèse 1b : « La complexité d'un produit est fonction de l'ordre de grandeur des éléments géométriques ». Le but de ce composant candidat est donc d'estimer l'aspect géométrique du produit en terme d'élément géométrique primaire (cylindre, poche, etc.) présent sur celui-ci. En d'autres mots, l'aire d'une sphère parfaite ne comportant aucun élément géométrique primaire représente la plus petite surface d'usinage. De là, nous comparons ces deux valeurs et il nous est possible de constater si le produit évalué semble posséder un grand nombre d'éléments géométriques ou non. La Figure 6.3 représente la construction du composant candidat.

Figure 6.3 Représentation de G_2

6.2.1 Calcul du composant candidat

Dans le calcul de ce composant candidat, la première étape est d'obtenir l'aire de la sphère. Pour ce faire, l'équation (6.5) nous permet d'obtenir cette information.

$$A_{Sphere} = \sqrt[3]{4\pi} (3V_{Part})^{\frac{2}{3}} \quad (6.5)$$

Où V_{Part} fait référence au volume du produit fabriqué.

Deuxièmement, l'aire du produit (A_{Part}) est obtenue à partir du modèle 3D enrichi du produit. Pour ce faire, nous utilisons la fonction *Measure Inertia* du logiciel de conception assistée par ordinateur.

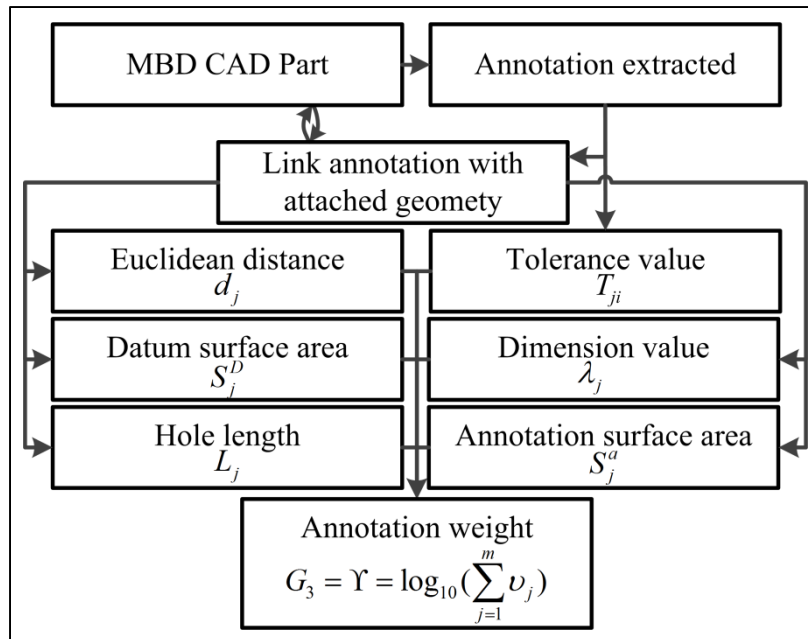
Troisièmement, nous conjecturons que, dans notre contexte, si une face existe dans un modèle 3D, elle sera le résultat du processus d'usinage du partenaire industriel. Ce faisant, les faces d'un modèle 3D représentent les faces devant être usinées par une machine-outil CNC. Pour obtenir l'information quant à la quantité de faces, la fonction recherche du

logiciel de conception assistée par ordinateur est utilisée. Grâce à cette fonction, nous recherchons et recensons toutes les faces présentes sur le produit. Finalement, G_2 est obtenu en faisant le ratio R des deux valeurs en fonction du nombre de faces :

$$G_2 = R = \left(1 - \frac{A_{Sphere}}{A_{Part}}\right) \ln(F_{Part}) \quad (6.6)$$

6.3 Les annotations

Tout d'abord, bien que des normes, telle que l'ASME Y14.5, dicte l'interprétation des tolérances géométriques et dimensionnelles (GD&T) incluses dans un modèle 3D enrichi, la qualité de l'interprétation relève bien souvent de l'expérience et du niveau de compréhension de la norme par l'agent qui effectue ce processus. Dû à l'aspect subjectif de celui-ci, la qualité de l'interprétation peut être rapidement compromise. Cette subjectivité provient du fait que l'agent peut analyser les annotations en tenant compte, ou non, du contexte géométrique ou encore des meilleures pratiques. Pour contrevvenir à ce phénomène, ce troisième composant candidat se veut être une interprétation objective et mathématique de l'impact des tolérances géométriques et dimensionnelles sur la complexité d'un produit usiné tout en tenant compte de la géométrie à laquelle une annotation est attachée sémantiquement. La Figure 6.4 présente la constitution du composant candidat.

Figure 6.4 Représentation de G_3

6.3.1 Calcul du composant candidat

Le point de départ du calcul de ce composant candidat est l'extraction des annotations d'un modèle 3D enrichi à l'aide de l'algorithme d'extraction développé. Le Tableau 6.1 présente les types d'annotations qui sont extraites et celles qui sont utilisées dans les calculs du composant candidat. Nous distinguons dans ce tableau que les types *Text*, *Flag note* et *Roughness* ne sont pas utilisés dans nos calculs. Pour les deux premiers types, nous jugeons que des informations qualitatives sous la forme d'un texte présentent un problème d'interprétation lors de notre analyse. Quant au troisième type, nous soupçonnons qu'un lien existe entre la qualité de la surface (en termes de R_a , R_z , etc.) et la précision des tolérances géométriques et dimensionnelles liées à cette même surface. Bien que la causalité de ce lien n'est pas démontré dans ce projet, nous préférons écarter les annotations de type *Roughness* de façon à minimiser les possibilités d'erreurs.

Tableau 6.1 Liste des types d'annotations extraites et utilisées dans les calculs

Type	Extraction	Calcul
<i>Text</i>	✓	✗
<i>Flag note</i>	✓	✗
<i>Roughness</i>	✓	✗
<i>Datum</i>	✓	✓
<i>Dimension</i>	✓	✓
<i>Flatness</i>	✓	✓
<i>Straightness</i>	✓	✓
<i>Circularity</i>	✓	✓
<i>Cylindricity</i>	✓	✓
<i>Profile of a line / surface</i>	✓	✓
<i>True position</i>	✓	✓
<i>Concentricity</i>	✓	✓
<i>Symmetry</i>	✓	✓
<i>Parallelism</i>	✓	✓
<i>Perpendicularity</i>	✓	✓
<i>Angularity</i>	✓	✓
<i>Total / Circular run out</i>	✓	✓

En se référant au Tableau 6.1, les différents types d'annotation peuvent être classifiés en quatre catégories :

- 1) Requis géométrique (GD&T) avec référentiel(s) – contraintes de blocage des degrés de liberté,
- 2) Requis géométrique (GD&T) sans référentiel avec 6 degrés de liberté,
- 3) Diamètre d'un élément cylindrique,
- 4) Dimension linéaire (ex : distance entre deux éléments géométriques).

Afin d'illustrer ces quatre catégories, la Figure 6.5 présente un exemple pour les catégories 1 et 2, la Figure 6.6 présente un exemple pour la catégorie 3 et finalement, la Figure 6.7 illustre un exemple pour la catégorie 4.

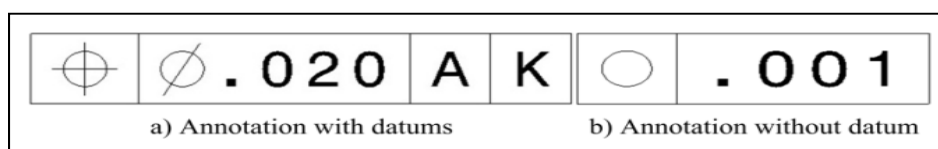


Figure 6.5 Exemple de requis géométrique avec et sans référentiel

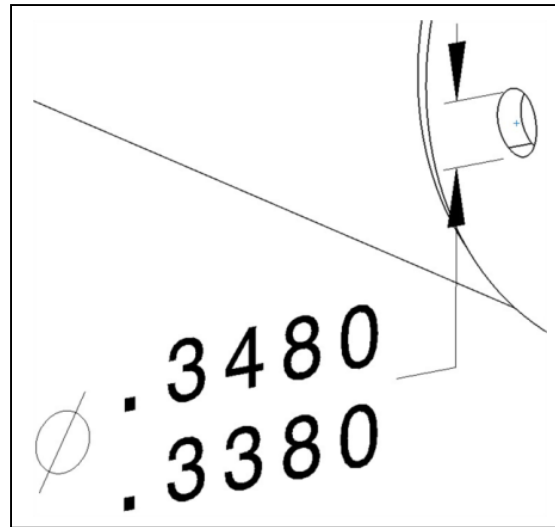


Figure 6.6 Exemple d'annotation
« diamètre »

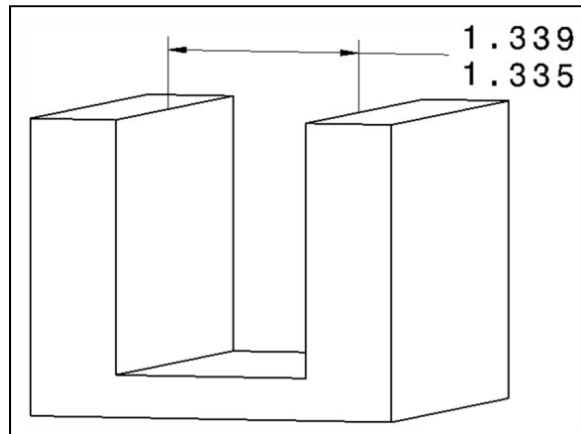


Figure 6.7 Exemple d'annotation
« dimension linéaire »

Une fois l'extraction effectuée, un deuxième algorithme est utilisé afin d'extraire les informations des éléments topologiques auxquels chaque annotation, précédemment extraite, est attachée sémantiquement. Ceci nous permet d'obtenir des paramètres qui sont utilisés dans le calcul du composant :

- Une coordonnée spatiale appartenant à l'élément topologique extrait. Dans notre contexte, le centre de gravité (*CoG*) est utilisé [(x,y,z)];

- L'aire de l'élément topologique extrait [in^2];
- L'intervalle de la tolérance [in];
- Dans certains cas, la valeur nominale de l'annotation [in].

Tel que décrit à la Figure 6.4, notre proposition utilise six variables. Premièrement, dans le cas où un requis géométrique possède un ou plusieurs référentiel(s), il nous est possible de calculer la distance euclidienne (d_j) entre l'élément topologique de l'annotation (a) et l'élément topologique du référentiel (D). En utilisant les coordonnées du centre de gravité de chaque élément, la distance euclidienne dans un espace en trois dimensions est obtenue à l'aide de l'équation (6.7).

$$d_j = d(a, D) = \sqrt{(x_D - x_a)^2 + (y_D - y_a)^2 + (z_D - z_a)^2} \quad (6.7)$$

Deuxièmement, S_j^D et S_j^a représente respectivement l'aire de la surface associée à un référentiel et à une annotation. Ensuite, L_j est la longueur d'un élément cylindrique et λ_j est la valeur nominale d'une annotation de type dimension. En d'autres mots, λ_j représente soit le diamètre d'un élément cylindrique soit la distance entre deux éléments géométriques. Finalement, T_{ji} représente la valeur de l'intervalle supérieur ou inférieur i d'une tolérance T associée à une annotation j .

Les variables (coordonnées du centre de gravité (CoG), S_j^D , S_j^a , L_j , λ_j et T_{ji}) sont toutes obtenues directement à partir du logiciel de conception assistée par ordinateur par l'extraction des informations contenues dans le modèle 3D enrichie. La Figure 6.8 illustre un exemple de chaque paramètre utilisé dans le calcul du composant candidat G_3 .

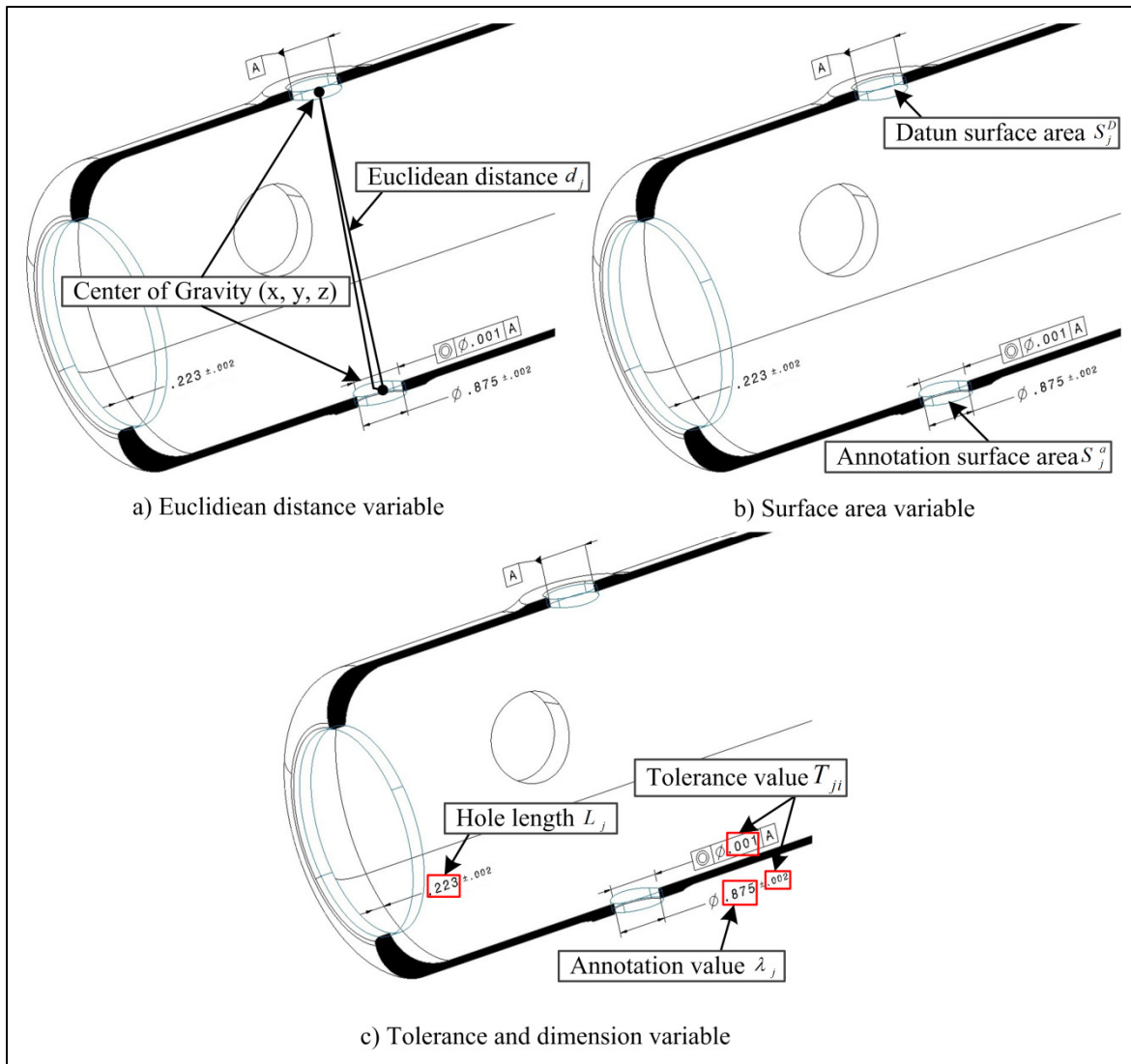


Figure 6.8 Visualisation des variables

À ce point, selon les informations extraites, quatre avenues s'offrent à nous. Ainsi, la valeur v de chaque annotation j est obtenue par l'équation (6.8).

$$v_j = \begin{cases} \frac{S_j^a}{T_{ji}^2} & \text{for } d_j = 0 \wedge S_j^D = 0 \\ \frac{S_j^a \frac{d_j}{\sqrt{S_j^D}}}{T_{ji}^2} & \text{for } d_j > 0 \wedge S_j^D > 0 \\ \frac{\lambda_j \sqrt{S_j^a}}{T_{ji}^2} & \text{for } \lambda_j > 0 \\ \frac{\frac{L_j}{\lambda_j} S_j^a}{T_{ji}^2} & \text{for } \lambda_j > 0 \wedge L_j > 0 \end{cases} \quad (6.8)$$

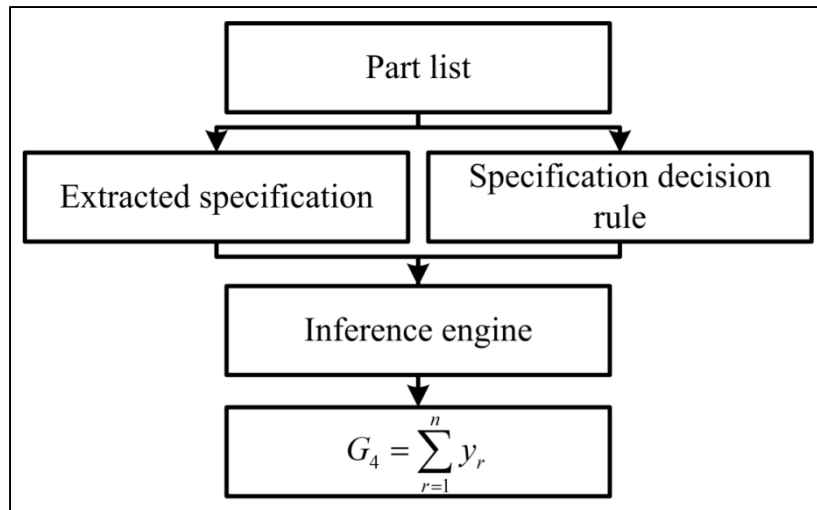
Finalement, G_3 est égale à Υ qui est obtenue en faisant la somme des valeurs v_j , selon l'équation (6.9).

$$G_3 = \Upsilon = \log_{10} \left(\sum_{j=1}^m v_j \right) \quad (6.9)$$

Pour terminer cette section, deux autres méthodes ont été testées, mais rejetées à cause de résultats non concluants. La description des méthodes développées se trouvent à l'ANNEXE I.

6.4 Les spécifications

Ce quatrième composant candidat représente la somme de la valeur (y_r) de toutes les règles (r) reliées aux spécifications déclenchées lors de leur analyse par rapport aux spécifications extraites. La Figure 6.9 présente la composition du composant candidat.

Figure 6.9 Représentation de G_4

6.4.1 Calcul du composant candidat

Rappelons-nous que chaque règle est définie sous la forme « *IF* [condition] *THEN* [résultat] ». Ce faisant, lorsque l’algorithme d’analyse (*Inference engine*) développé rencontre une spécification de même type qu’une règle préalablement définie, il vérifie si la référence de la spécification remplit la condition. S’il s’avère que la spécification remplit la condition, l’algorithme ajoute le résultat (y_r) (section *THEN* de la règle) au total de G_4 selon l’équation (6.10).

$$G_4 = \sum_{r=1}^n y_r \quad (6.10)$$

Où r représente une règle et n le nombre total de règles déclenchées liées aux spécifications contenues dans la base de données.

6.5 Analyses de corrélation linéaire

Pour commencer, afin de déterminer si un lien existe entre la complexité évaluée (C_E) et nos composants candidats, une analyse de corrélation linéaire (dite de Pearson) est de mise. Cette section présente donc les données nécessaires aux calculs des composants candidats, ainsi que les résultats de l'analyse de corrélation entre les G_i et les résultats du processus d'élicitation du groupe d'experts (voir Tableau 5.10).

Tableau 6.2 Information volumétrique et indice de matériau

Produit	V_{Raw} [in ³]	V_{Part} [in ³]	V_{Remove} [in ³]	A_{Part} [in ²]	A_{Sphere} [in ²]	F_{Part} [-]	I_M [-]	I_S [-]
2	1.13	0.31	0.82	6.49	2.21	16	9	1
3	0.92	0.04	0.88	1.16	0.53	6	9	1
4	202.80	119.49	83.31	551.87	117.32	11	10	1
6	18.85	2.46	16.39	23.42	8.81	139	4	1
7	24.54	0.98	23.56	13.12	4.77	6	4	1
8	5.94	0.38	5.56	6.90	2.52	71	8	1
9	2.15	0.21	1.94	5.08	1.70	17	8	1
10	9.55	5.45	4.10	47.43	14.97	132	4	1
11	10.83	2.11	8.72	20.52	7.94	52	4	1
12	106.91	7.06	99.85	50.74	17.80	86	4	1
13	9.19	1.05	8.14	11.01	5.00	35	4	1
15	14.73	2.60	12.13	26.28	9.14	78	4	1
16	6.62	0.69	5.93	10.00	3.78	52	8	1
17	1.33	0.07	1.26	2.11	0.81	58	9	1
18	19.88	1.92	17.96	17.76	7.46	74	8	1
20	40.64	4.24	36.40	24.51	12.68	82	8	1
21	24.54	3.26	21.28	22.21	10.64	31	8	1
23	721.00	103.84	617.16	513.66	106.84	213	4	1
24	692.70	126.12	566.58	695.86	121.62	79	4	1
25	41.63	8.66	32.97	97.91	20.39	121	8	1
26	95.43	10.73	84.70	140.28	23.52	139	4	1
27	58.91	9.99	48.92	87.24	22.43	56	8	1
28	238.16	33.82	204.34	206.92	50.58	190	10	2
30	508.94	30.57	478.37	382.99	47.28	94	8	1
31	4.12	0.94	3.19	15.67	4.63	62	8	1
32	199.10	28.50	170.60	383.83	45.12	40	10	1
33	203.25	28.01	175.24	389.87	44.60	88	10	1
34	156.00	22.32	133.68	120.34	38.34	159	4	1
35	433.59	27.28	406.31	308.51	43.82	352	8	1
37	221.43	24.01	197.42	468.54	40.25	26	10	1
38	225.62	24.70	200.91	476.55	41.02	37	8	1

Produit	V_{Raw} [in ³]	V_{Part} [in ³]	V_{Remove} [in ³]	A_{Part} [in ²]	A_{Sphere} [in ²]	F_{Part} [-]	I_M [-]	I_S [-]
39	508.94	33.25	475.69	453.66	50.00	81	8	1
40	349.90	40.78	309.12	416.95	57.29	203	8	1
42	776.02	216.73	559.29	1984.94	174.49	303	10	2
43	682.16	223.75	458.41	1854.56	178.23	166	10	2
45	478.44	88.20	390.23	457.64	95.82	422	10	2
46	478.44	96.51	381.93	488.85	101.75	494	10	2
48	1327.57	238.64	1088.93	1260.15	186.06	2058	8	2
49	2930.24	558.81	2371.42	1806.48	328.09	931	4	5
50	548.68	79.09	469.58	783.44	89.11	420	8	2
51	1485.73	358.88	1126.85	1474.99	244.22	1211	4	5
52	828.35	52.63	775.72	459.22	67.92	383	8	1
53	1056.45	154.20	902.26	1062.35	139.06	430	8	2

Tableau 6.3 Valeurs des G_i

Produit	G_{1a}	G_{1b}	\hat{G}_{1a}	\hat{G}_{1b}	G_1	G_2	G_3	G_4
2	1.89	-0.20	2.74	1.00	3.74	1.83	0.59	19
3	0.18	-0.12	1.00	1.08	2.08	0.98	0.46	21
4	6.62	4.42	7.53	5.34	12.88	1.89	0.77	8
6	2.29	2.80	3.14	3.82	6.96	3.08	0.57	20
7	2.65	3.16	3.51	4.16	7.66	1.14	0.65	18
8	1.90	1.72	2.75	2.80	5.55	2.71	0.62	22
9	0.84	0.66	1.68	1.81	3.49	1.89	0.81	27
10	2.69	1.41	3.55	2.52	6.07	3.34	0.73	20
11	1.66	2.17	2.50	3.22	5.72	2.42	0.67	10
12	4.09	4.60	4.97	5.51	10.49	2.89	0.64	17
13	1.59	2.10	2.43	3.16	5.59	1.94	0.60	20
15	1.98	2.50	2.83	3.53	6.37	2.84	0.72	22
16	1.96	1.78	2.81	2.86	5.67	2.46	0.74	29
17	0.53	0.23	1.36	1.40	2.76	2.50	0.59	17
18	3.07	2.89	3.93	3.90	7.84	2.50	0.73	36
20	3.78	3.59	4.65	4.57	9.22	2.13	0.72	32
21	3.24	3.06	4.11	4.06	8.17	1.79	-	17
23	5.91	6.43	6.82	7.22	14.04	4.25	0.81	28
24	5.83	6.34	6.73	7.14	13.88	3.61	0.89	22
25	5.47	3.50	6.37	4.47	10.84	3.80	0.90	30
26	3.93	4.44	4.80	5.36	10.16	4.11	0.75	18
27	4.07	3.89	4.95	4.84	9.79	2.99	0.87	18
28	7.52	6.01	8.44	6.84	15.28	3.96	0.72	16
30	6.35	6.17	7.26	6.99	14.25	3.98	0.90	30
31	3.13	1.16	4.00	2.28	6.28	2.91	0.92	24
32	5.54	5.14	6.44	6.02	12.46	3.26	0.78	21
33	5.57	5.17	6.47	6.04	12.51	3.97	0.79	23
34	4.38	4.90	5.27	5.79	11.05	3.45	0.81	31
35	6.19	6.01	7.10	6.83	13.93	5.03	0.91	26
37	5.69	5.29	6.59	6.15	12.75	2.98	-	29

Produit	G_{1a}	G_{1b}	\hat{G}_{1a}	\hat{G}_{1b}	G_1	G_2	G_3	G_4
38	5.49	5.30	6.38	6.17	12.55	3.30	0.82	19
39	6.35	6.16	7.26	6.98	14.24	3.91	0.91	40
40	5.92	5.73	6.82	6.58	13.40	4.58	0.94	45
42	8.52	7.02	9.46	7.78	17.25	5.21	0.82	20
43	8.32	6.82	9.26	7.60	16.86	4.62	0.80	14
45	8.16	6.66	9.10	7.45	16.54	4.78	0.76	18
46	8.14	6.64	9.08	7.42	16.50	4.91	0.80	-
48	8.97	7.69	9.91	8.41	18.32	6.50	0.88	41
49	9.05	9.38	10.00	10.00	20.00	5.59	0.92	21
50	8.13	6.84	9.06	7.62	16.68	5.35	1.00	41
51	8.31	8.64	9.25	9.30	18.55	5.92	0.97	24
52	6.84	6.65	7.75	7.44	15.19	5.07	0.91	13
53	8.78	7.50	9.72	8.23	17.96	5.27	0.88	46





Tableau 6.4 Valeurs des G_i standardisées

Produit	\hat{G}_1	\hat{G}_2	\hat{G}_3	\hat{G}_4	C_E
2	1.83	2.38	3.21	3.61	0.4
3	1.00	1.00	1.00	4.08	0.7
4	6.42	2.48	6.18	1.00	1.0
6	3.45	4.42	2.81	3.84	1.0
7	3.81	1.26	4.17	3.37	1.2
8	2.74	3.81	3.74	4.32	1.3
9	1.71	2.48	6.95	5.50	1.5
10	3.00	4.85	5.59	3.84	1.5
11	2.83	3.35	4.49	1.47	1.7
12	5.22	4.11	4.10	3.13	1.7
13	2.76	2.56	3.42	3.84	1.8
15	3.16	4.03	5.37	4.32	2.3
16	2.81	3.41	5.76	5.97	2.5
17	1.34	3.47	3.26	3.13	2.7
18	3.89	3.47	5.48	7.63	2.9
20	4.59	2.87	5.39	6.68	3.0
21	4.06	2.32	-	3.13	3.5
23	7.01	6.32	6.92	5.74	4.4
24	6.92	5.28	8.27	4.32	4.5
25	5.40	5.59	8.46	6.21	4.5
26	5.06	6.10	5.96	3.37	4.5
27	4.88	4.28	7.93	3.37	4.5
28	7.63	5.86	5.45	2.89	4.8
30	7.11	5.89	8.45	6.21	5.3
31	3.11	4.14	8.73	4.79	5.3
32	6.21	4.71	6.43	4.08	5.6
33	6.24	5.86	6.62	4.55	5.6
34	5.51	5.03	6.83	6.45	5.7

Produit	\hat{G}_1	\hat{G}_2	\hat{G}_3	\hat{G}_4	C_E
35	6.95	7.60	8.54	5.26	5.9
37	6.36	4.26	-	5.97	6.0
38	6.26	4.78	7.02	3.61	6.4
39	7.11	5.77	8.50	8.58	6.6
40	6.68	6.87	9.10	9.76	6.8
42	8.62	7.90	7.03	3.84	7.4
43	8.42	6.93	6.79	2.42	7.9
45	8.26	7.19	6.10	3.37	8.7
46	8.24	7.41	6.80	-	8.7
48	9.16	10.00	8.15	8.82	9.3
49	10.00	8.52	8.79	4.08	9.3
50	8.33	8.13	10.00	8.82	9.7
51	9.27	9.06	9.62	4.79	9.8
52	7.59	7.66	8.50	2.18	10.0
53	8.97	7.99	8.05	10.00	10.0

Grâce au logiciel statistique, nous effectuons une analyse de corrélation linéaire entre les composants candidats et les résultats de l'évaluation de complexité. Les résultats de cette analyse se trouvent au Tableau 6.5.

Tableau 6.5 Coefficient de corrélation Pearson entre les G_i et C_E

		\hat{G}_1 	\hat{G}_2 	\hat{G}_3 	\hat{G}_4 
C_E	Coefficient de Pearson	0.871	0.887	0.766	0.382
	Valeur P	≈ 0.000	≈ 0.000	≈ 0.000	≈ 0.013

Les Figure 6.10 à Figure 6.13 présentent la distribution graphique de chaque composant candidat.

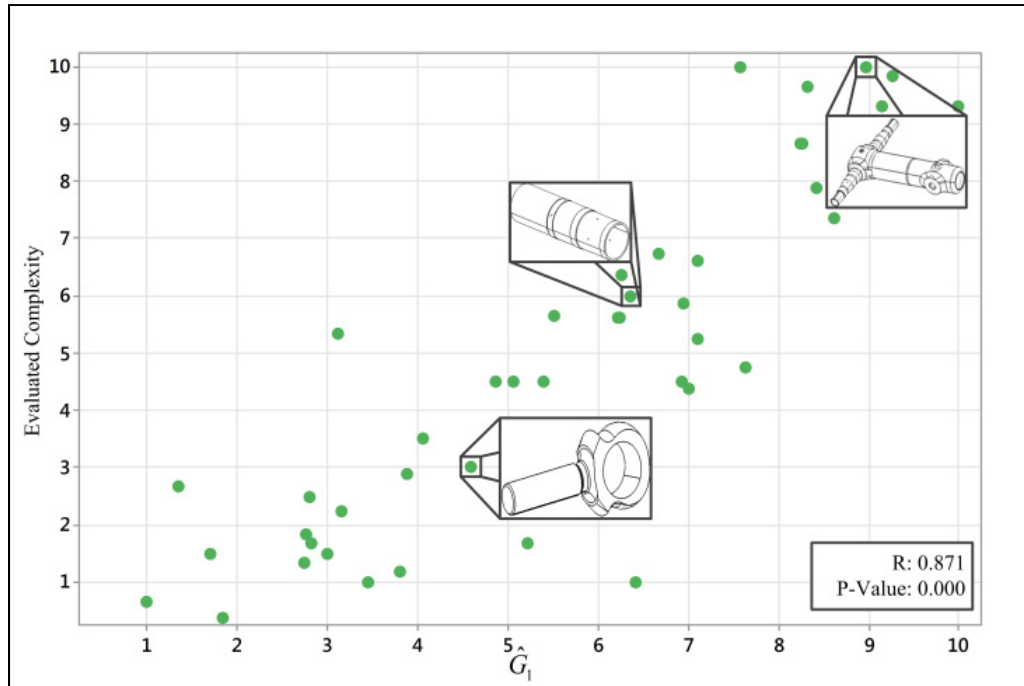


Figure 6.10 Distribution entre \hat{G}_1 et C_E

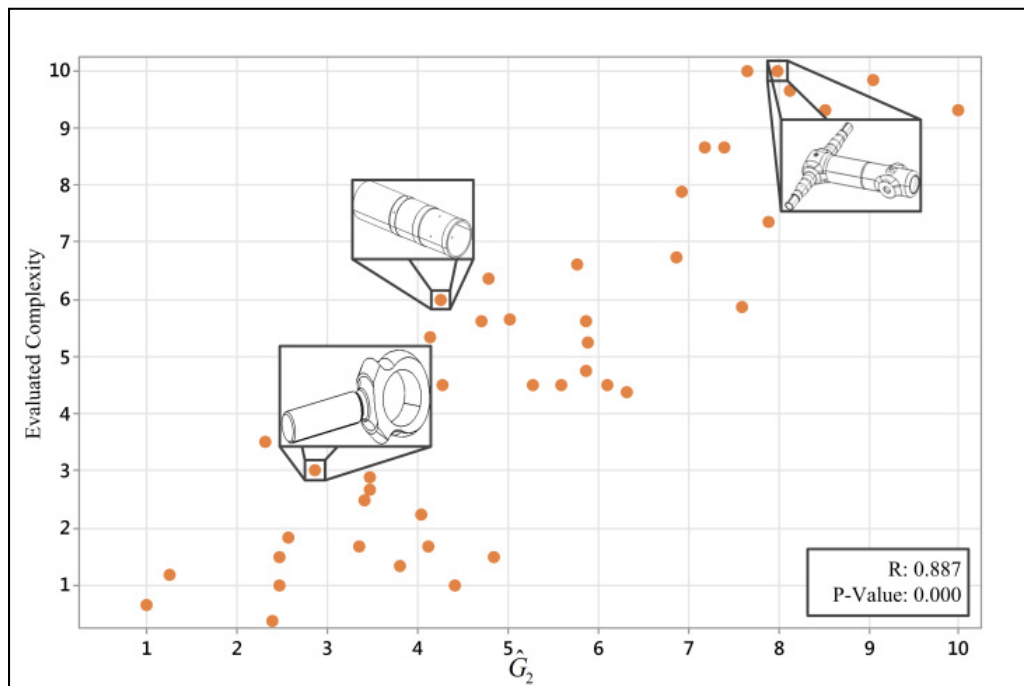


Figure 6.11 Distribution entre \hat{G}_2 et C_E

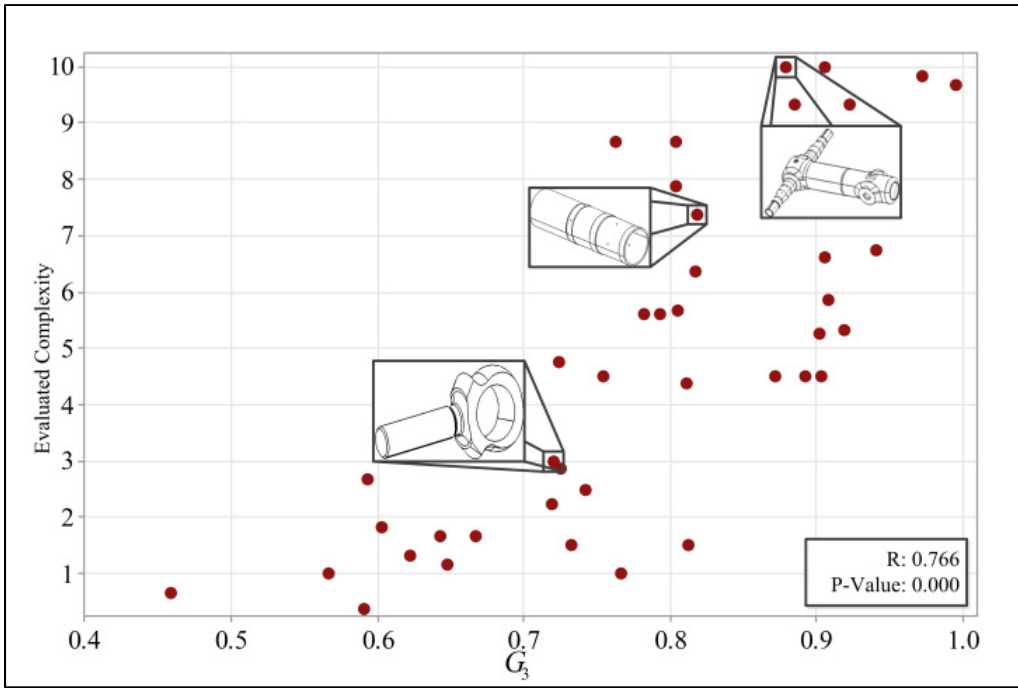


Figure 6.12 Distribution entre \hat{G}_3 et C_E

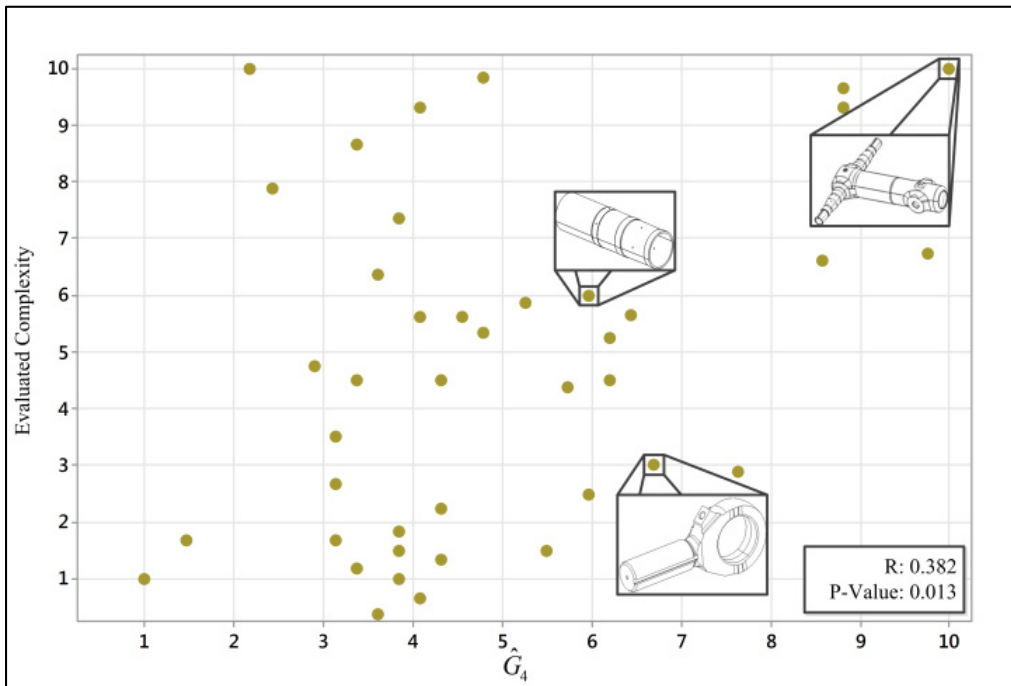


Figure 6.13 Distribution entre \hat{G}_4 et C_E

6.5.1 Discussion des résultats

Pour débiter, puisque nos données sont obtenues à partir de différentes sources chez notre partenaire industriel, un premier survol de celles-ci est de mise. En premier lieu, il est possible d'observer au Tableau 6.3 et au Tableau 6.4 que certaines valeurs de G_3 et de \hat{G}_3 sont nulles (produit #21 et produit #37). Ceci est imputable au fait que le modèle 3D enrichi des produits en question est corrompu ou incomplet. Conséquemment, il nous est impossible de leur assigner une valeur et, en tenant compte du point 4 de notre cadre de recherche, ils sont exclus de nos analyses. Deuxièmement, la valeur de G_4 et de \hat{G}_4 pour le produit #46 du Tableau 6.3 et du Tableau 6.4 est également manquante. Ceci est dû au fait que la feuille de notes est indisponible dans le format nécessaire à son analyse, conséquemment, et en tenant compte du point 6 de notre cadre de recherche, ce produit est exclu de l'analyse de corrélation linéaire entre G_4 et C_E .

Ensuite, la Figure 6.10 nous présente la distribution de (G_1, C_E) . Dans cette figure, un seul point semble s'écarter de la tendance générale de la distribution. En effet, le point (3.1, 5.3), correspondant au produit #31, n'est pas situé à un extrême de la distribution et ne peut donc pas être considéré comme une donnée anormale. Cet écart par rapport au reste de la distribution peut s'expliquer par la nature même des composants candidats. En fait, il faut se rappeler que l'évaluation de chaque composant candidat est une représentation en deux dimensions d'un espace potentiellement plus complexe. Conséquemment, son écart s'explique par le fait que ce produit nécessite peu d'usinage. En d'autres mots, la différence entre V_{Raw} et V_{Part} est petite et, individuellement, le composant candidat G_1 lui attribue donc un résultat inférieur à sa complexité évaluée par le groupe d'experts industriels qui, celle-ci, provient possiblement d'un autre aspect de la pièce (éléments géométrique, annotations, géométrie globale, etc.).

De plus, grâce aux résultats des analyses de corrélation linéaire, nous pouvons affirmer que les composants candidats G_1 à G_3 sont liés à l'évaluation de la complexité effectuée par le groupe d'experts ($R \geq 0.75$). De plus, l'indice de signification (*P-value*) est inférieur au seuil de signification α ($P\text{-value} \approx 0.000 < \alpha = 0.05$), ce qui nous laisse supposer que l'hypothèse nulle, stipulant qu'il n'y a pas suffisamment de preuve pour assumer l'existence d'une relation entre nos deux variables, semble pouvoir être rejetée.

En revanche, les résultats du composant candidat G_4 présentent un coefficient de corrélation pouvant être qualifié de faible ($R = 0.382$). De plus, malgré un indice de signification inférieur à α ($P\text{-value} \approx 0.013 < \alpha = 0.05$), le coefficient de corrélation laisse supposer qu'il existe une faible relation entre nos variables. En contrepartie, l'utilisation de la méthode de Pearson pour évaluer le niveau de corrélation entre nos deux variables implique que nos données suivent une distribution linéaire. Une évaluation visuelle de la distribution nous permet de valider si G_4 suit une distribution non-linéaire (quadratique, exponentielle, etc.). Malheureusement, ce n'est pas le cas puisque la distribution de G_4 et C_E présentée à la Figure 6.13 ne laisse pas sous-entendre que celle-ci suit une autre forme de distribution. Celle-ci laisse plutôt sous-entendre que peu importe le niveau de complexité d'un produit les mêmes types de spécifications peuvent se retrouver sur la feuille de notes. Conséquemment, nous arrivons à la conclusion que, sous sa forme actuelle, il n'existe pas de lien entre G_4 et C_E . Logiquement, sur la base du résultat de l'analyse de corrélation, l'inclusion de G_4 dans notre modèle d'estimation de la complexité est rejetée.

En contrepartie, nous observons qu'empiriquement, lors du processus d'élicitation des connaissances du groupe d'experts, les spécifications viennent jouer un rôle suffisamment important dans leur processus de réflexion pour être prise en compte dans l'établissement des risques manufacturiers d'un produit. Est-ce donc notre approche qui est fautive? Pour reprendre les dires du célèbre physicien Richard P. Feynman : « *It doesn't matter how beautiful your theory is [...]. If it doesn't agree with experiment, it's wrong.* ». Dans le même

ordre d'idées, il nous est impossible d'inclure G_4 sous cette forme dans notre modèle. En revanche, nous croyons avoir établis, à la section 6.4, les bases d'une méthode d'analyse des spécifications, mais celle-ci doit être évidemment modifiée afin de résulter en une représentation véridique de la nature de cette réalité. Pour faire suite à cette conclusion, la section « Recommandations » présente des avenues de recherche fournissant des pistes pouvant permettre de déterminer si G_4 pourra être éventuellement inclus dans notre modèle sous une autre forme que celle présentée dans ce projet de recherche.

Dans un autre ordre d'idée, il est intéressant de mentionner que les résultats de l'analyse de corrélation linéaire du composant candidat G_2 viennent supporter, en partie, les travaux de Joshi et Ravi (2010). En effet, bien que nous utilisons avec de légères modifications une partie de leurs recherches dans la construction de G_2 , nos résultats de l'analyse de corrélation linéaire viennent supporter la portabilité d'une partie de leur travaux dans une industrie autre que celle des produits forgés.

6.6 Conclusion du chapitre 6

Pour conclure cette section, des composants candidats à notre modèle d'estimation de la complexité ont été présentés et expliqués. De plus, une analyse complète de chaque composant candidat a été effectuée au moyen d'une analyse de corrélation linéaire (dite de Pearson). Les coefficients de corrélation et les indices de signification ont démontrés que les composants candidats G_1 à G_3 sont liés à la complexité évaluée par le groupe d'experts industriels, mais que notre quatrième composant candidat (G_4) est faiblement lié. Conséquemment, pour la construction de notre modèle d'estimation de la complexité, les trois premiers composants candidats sont conservés et G_4 est rejeté. Des recommandations de travaux complémentaires concernant G_4 ont également été formulées à la section « Recommandations ».

CHAPITRE 7

PROPOSITION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ

Dans ce chapitre, nous proposons au lecteur une formulation mathématique du modèle d'estimation de la complexité d'un produit usiné. Le modèle est présenté, ainsi que les résultats des analyses effectuées avec les données de développement.

7.1 Proposition du modèle

Pour commencer, nous proposons un modèle multiplicatif afin de quantifier la complexité d'un produit de façon objective. L'équation (7.1) présente la structure générale du modèle.

$$C = \sqrt{\hat{G}_1 \hat{G}_2} f(G_3) \quad (7.1)$$

Où $f(G_3)$ est une fonction de pondération.

Il est important de noter que nous utilisons le composant candidat G_3 en tant que valeur de pondération. En réalité, nous conjecturons que les annotations reliées à un produit, essentiellement des spécifications GD&T, viennent « ajuster » la complexité d'un produit. Autrement dit, G_1 et G_2 viennent déterminer la complexité et G_3 vient la pondérer. Afin d'illustrer notre proposition, imaginons-nous deux produits prismatiques de même dimension et de même matériau avec comme unique élément géométrique un trou situé à leurs centres respectifs (Figure 7.1). À ce stade, nous pourrions affirmer que les deux complexités sont identiques. Par contre, si l'un des trous possède une tolérance plus précise (ex : (a) ± 0.0002 in vs (b) ± 0.020 in), sa complexité augmentera forcément. C'est donc dans cet ordre d'idées que nous optons pour développer le modèle en utilisant G_3 en tant que valeur de pondération ($f(G_3)$).

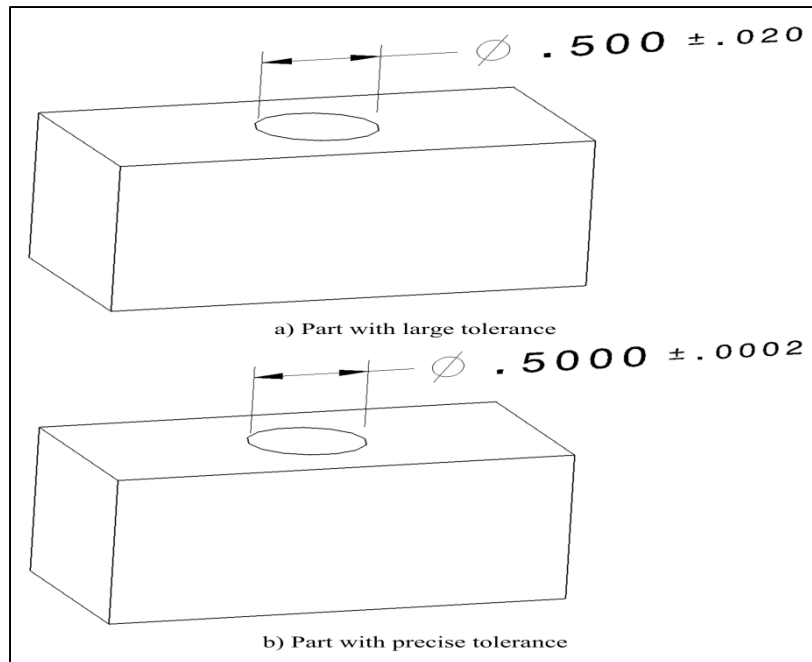


Figure 7.1 Exemple de produits avec une tolérance différente

Maintenant que le modèle d'estimation de la complexité est présenté et expliqué, une première évaluation de celui-ci est de mise. La section suivante présente une analyse de corrélation linéaire (dite corrélation de Pearson).

7.2 Analyse de la corrélation linéaire

Afin de déterminer si un lien significatif existe entre la complexité évaluée par le groupe d'experts industriels (voir Tableau 5.10) et la complexité prédite par le modèle (voir équation (7.1)), une analyse de corrélation linéaire et une analyse de régression linéaire sont réalisées. Cette section présente donc l'analyse de corrélation linéaire entre la complexité calculée du modèle (C) et les résultats du processus d'élicitation (C_E) du Tableau 5.10. Le Tableau 7.1 présente les résultats de l'équation (7.1), ainsi que les résidus. Ce dernier représente la différence entre la valeur estimée (C) et la valeur observée (C_E), c'est-à-dire la quantité ($C - C_E$) de chaque produit. Finalement, le Tableau 7.2 présente les résultats de l'analyse de corrélation linéaire et la Figure 7.2 présente la distribution entre C et C_E de façon graphique.

Tableau 7.1 Résultats de l'équation (7.1)

Produit	C	C_E	Résidu	Produit	C	C_E	Résidu
2	1.2	0.4	1.28	28	4.8	4.8	0.51
3	0.5	0.7	0.21	30	5.8	5.3	1.01
4	3.1	1.0	2.48	31	3.3	5.3	-1.62
6	2.2	1.0	1.63	32	4.2	5.6	-0.98
7	1.4	1.2	0.67	33	4.8	5.6	-0.41
8	2.0	1.3	1.1	34	4.2	5.7	-1.01
9	1.7	1.5	0.59	35	6.6	5.9	1.14
10	2.8	1.5	1.71	37	-	6.0	-
11	2.1	1.7	0.8	38	4.5	6.4	-1.48
12	3.0	1.7	1.74	39	5.8	6.6	-0.41
13	1.6	1.8	0.19	40	6.4	6.8	0.05
15	2.6	2.3	0.73	42	6.7	7.4	-0.21
16	2.3	2.5	0.21	43	6.1	7.9	-1.31
17	1.3	2.7	-0.97	45	5.9	8.7	-2.37
18	2.7	2.9	0.21	46	6.3	8.7	-1.96
20	2.6	3.0	0.03	48	8.5	9.3	-0.45
21	-	3.5	-	49	8.5	9.3	-0.4
23	5.4	4.4	1.45	50	8.2	9.7	-1.06
24	5.4	4.5	1.31	51	8.9	9.8	-0.51
25	5.0	4.5	0.88	52	6.9	10.0	-2.68
26	4.2	4.5	0.11	53	7.4	10.0	-2.14
27	4.0	4.5	-0.1				

Nous observons au Tableau 7.1 qu'il n'est pas possible d'obtenir la complexité C pour les produits #21 et #37. Il est important de rappeler au lecteur que ces deux produits ont été écartés de nos analyses, conformément au point 4 de notre cadre de recherche, puisque les modèles 3D enrichi de ces produits sont corrompus (voir également section 6.5.1).

Tableau 7.2 Coefficient de corrélation
entre C et C_E

		C
C_E	Coefficient de Pearson	0.932
	Valeur P	≈ 0.000

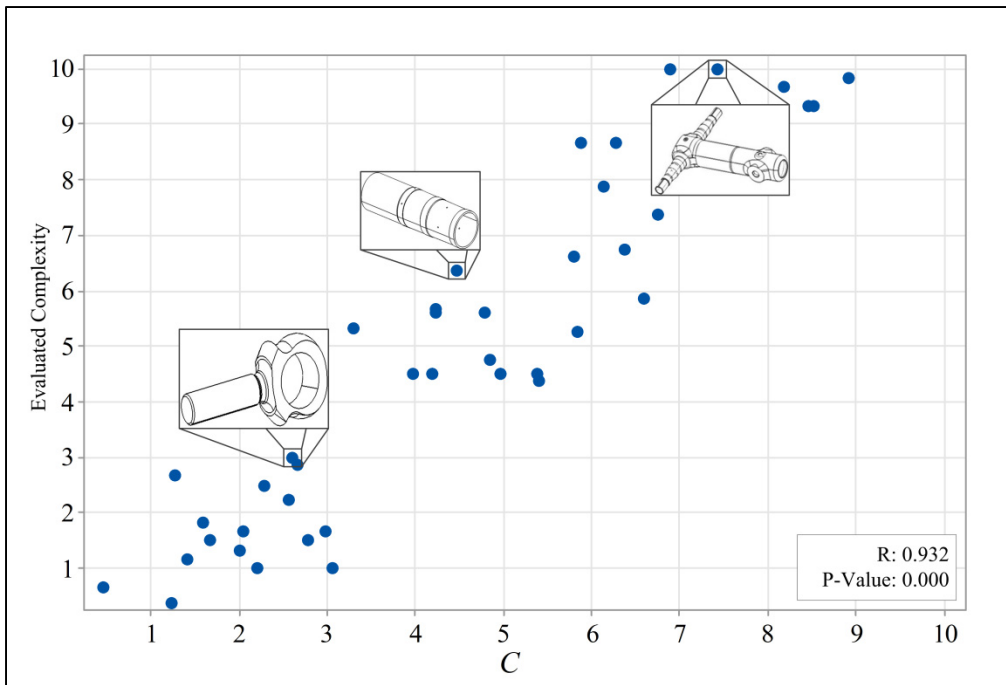


Figure 7.2 Distribution entre C et C_E

En effectuant une analyse de régression linéaire à l'aide du logiciel statistique, il est possible d'obtenir une équation de régression (équation (7.2)).

$$C_E = -0.607 + 1.2322C \quad (7.2)$$

En analysant en détail les données de régression, nous remarquons que le logiciel statistique estime la P -Value de la constante à une valeur de 0.118. En d'autres mots, nous acceptons l'hypothèse nulle et concluons que la constante n'est pas significative, et ainsi, qu'il n'y a pas de biais. Il nous est donc possible de refaire une régression linéaire en ne prenant pas en compte la constante (équation (7.3)). Inversement, la P -Value de notre variable C est environ égale à 0.000. Nous supposons donc que celle-ci est significative, et ainsi, nous rejetons l'hypothèse nulle.

$$C_E = 1.1233C \quad (7.3)$$

La Figure 7.3 résume les résultats de la droite de régression, ainsi que les limites de prédiction ($\alpha=0.1$).

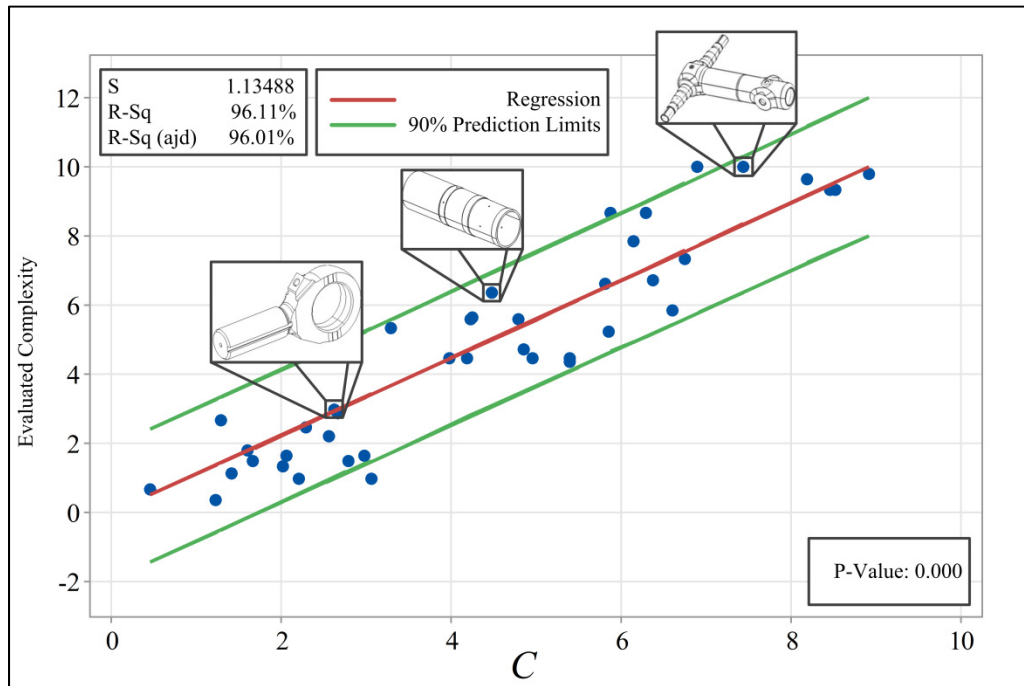


Figure 7.3 Résultats graphique de la droite de régression

Une autre information qui résulte de l'analyse de régression linéaire, est la valeur du test de Durbin-Watson. Ce test permet de valider si un phénomène d'autocorrélation est présent dans les résidus du modèle. Statistiquement, une valeur étant environ égale à 2.0 permet de conclure qu'il n'y a pas de phénomène d'autocorrélation. Grâce au logiciel d'analyse statistique, nous obtenons une valeur de 1.281, ce qui nous démontre que le modèle échoue à ce test. Visuellement, la Figure 7.4 nous permet de constater qu'il semble effectivement y avoir une tendance dans nos résidus.

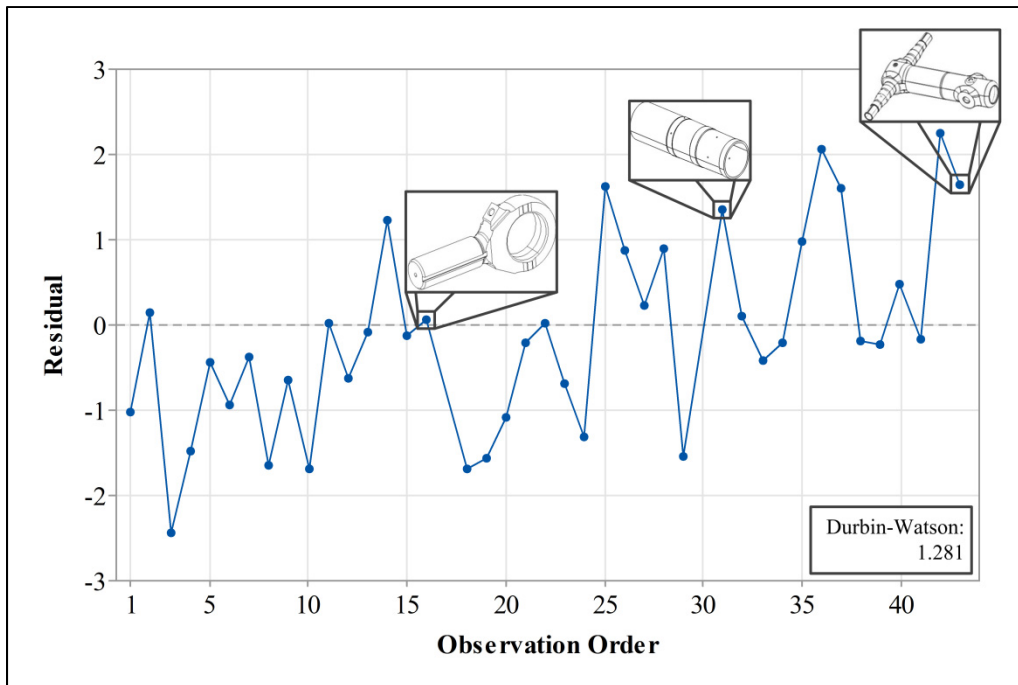


Figure 7.4 Distribution graphique des résidus en fonction de l'ordre

7.3 Discussion des résultats

La première étape dans notre processus d'évaluation du modèle proposé (équation (7.1)) est d'effectuer une analyse de corrélation linéaire (dite de Pearson). Nous observons au Tableau 7.2 que le coefficient de corrélation peut être qualifié de « fort » et de positif. Autrement dit, la complexité d'un produit peut être, en grande partie, expliquée par notre modèle. De surcroît, l'utilisation des composants candidats G_1 à G_3 se justifie dû au fait que ceux-ci produisent un coefficient de corrélation supérieur à ceux produits par chacun des composants candidats employés indépendamment les uns des autres.

De manière générale, la Figure 7.2 nous permet de constater que la distribution des données de développement ne présente pas d'anormalité ou de point s'écartant de la tendance telle que décrite par le modèle. De plus, nous observons que la distribution de nos données suit bel et bien une distribution linéaire.

De façon détaillée, la Figure 7.3 nous présente la droite de régression linéaire. Cette figure démontre que la quasi-totalité de nos données se retrouve à l'intérieur de l'intervalle de prédiction (établi à 90%, $\alpha=0.1$). De plus, le coefficient R^2 de la droite de régression ($R^2 = 96.11\%$) suggère que 96% de la variation est expliquée par le modèle. En d'autres termes, le modèle explique environ 96% de la complexité estimée par le groupe d'experts industriels.

Néanmoins, nous soumettons notre modèle à d'autres épreuves dans le but de démontrer que les résidus produits par le modèle ne présentent pas d'autocorrélation. Malheureusement, les résultats du test de Durbin-Watson, ainsi qu'une inspection visuelle des données, nous force à conclure qu'un phénomène d'autocorrélation est présent. Par conséquent, nous supposons qu'il existe un phénomène non-linéaire que nous ne prenons pas en compte. Il faut être conscient que le phénomène que nous tentons d'expliquer est un phénomène multidimensionnel. Nous essayons de l'expliquer à l'aide de trois paramètres ($C(G_1, G_2, G_3)$), alors que, potentiellement, d'autres éléments peuvent influencer sur la complexité d'un produit usiné. Ce résultat laisse donc supposer que des opportunités d'améliorations se présentent à nous dans le but d'augmenter la précision et la qualité du modèle. Afin d'être consistant dans nos analyses, nous allons reproduire ce test avec les données de validation (voir CHAPITRE 8) et ainsi confirmer ou infirmer si ce phénomène est reproduit. Évidemment, le chapitre « Recommandation » fournit des pistes de solution de manière à enrayer ce phénomène du modèle.

Finalement, sur la seule base de nos résultats d'analyse de corrélation linéaire, nous affirmons que les valeurs prédites par le modèle semblent être proches des valeurs estimées par le groupe d'experts industriels. De plus, l'erreur du modèle est de l'ordre d'environ ± 1.5 point ($\pm 15\%$) sur l'échelle de la complexité, ce qui est jugé comme acceptable.

Conséquemment, en se basant sur les résultats de ces tests, nous concluons que le modèle de prédiction de la complexité proposé ne peut pas être écarté pour le moment. Néanmoins, à ce stade de notre étude, plusieurs questions sont encore en suspens : quel est l'erreur de

prédiction du modèle? Celui-ci présent-il un biais? Quel est sa précision globale? Est-il viable et exportable dans une autre industrie ou un autre procédé?

7.4 Conclusion du chapitre 7

Pour terminer, notre proposition d'un modèle pour l'estimation d'un indice de complexité a été présentée. Celui-ci a été expliqué et exploré dans son ensemble et une analyse de corrélation linéaire a été effectuée. Les résultats de cette analyse ont démontré que la proposition est fortement liée avec les résultats du processus d'élicitation. Néanmoins de nombreuses questions doivent trouver réponses avant de pouvoir affirmer que le modèle peut prédire la complexité d'un produit usiné de façon juste et précise.

CHAPITRE 8

VALIDATION DU MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ

En vue de répondre aux interrogations du chapitre précédent, cette section du mémoire présente au lecteur la balise des tests auxquels nous soumettons le modèle, ainsi que tous les résultats obtenus.

8.1 Validation empirique du modèle

Tout d'abord, puisque corrélation n'est pas synonyme de causalité, il est important de valider empiriquement (expérimentalement) le modèle afin de nous assurer de sa précision et de son exactitude. Les équations (6.1) à (7.1) sont appliquées aux 11 produits précédemment sélectionnés pour cette étape (voir section 5.4). Les informations sur les 11 produits, ainsi que les résultats des équations sont présentées au Tableau 8.1, au Tableau 8.2 et au Tableau 8.3.

Tableau 8.1 Information volumétrique et indice de matériau pour les données de validation

Produit	V_{Raw} [in ³]	V_{Part} [in ³]	V_{Remove} [in ³]	A_{Part} [in ²]	A_{Sphere} [in ²]	F_{Part} [-]	I_M [-]	I_S [-]
1	0.72	0.21	0.71	14.39	1.72	4	3	1
5	4.50	0.45	0.90	6.26	2.85	31	4	1
14	4.22	0.43	0.90	7.48	2.73	74	8	1
19	12.91	2.39	0.81	21.38	8.65	38	8	1
22	364.47	44.44	0.88	204.74	60.67	303	4	1
29	364.47	35.13	0.90	141.44	51.87	156	4	1
36	403.89	41.40	0.90	233.81	57.87	427	4	1
41	234.00	16.05	0.93	211.87	30.76	272	8	1
44	576.14	52.77	0.91	581.81	68.04	191	8	1
47	815.48	134.32	0.84	719.32	126.84	340	8	2
54	2813.96	382.08	0.86	1966.06	254.64	4019	8	2

Tableau 8.2 Valeurs des G_i pour les données de validation

Produit	G_{1a}	G_{1b}	\hat{G}_{1a}	\hat{G}_{1b}	G_1	G_2	G_3
1	0.32	-0.67	1.15	0.56	1.71	1.22	0.32
5	0.89	1.40	1.72	2.50	4.22	1.87	0.51
14	1.52	1.33	2.36	2.44	4.80	2.73	0.55
19	2.54	2.35	3.39	3.40	6.79	2.17	0.88
22	5.26	5.77	6.15	6.61	12.76	4.02	0.84
29	5.29	5.80	6.18	6.63	12.82	3.20	0.83
36	5.38	5.89	6.28	6.72	13.00	4.56	0.90
41	5.57	5.38	6.47	6.25	12.71	4.79	0.90
44	6.44	6.26	7.35	7.07	14.42	4.64	0.97
47	8.50	7.22	9.44	7.97	17.41	4.80	0.86
54	9.77	8.49	10.73	9.16	19.89	7.22	0.90

Tableau 8.3 Valeurs pour le calcul de C et résidus

Produit	\hat{G}_1	\hat{G}_2	\hat{G}_3	C	C_E	Résidu
1	0.82	1.39	0.32	0.3	0.3	0.01
5	2.08	2.45	0.51	1.1	1.0	0.15
14	2.37	3.85	0.55	1.7	2.2	-0.49
19	3.37	2.93	0.88	2.8	2.9	-0.11
22	6.36	5.95	0.84	5.2	3.9	1.26
29	6.39	4.61	0.83	4.5	5.0	-0.48
36	6.49	6.83	0.90	6.0	5.9	0.11
41	6.34	7.21	0.90	6.1	6.8	-0.74
44	7.20	6.96	0.97	6.9	8.0	-1.12
47	8.70	7.23	0.86	6.8	8.8	-1.99
54	9.95	11.17	0.90	9.5	10.0	-0.48

Avec ces informations en main, il est possible, dans un premier temps, d'effectuer une analyse de corrélation linéaire afin de déterminer si la relation entre C et C_E , démontrée à la section 7.2, est reproduite avec les données de validation. Le Tableau 8.4 présente les résultats de cette analyse de corrélation et la Figure 8.1 nous présente, de façon graphique, la distribution des résultats. Nous constatons que la relation entre C et C_E est reproduite avec un coefficient de corrélation de 0.971. Il est également intéressant de noter que ce coefficient de corrélation est supérieur (0.971 vs 0.932) à celui produit avec les données de développement (voir section 7.2).

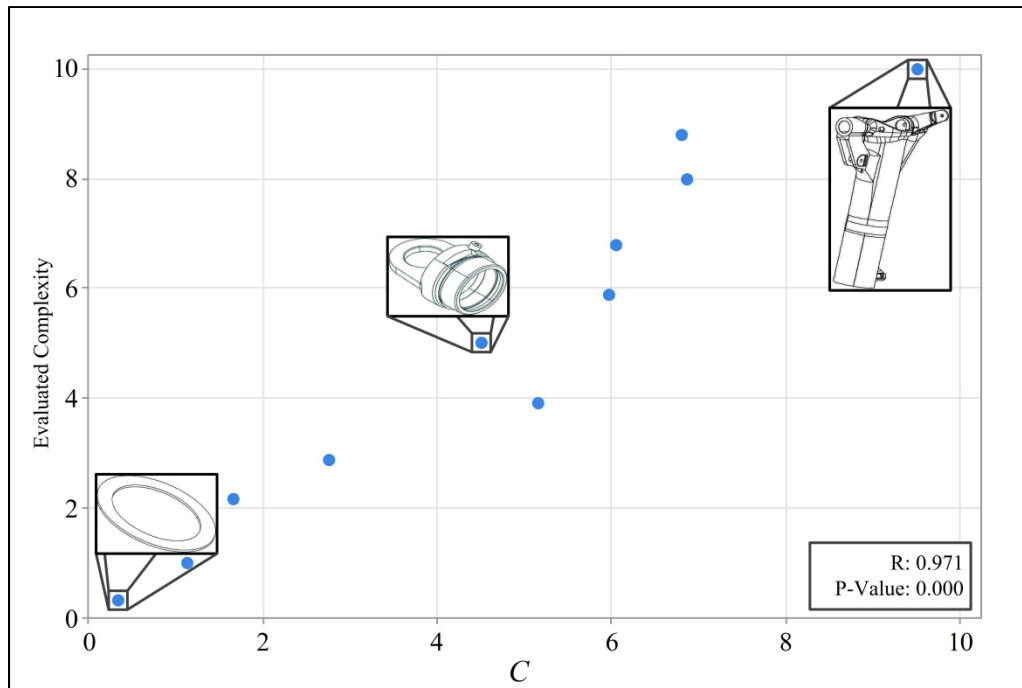


Figure 8.1 Distribution entre C et C_E pour les données de validation

Tableau 8.4 Coefficient de corrélation entre C et C_E pour les données de validation

		C
C_E	Coefficient de Pearson	0.971
	Valeur P	≈ 0.000

Dans un deuxième temps, et telle qu'effectuée avec les données de développement, une analyse de régression linéaire est effectuée l'aide du logiciel statistique. Grâce à cette analyse, il est possible d'obtenir une équation de régression (équation (8.1)).

$$C_E = -0.120 + 1.1026C \quad (8.1)$$

En analysant en détail les données de régression, nous remarquons que le logiciel statistique estime la *P-Value* de la constante à une valeur de 0.809. En d'autres mots, nous acceptons

l'hypothèse nulle et concluons que la constante n'est pas significative, et ainsi, qu'il n'y a pas de biais. Il nous est donc possible de refaire une régression linéaire en ignorant la constante (équation (8.2)). Inversement, la *P-Value* de notre variable C est environ égale à 0.000. Nous supposons donc que celle-ci est significative, et ainsi, rejetons l'hypothèse nulle.

$$C_E = 1.0832C \quad (8.2)$$

La Figure 8.2 résume les résultats de la droite de régression, ainsi que les limites de prédiction ($\alpha=0.1$).

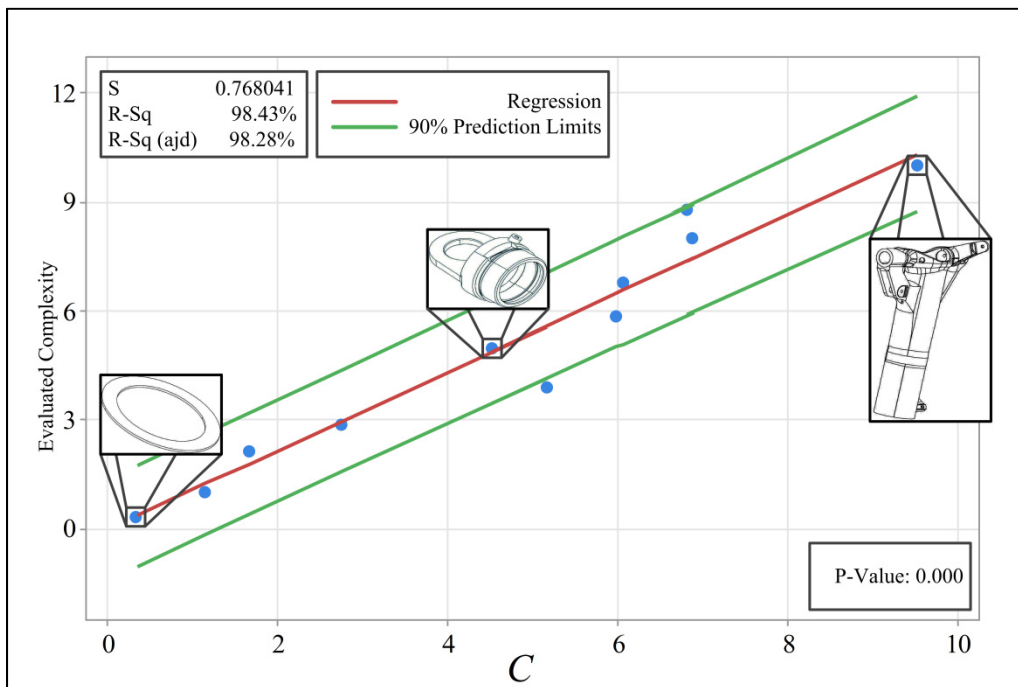


Figure 8.2 Résultats graphique de la droite de régression pour les données de validation

Troisièmement, nous avons pu observer, avec les données de développement, que le modèle ne répond pas au critère de Durbin-Watson. Afin de valider si ce phénomène est reproduit avec les données de validation, nous reconduisons le test de Durbin-Watson. Rappelons-nous que, statistiquement, une valeur étant environ égale à 2.0 permet de conclure qu'il n'y a pas

de phénomène d'autocorrélation. À l'aide du logiciel d'analyse statistique, nous obtenons une valeur de 1.928. Cette valeur est suffisamment proche de 2.0 pour conclure que notre modèle réussi ce test. De surcroît, la Figure 8.3 nous permet de constater que, visuellement, il ne semble pas y avoir une tendance dans nos résidus.

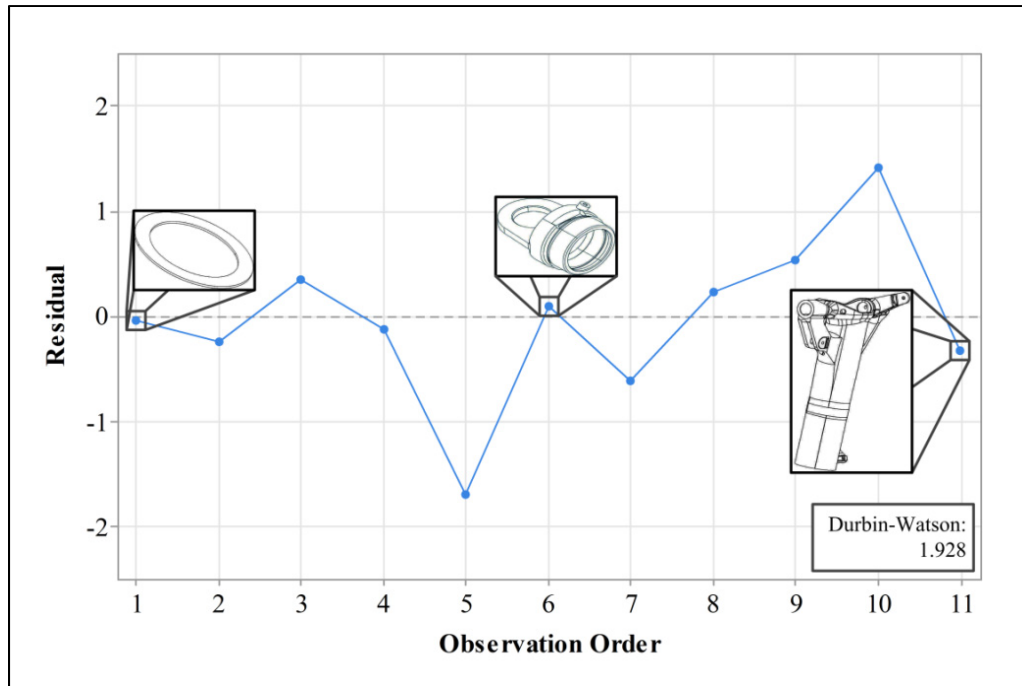


Figure 8.3 Distribution graphique des résidus en fonction de l'ordre pour les données de validation

Quatrièmement, une méthode couramment utilisée est l'examen visuel des résidus obtenus afin d'évaluer la conformité d'un modèle. Dans cet ordre d'idées, la Figure 8.4 présente une distribution entre les résidus et C , la Figure 8.5 présente un histogramme des résidus et finalement, la Figure 8.6 présente une comparaison graphique des valeurs de C et C_E .

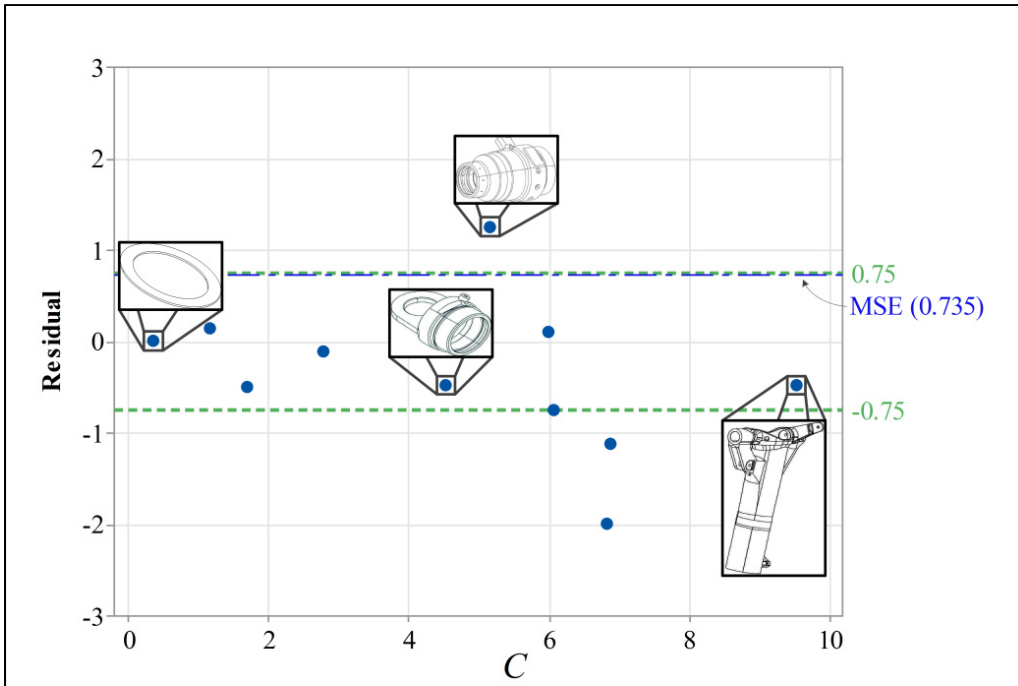


Figure 8.4 Distribution entre les résidus et la valeur estimée C

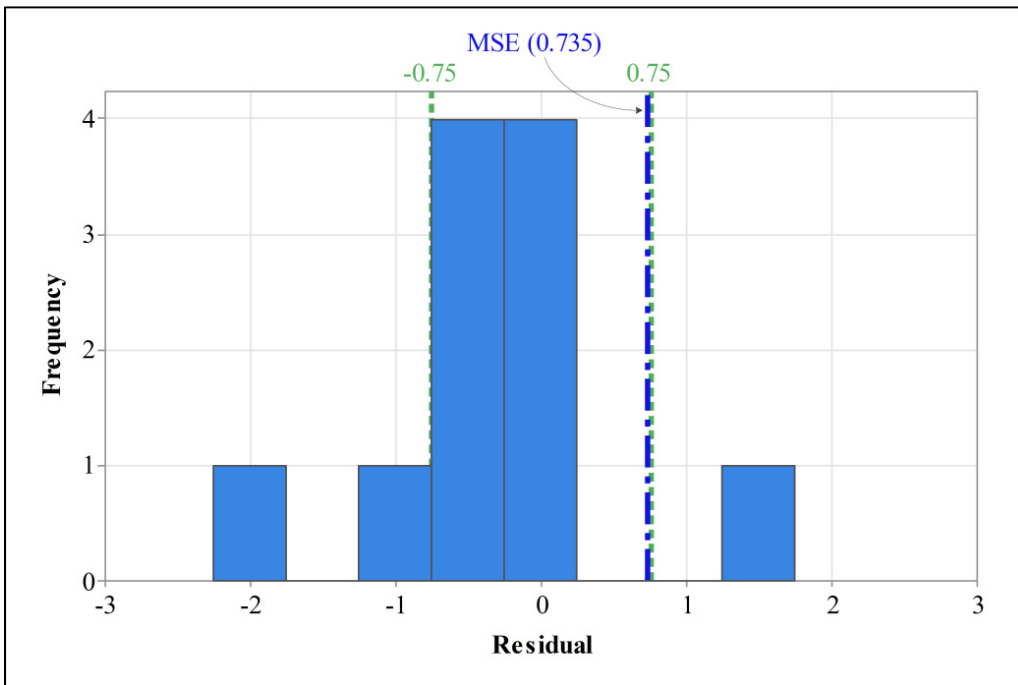


Figure 8.5 Histogramme des résidus

Grâce à la Figure 8.4 et la Figure 8.5, nous constatons que la majorité des résidus se trouvent inclus dans une étendue allant de $[-0.75, 0.75]$ et que seulement trois produits sur onze (27%) se trouvent en dehors de cette étendue.

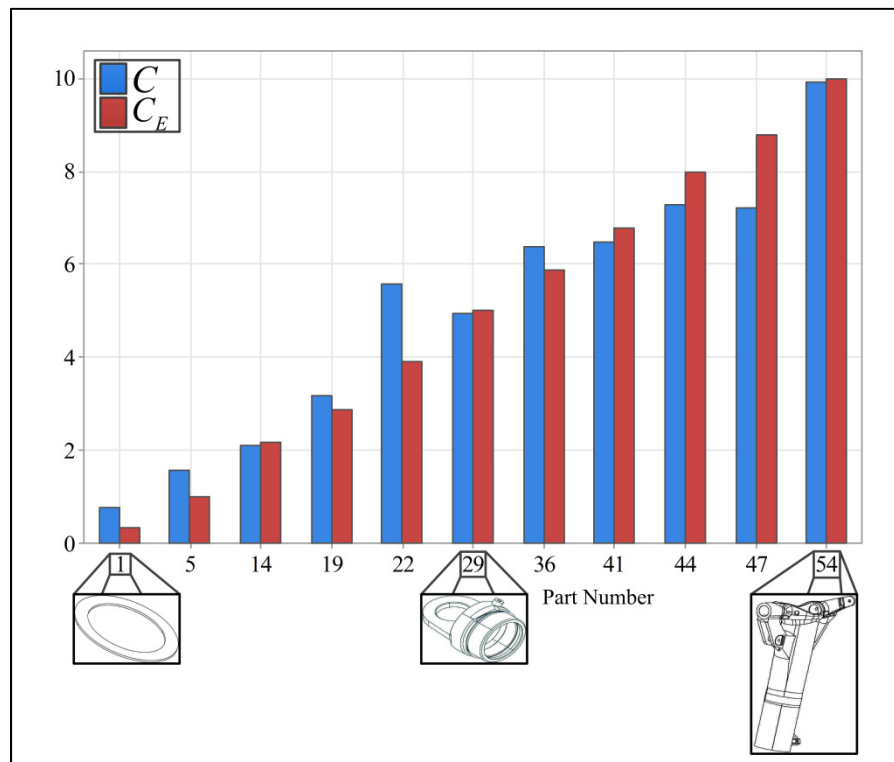


Figure 8.6 Comparaison des valeurs de C et C_E

Cinquièmement, bien que les résultats du modèle soient liés d'une manière significative aux données estimées par le groupe d'experts, il est important de calculer le niveau de l'erreur de prédiction du modèle. Afin d'obtenir cette information, nous adoptons le standard de l'erreur quadratique moyenne (MSE). Pour calculer le MSE, l'équation (8.3) est utilisée. En appliquant cette formule à nos résultats, nous obtenons un MSE de 0.735, ce qui présente environ 7% sur l'échelle de complexité. Cette valeur est jugée comme acceptable.

$$\text{MSE} = \frac{1}{P_2} \sum_{i=1}^{P_2} (C_i - C_{E_i})^2 \quad (8.3)$$

Finalement, nous effectuons un test t de Student (*Student's t-test*) dans le but d'investiguer si le modèle présente un biais significatif. La Figure 8.7 présente les résultats de ce test de façon graphique.

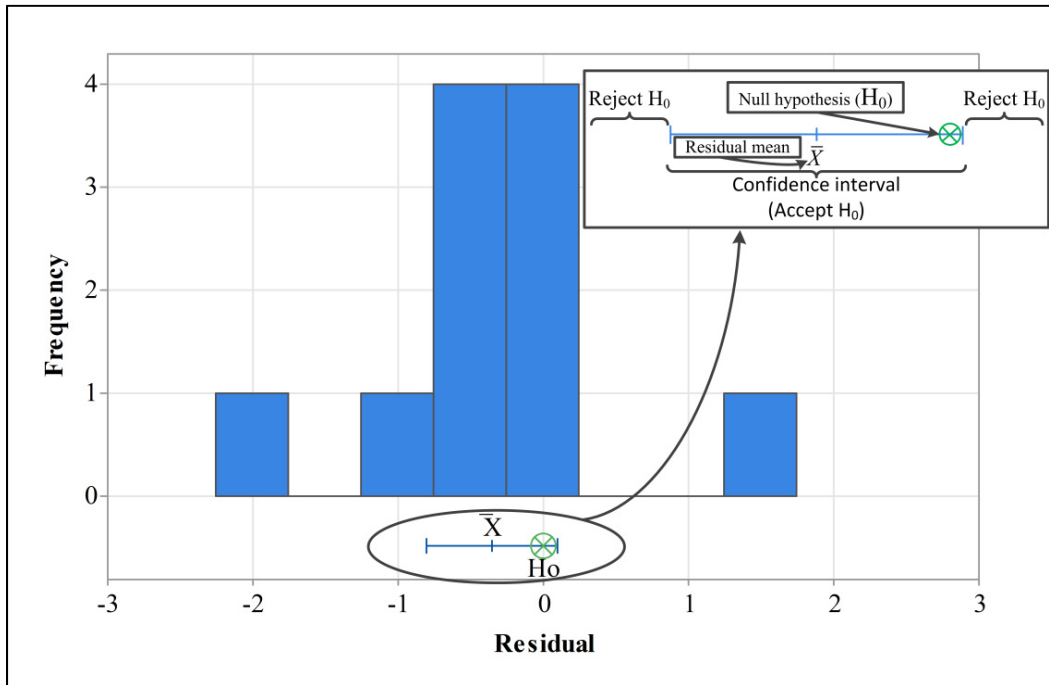


Figure 8.7 Résultats du test t de *Student*

Bien que nos résultats soient sur la limite de l'intervalle, nous concluons que l'hypothèse nulle (dans notre cas H_0 : l'erreur de biais est égale à zéro) ne peut être rejetée avec un niveau d'erreur alpha (α) égale à 10% (le niveau de confiance est égale à 90%).

8.2 Validation hors-contexte

Nonobstant que les résultats de la section 8.1 semblent prometteurs, nous devons être conscients que les données proviennent d'un contexte bien défini : i.e. l'industrie aéronautique et plus précisément, l'industrie des trains d'atterrissage. Autrement dit, nous soupçonnons que, jusqu'à preuve du contraire, il est possible que le modèle possède une saveur liée à l'industrie dans lequel notre étude est menée. Il est donc normal de se

demander : comment le modèle se comporte lorsque l'intrant de celui-ci est un produit qui provient d'une autre industrie ou qu'il est fabriqué à partir d'un autre procédé?

La présente vise donc à répondre à cette interrogation en plus de sonder le comportement du modèle en dehors des limites imposées par les données utilisées. En d'autres mots, nous tentons de répondre à la question suivante : est-ce que nos développements sont portables à d'autres contextes?

La Figure 8.8 présente la distribution des valeurs de \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et G_3 . Visuellement, il est clair que nos données sont quasiment distribuées sur une diagonale imaginaire allant de l'origine $\approx(0,0,0)$ au point $\approx(10,10,10)$. Par conséquent, que se passe-t-il lorsque nous évaluons des produits dont les valeurs \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et G_3 se retrouvent ailleurs que sur cette diagonale?

Dû à des contraintes temporelles et logistiques, il nous est impossible de reproduire l'étude encourue dans ce projet avec une entreprise provenant d'un autre domaine ou secteur d'activité, mais qui utilise tout de même un procédé d'usinage sur machine-outil CNC pour fabriquer ses produits. Pour y remédier, nous concevons trois nouveaux produits pouvant facilement être rencontrés dans d'autres industries (Figure 8.9). Différentes variantes de chaque produit sont conçues de manière à couvrir les régions se rapprochant de ce que nous appelons les extrêmes du domaine d'étude (carré de sable du modèle en \mathbf{R}^3). Ceux-ci sont représenté ici par les sommets non explorés du cube (Figure 8.10) formé par \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et G_3 . Le Tableau 8.5 présente pour chaque nouveau produit évalué : le modèle selon lequel celui-ci est conçu, ainsi que les valeurs théoriques de chaque \hat{G}_i . Une flèche vers le haut signifie que le \hat{G}_i doit tendre vers une valeur maximale et vice versa.

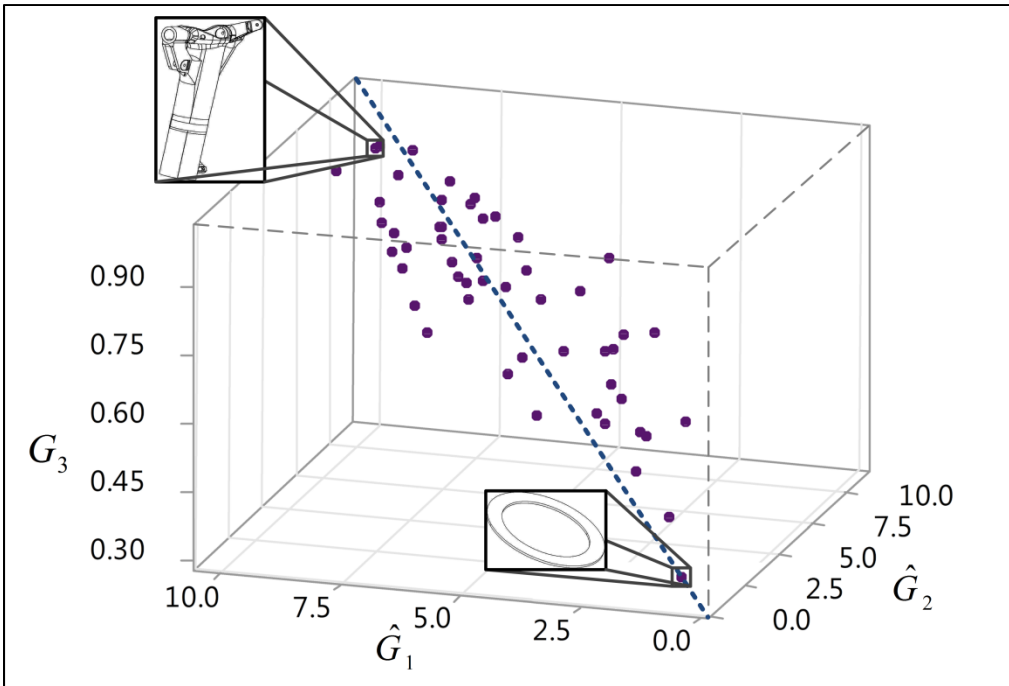


Figure 8.8 Distribution des valeurs de \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et G_3

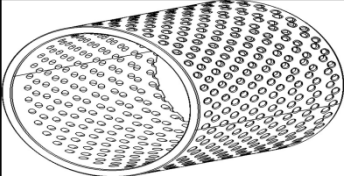
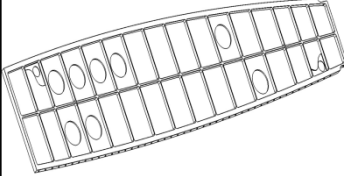
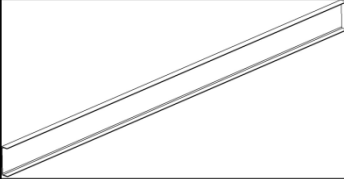
Model name	Model
Filter	
Rib	
Spar	

Figure 8.9 Produits conçus

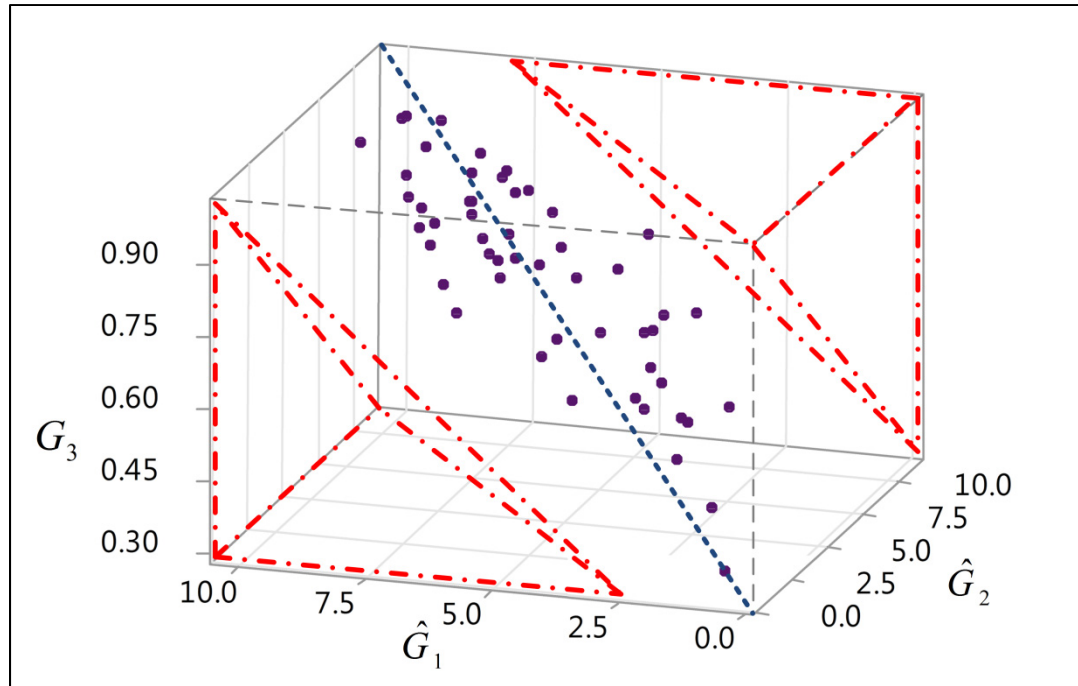
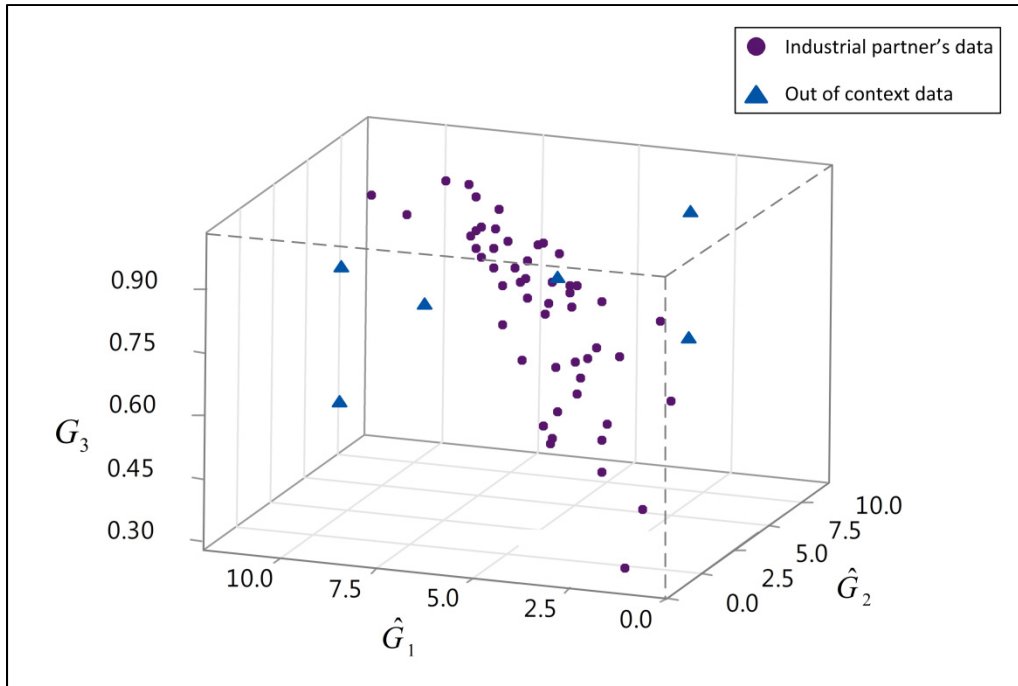


Figure 8.10 Régions à valider

Tableau 8.5 Valeurs théoriques des produits conçus

Produit	Fait à partir de	\hat{G}_1	\hat{G}_2	G_3
a	Spar	↑	↓	↓
b	Spar	↑	↓	↑
c	Rib	↑	↑	↓
d	Filter	↓	↑	↓
e	Filter	↓	↓	↑
f	Filter	↓	↑	↑

Ensuite, une étape semblable au processus d'élicitation de la section 5.4 est entreprise avec le groupe d'experts industriels dans le but de quantifier la complexité évaluée (C_E) de chaque produit conçu. Finalement, la méthodologie d'estimation de notre modèle est appliquée sur ces produits afin d'obtenir un indice de complexité (C). La Figure 8.11 présente la position des valeurs \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et G_3 par rapport aux données provenant du partenaire industriel. Également, le Tableau 8.6 présente les résultats de cette comparaison.

Figure 8.11 Distribution des valeurs \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et G_3 Tableau 8.6 Valeurs de \hat{G}_1 , \hat{G}_2 , G_3 , C_E , C et résidu

Produit	\hat{G}_1	\hat{G}_2	G_3	C	C_E	Résidu
a	10.60	3.20	0.62	3.6	3.5	0.11
b	10.60	3.20	0.92	5.4	8.0	-2.64
c	9.39	9.60	0.67	6.4	4.5	1.86
d	2.49	9.36	0.60	2.9	3.0	-0.10
e	2.00	3.62	0.96	2.6	9.0	-6.42
f	2.49	9.36	0.92	4.4	7.0	-2.56

8.3 Discussion des résultats

La validation empirique du modèle est une étape obligatoire pour démontrer l'exactitude de celui-ci et quantifier sa précision. Les sections 8.1 et 8.2 ont présenté les résultats de cette étape de validation.

Il est possible de voir au Tableau 8.4 un premier indicateur de la validité du modèle. Les résultats de l'analyse de corrélation linéaire démontrent qu'il y a une corrélation positive

pouvant être qualifiée de « très forte » entre les résultats de notre modèle (C) et les valeurs observées (C_E). De surcroît, l'indice de signification (P -value) est inférieur au seuil de signification α (P -value $\approx 0.000 < \alpha = 0.05$), ce qui nous laisse supposer que l'hypothèse nulle, stipulant qu'il n'y a pas suffisamment de preuve pour assumer l'existence d'une relation entre nos deux variables, semble pouvoir être rejetée.

D'une part, les résultats des analyses de corrélation linéaire sont prometteurs, mais ceux-ci ne nous permettent en aucun cas d'affirmer que le modèle est en mesure de prédire des valeurs reflétant la réalité. L'analyse des écarts entre les valeurs observées et prédites nous permet de répondre en partie à cette question. L'étude des résidus nous laisse tirer certaines conclusions quant au comportement du modèle. Pour commencer, grâce à la Figure 8.5, nous observons que 8 produits sur 11 (72%) sont compris dans une étendue de $[-0.75, 0.75]$ point de leur valeur cible. Pareillement, l'analyse du MSE démontre que la moyenne des résidus est égale à 0.735 ($\approx 7\%$). Conséquemment, il est possible d'affirmer que les résultats du modèle sont situés, en moyenne, à moins d'un point (± 1) de leur valeur cible respective (C_E).

D'une autre part, qu'en est-il des produits s'écartant d'avantage de la moyenne? Nous pouvons facilement observer que les résidus des produits #22, #44 et #47 se trouvent en dehors de l'étendue $[-0.75, 0.75]$. Pour quelle(s) raison(s) le modèle n'est pas en mesure de correctement prédire l'indice de complexité de ces trois produits? Une première tentative est d'expliquer ces trois résultats par le fait que nous observons un phénomène multidimensionnel. C'est-à-dire que, lors du processus d'élicitation des connaissances, le groupe d'experts industriels a établi les valeurs observées (C_E) en fonction de l'entièreté de leur expérience. C'est-à-dire que tous les aspects d'un produit usiné sont tenus en compte lors de leurs évaluations. En revanche, notre projet de recherche produit un modèle prédictif qui est fonction de trois variables ($C(G_1, G_2, G_3)$). Conséquemment, les résidus des produits #22, #44 et #47 s'expliquent par le fait que le modèle ne tient pas en compte d'une ou de plusieurs dimensions que le groupe d'experts a inconsciemment utilisées lors de leur évaluation.

Une deuxième avenue d'explication se trouve non pas dans une faille du modèle, mais dans les résultats du processus d'élicitation. En effet, nous avons énoncé au début de ce mémoire que l'appréciation subjective d'un produit par un expert n'est pas suffisamment précise et certaine (Morgan, 2014). Il se peut donc qu'une partie des résidus de ces trois produits soit imputable à cette part de subjectivité dans l'évaluation de la complexité effectuée par le groupe d'experts. Par exemple, il se peut très bien que l'évaluation du produit #22 ait été biaisée par le fait que la recette de fabrication de ce produit soit stable et donc, que cette stabilité vienne influencer l'évaluation du groupe d'experts. Bien entendu, nous croyons que si tel est le cas, une pareille erreur aurait pu être d'avantage généralisée dans nos données. Ce faisant, nous jugeons que cette avenue d'explication est plausible, mais n'est pas en mesure d'expliquer la totalité des écarts observés.

Néanmoins, ces écarts sont suffisamment significatifs pour qu'une investigation supplémentaire soit effectuée. Pour cette raison, des avenues de recherche additionnelles sont formulées à la section « Recommandations » de manière à fournir des pistes de solutions pour augmenter la précision et la validité du modèle, et ainsi, réduire les écarts entre les valeurs prédites et observées à un seuil minimal.

D'autre part, grâce à la Figure 8.7, il est possible d'observer que la moyenne des résidus se trouve dans l'intervalle de confiance (fixé à 90%). Nous acceptons donc l'hypothèse nulle (H_0) stipulant que tout écart ou différence est aléatoire. En d'autres mots, le test t de *Student* nous laisse présupposer que le modèle ne présente pas de biais significatif.

Dans un autre ordre d'idée, la Figure 8.2 nous présente la droite de régression linéaire. Cette figure démontre que la quasi-totalité de nos données se retrouve à l'intérieur de l'intervalle de prédiction (établi à 90%, $\alpha=0.1$). De plus, le coefficient R^2 de la droite de régression ($R^2 = 98.43\%$) suggère que 98% de la variation peut être expliquée par le modèle. Autrement dit, le modèle développé explique environ 98% de la complexité estimée par le groupe d'experts industriels. Ce résultat est également supérieur à celui obtenu avec les données de développement (98% vs 96%). Ces deux résultats allant dans le même sens, nous supposons

donc qu'une grande partie de la complexité d'un produit usiné peut être estimée par le modèle.

Ensuite, nous soumettons les résidus du modèle à une autre épreuve dans le but de démontrer que ceux-ci ne présentent pas d'autocorrélation. Les résultats du test de Durbin-Watson, ainsi qu'une inspection visuelle des données, permettent de supposer qu'un phénomène d'autocorrélation n'est pas présent, ce qui est contraire à la conclusion obtenue avec les données de développement. Par conséquent, il devient ardu de se positionner sur la base de ce test. Nous avons obtenus deux résultats opposés, ainsi, nous supposons que la vérité se trouve à mi-chemin entre les deux résultats. Nous croyons qu'il ne faut pas rejeter le phénomène d'autocorrélation, puisque le résultat obtenu avec les données de développement démontre clairement une tendance. Conséquemment, si nous prenons en compte les résultats de l'analyse des résidus, du test de Durbin-Watson, ainsi que ceux de la validation hors-contexte, nos conclusions s'orientent vers le fait qu'un autre aspect que ceux utilisés ($C(G_1, G_2, G_3)$) dans le modèle pourrait influencer sur la complexité d'un produit usiné.

Dans un autre ordre d'idées, les résultats de l'étape de validation hors-contexte ont permis d'explorer une autre facette du modèle : sa portabilité. En effet, cette portion de notre évaluation est importante, puisqu'elle permet de valider s'il est possible d'utiliser nos travaux dans une autre industrie que celle des trains d'atterrissage. Ainsi, il est possible de constater au Tableau 8.6 que quatre résidus sur six se trouvent en dehors de l'écart $[-0.75, 0.75]$ établi. Évidemment, il est normal de se demander pour quelle(s) raison(s) le modèle se comporte de la sorte? Certains facteurs peuvent expliquer ce comportement : premièrement, bien que l'évaluation de la complexité de ces six produits soit menée selon la méthodologie énoncée à la section 5.4, une partie des résidus des produits, qui sont fondamentalement différents en termes d'industrie, est dû au fait que le groupe d'experts n'a pas les connaissances ou compétences requises pour évaluer ces produits. Imaginons-nous un expert de l'industrie du métal en poudre se retrouve à travailler dans l'industrie de l'aérostructure; il est évident qu'une période d'apprentissage et d'adaptation soit nécessaire. C'est dans ce même ordre

d'idée que nous pensons qu'une partie des résidus de l'évaluation hors-contexte est attribuable à ce phénomène.

Deuxièmement, il est possible de discerner que les résidus les plus importants (produits b, e et f) ont en commun le fait que notre conception veut maximiser le composant G_3 (voir Tableau 8.5). D'ailleurs, lors du processus d'élicitation des produits hors-contexte, l'élément qui a fourni le plus d'apport en termes de complexité est la portion annotation de notre conception. Par conséquent, l'évaluation de la complexité (C_E) se trouve à être supérieure à la prédiction du modèle. Ainsi, ce phénomène nous laisse supposer que le modèle n'est pas en mesure d'évaluer correctement le composant G_3 lorsque des annotations « extrêmes » sont appliquées sur un produit. Dans le but de soutenir cette supposition, prenons par exemple les produits a et b. Pour ces deux produits, le modèle prédit correctement la complexité lorsque des annotations « normales » sont appliquées (produit a), mais le résidu augmente lorsque des annotations « extrêmes » sont utilisées (produit b). Ces suppositions semblent aller de pair avec nos conclusions des tests d'autocorrélation. Évidemment, la section « Recommandation » fournit des pistes de solutions dans l'optique de corriger ce phénomène non-désiré.

Néanmoins, cette portion de la validation se veut une exploration du comportement du modèle lorsque des situations « extrêmes » ou différentes du contexte de recherche se présentent à celui-ci. Il n'en reste pas moins que, dans des conditions normales, il est démontré que le modèle d'estimation peut correctement prédire la complexité d'un produit usiné.

8.4 Conclusion du chapitre 8

Afin de conclure ce chapitre, une étape de validation empirique a été entreprise de manière à démontrer la validité du modèle. Les résultats de nos analyses fournissent donc les preuves suggérant que le modèle ne présente pas de biais et que celui-ci est en mesure de prédire la complexité d'un produit usiné avec une erreur ne dépassant pas $\pm 15\%$ sur l'échelle de la complexité.

Finalement, nous croyons que malgré de légers écarts, les résultats du modèle d'estimation de la complexité d'un produit usiné sont, en notre humble opinion, cohérents et d'une précision adéquate. Rappelons-nous que, dans les entreprises, et chez le partenaire industriel, le processus actuel d'évaluation des risques manufacturiers, reflétant la complexité, est majoritairement subjectif, qualitatif, et laissé à l'interprétation de chaque intervenant du processus. L'utilisation d'une métrique quantitative et objective permet donc de faire un pas en avant dans la détection et l'identification des produits à forte complexité.

CHAPITRE 9

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AUTOMATISATION

Rappelons-nous que la deuxième question de recherche définie dans ce projet a été formulée comme suit : « Comment pouvons-nous automatiser l'estimation d'un indice de complexité afin de rendre la méthodologie accessible aux entreprises? ». Ce chapitre présente notre proposition en vue de fournir une réponse adéquate à ce problème. Nous présentons, tout d'abord, l'architecture de l'outil pour ensuite développer d'avantage sur son fonctionnement et son extrant.

9.1 Architecture de l'outil

Dans le but de permettre au lecteur de se familiariser avec l'outil d'automatisation développé, cette première section vise à détailler l'architecture de celui-ci.

Pour commencer, globalement, notre outil se compose, du côté client, d'une application contenant la logique d'affaire, les interfaces utilisateurs, etc. et, du côté serveur, d'une base de données SQL (Figure 9.1).

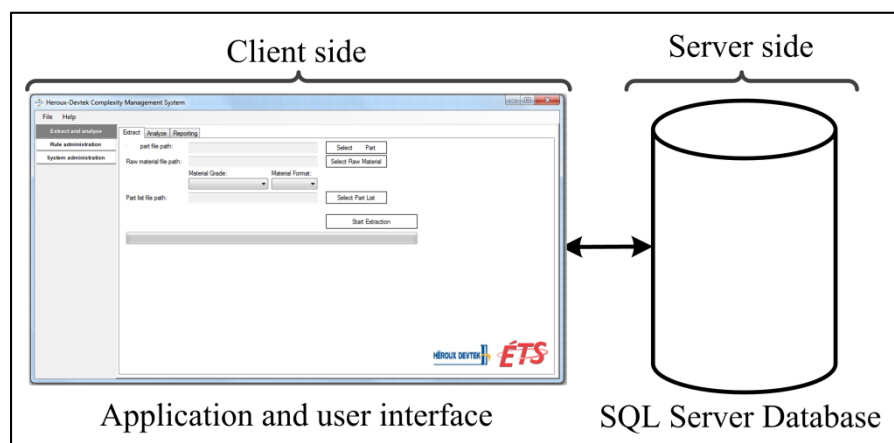


Figure 9.1 Architecture globale

Du côté client, l'application se compose de cinq modules attachés à un module central (Figure 9.2).

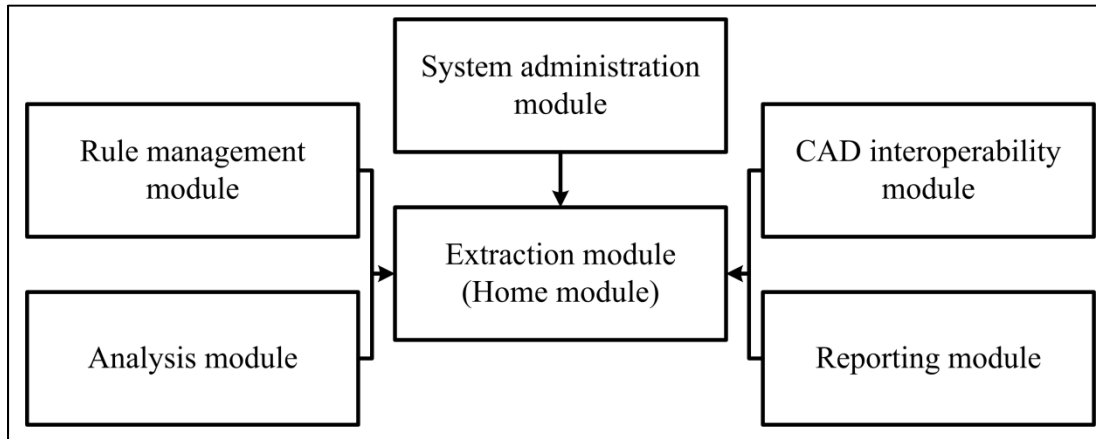


Figure 9.2 Architecture de l'application côté client

Premièrement, le module central (module d'extraction) (Figure 9.3) possède une double responsabilité. De un, il permet aux utilisateurs de sélectionner les intrants servant à l'extraction des données et, de deux, il permet la navigation dans les différents autres modules de l'application.

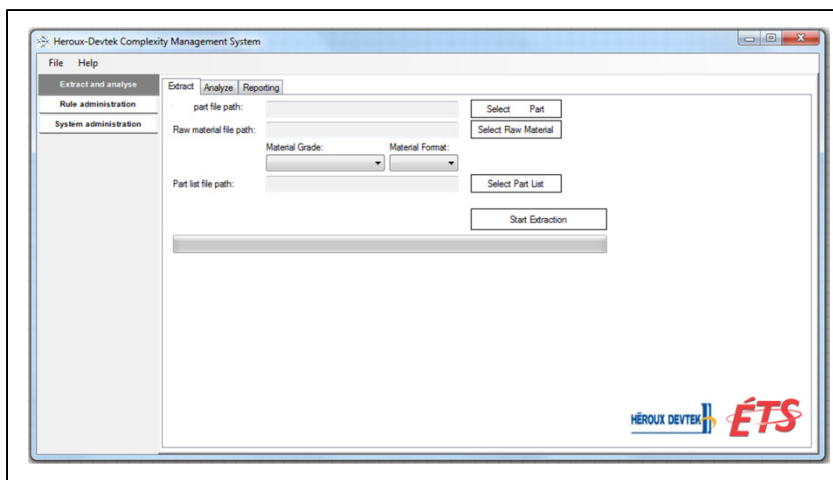


Figure 9.3 Interface utilisateur du module central (module d'extraction)

Deuxièmement, le module d'analyse (Figure 9.4) permet d'exécuter la logique d'affaire implantée afin de procéder à l'analyse des données extraites. En d'autres termes, ce module permet d'appliquer concrètement la méthodologie développée dans le cadre de ce projet aux données extraites.

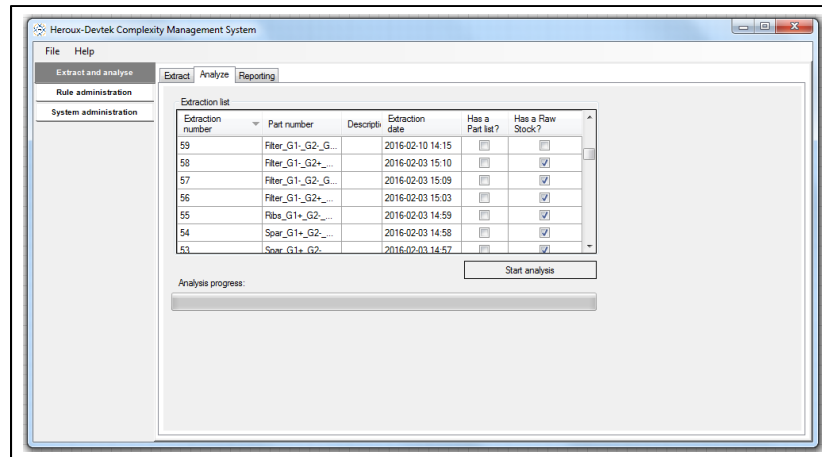


Figure 9.4 Interface utilisateur du module d'analyse

Troisièmement, le module de gestion des règles (Figure 9.5) permet la création et la modification des règles de décision. Ces règles sont utilisées par le module d'analyse.

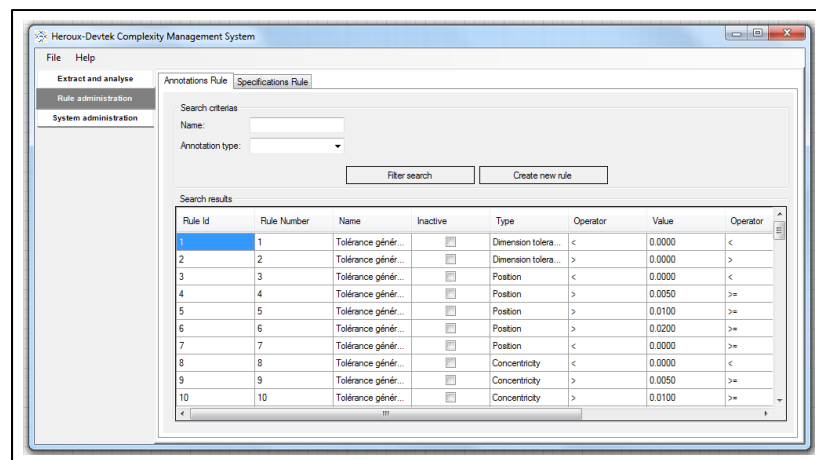


Figure 9.5 Interface utilisateur du module de création et de modification des règles de décision

Quatrièmement, le module de gestion du système (Figure 9.6) permet la création et la modification des données systèmes telles que les données sur les matériaux (section 5.3)

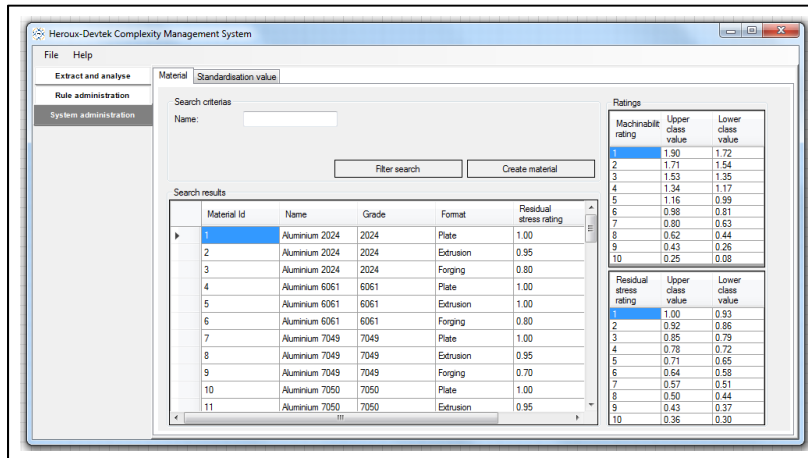


Figure 9.6 Interface utilisateur du module d'administration du système

Cinquièmement, le module d'interopérabilité avec le logiciel de conception assistée par ordinateur coordonne toutes les interactions avec celui-ci afin d'extraire les données provenant du modèle 3D enrichie. Ce module n'est pas accessible par l'utilisateur, puisqu'il s'agit d'algorithmes qui opèrent entre notre outil, le logiciel de conception assistée par ordinateur et la base de données SQL.

Finalement, le module de rapport (Figure 9.7) permet d'afficher les résultats de l'analyse sous la forme d'un rapport d'information.

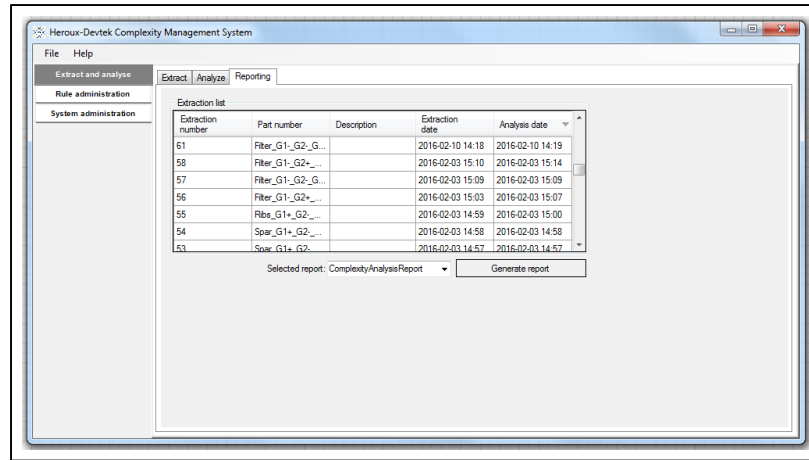


Figure 9.7 Interface utilisateur du module de rapport

Au niveau serveur, une base de données de type SQL a été développée afin de conserver toutes les données extraites, ainsi que les résultats d’analyses et les connaissances des experts industriels (règles de décision). La Figure 9.8 présente le schéma conceptuel des données.

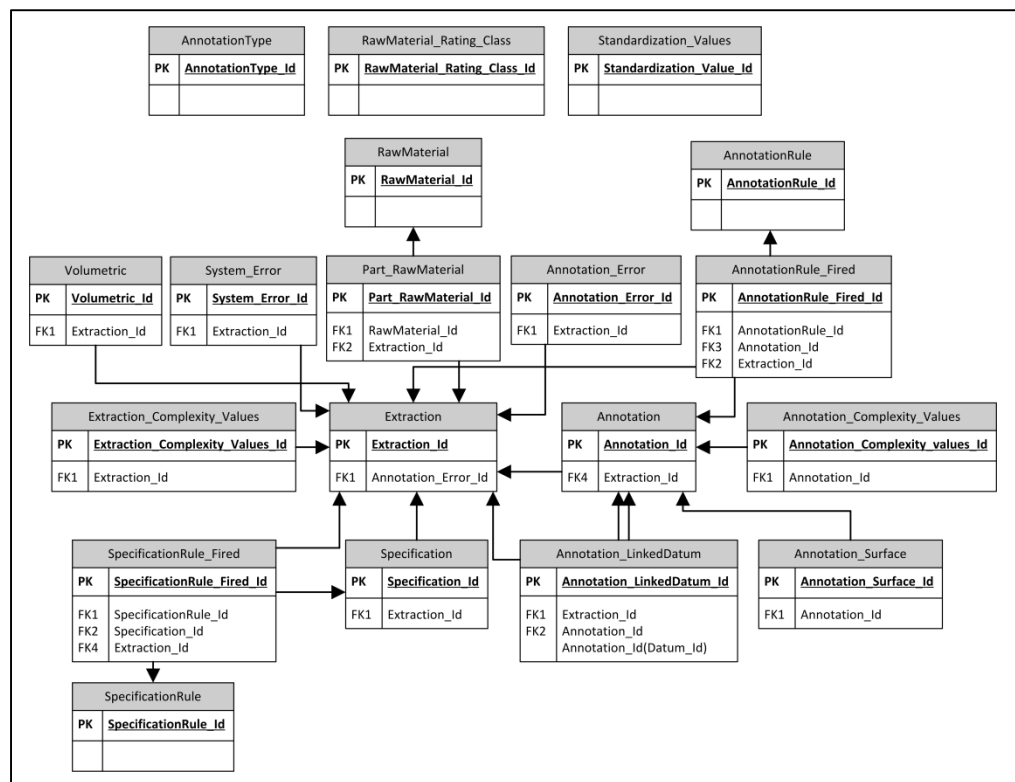


Figure 9.8 Schéma conceptuel des données

9.2 Fonctionnement de l'outil

Cette section vise à présenter, de façon agrégée, les relations entre les différents modules énumérés à la section précédente. Tout d'abord la Figure 9.9 présente, de façon visuelle, le fonctionnement de l'outil.

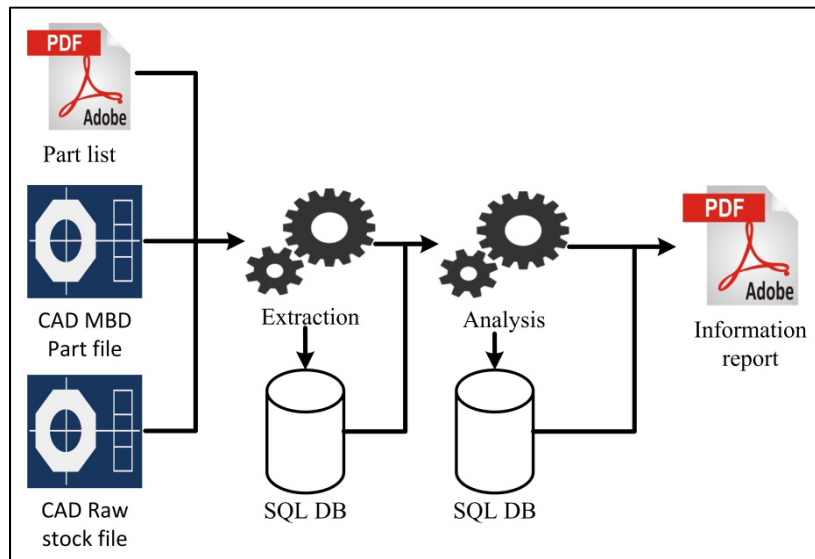


Figure 9.9 Schéma fonctionnel de l'outil

Trois intrants sont requis pour effectuer une analyse complète selon la méthodologie développée dans ce projet de recherche :

- 1) Le modèle 3D enrichi du produit devant être analysé;
- 2) Le modèle 3D du brut servant à la fabrication du produit;
- 3) Le fichier PDF de la feuille de notes qui contient les spécifications.

Une fois que ces trois intrants sont fournis à l'outil par l'utilisateur, une première étape d'extraction est lancée. Cette étape permet d'extraire toutes les caractéristiques nécessaires à l'application de la méthodologie. Une fois l'extraction terminée, toutes les caractéristiques extraites sont insérées dans la base de données.

Durant la deuxième phase, les données extraites à la première étape sont récupérées de la base de données pour être transmises aux algorithmes d'analyses. C'est à cette étape que la méthodologie développée dans ce projet est appliquée. La dernière phase de cette étape consiste à insérer les résultats de l'analyse dans la base de données.

Troisième et dernière étape, l'utilisateur demande la génération d'un rapport d'information (l'extrait de l'outil). Le système récupère donc les résultats de l'analyse dans la base de données et les affiche dans un rapport dont la mise en page a été préalablement définie. La Figure 9.10 présente un exemple de la première page du rapport qui est générée.

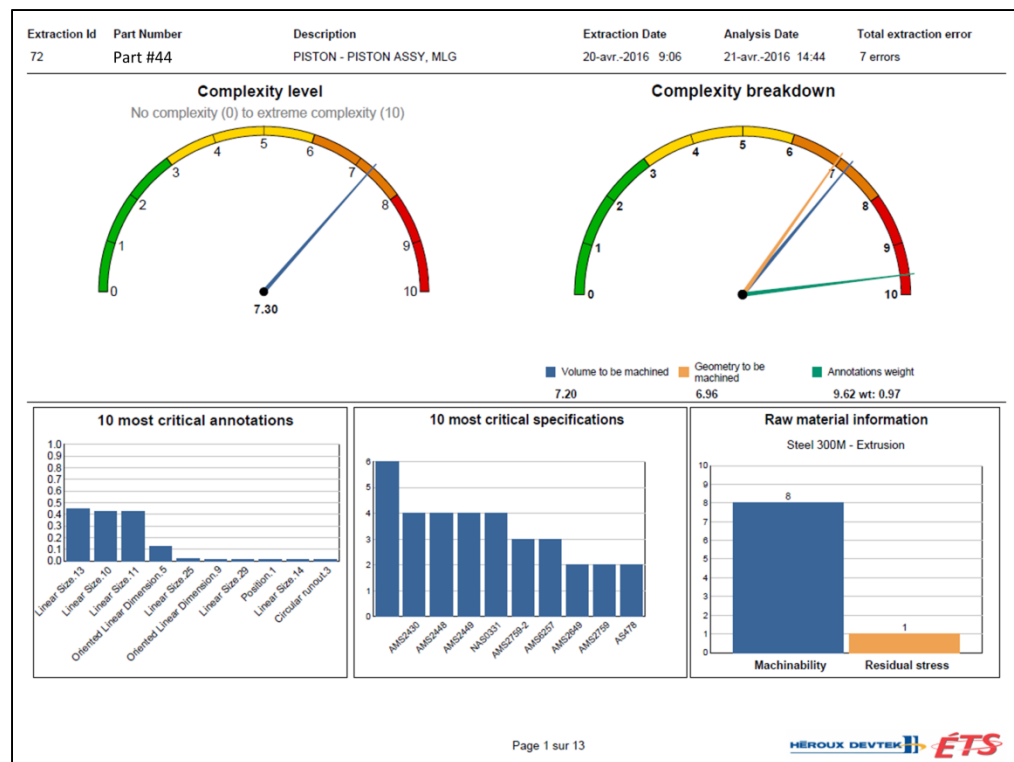


Figure 9.10 Exemple de rapport d'information

Finalement, certaines fonctions complémentaires de l'outil permettent de créer et de modifier les règles de décision, les données sur les matériaux ou encore les valeurs de standardisation. Ces données sont utilisées à la deuxième étape, c'est-à-dire celle de l'analyse.

9.3 Conclusion du chapitre 9

Tout d'abord, rappelons-nous la deuxième question de recherche : « Comment pouvons-nous automatiser l'estimation d'un indice de complexité afin de rendre la méthodologie accessible aux entreprises? ». Afin de répondre à ce problème, notre équipe a développé une application informatique qui permet d'exécuter de façon automatique la méthodologie développée dans ce projet. Ce chapitre a donc présenté l'outil développé, ainsi que son architecture et son fonctionnement.

Finalement, cet outil permet donc d'équiper notre partenaire industriel d'une solution permettant de cibler systématiquement les produits à forte complexité et ce, d'une façon rapide et efficace. Il est donc maintenant facile pour celui-ci de générer de l'information de gestion qui permet de venir supporter le processus décisionnel des intervenants du processus manufacturier.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Pour commencer, rappelons-nous que l'objectif principal de ce projet de recherche était de développer un modèle d'estimation de la complexité d'un produit usiné fortement corrélé à la capacité du procédé de fabrication. Nous avons clairement identifié, au début de ce mémoire, que les entreprises sont sous l'emprise d'une dualité représentée par la complexité des produits sans cesse grandissante et le poids de cette complexité sur leurs processus. De surcroît, les entreprises sont laissées au dépourvu face à ce concept, et l'absence d'outil ou de méthode homologuée permettant l'identification des produits à forte complexité n'aide pas. Ce projet s'inscrit donc dans cette problématique afin d'outiller les organisations de manière à leur permettre d'effectuer une estimation rapide de la complexité d'un produit usiné. La méthode développée devait donc être accessible aux entreprises et utiliser comme intrants les informations contenues dans le modèle 3D enrichi d'un produit. Deux questions de recherche ont donc été formulées :

- 1) Comment pouvons-nous exprimer la complexité sous la forme d'un indice fortement corrélé avec la capacité du procédé de fabrication?
- 2) Comment pouvons-nous automatiser l'estimation d'un indice de complexité afin de rendre la méthodologie accessible aux entreprises?

Dans le but de parvenir à répondre à ces deux questions de recherche, nous nous sommes dotés d'une méthodologie de recherche. Afin de demeurer synthétique, le lecteur peut se référer à la Figure 2.1 introduite à la fin de la section 2.3 pour un résumé de la méthodologie.

Notre point de départ pour le développement du modèle d'estimation, et ainsi tenter de répondre à la première question de recherche, a été un processus d'élicitation des connaissances d'un groupe d'experts issu des employés de notre partenaire industriel : Héroux-Devtek Inc., division Laval (Laval, Québec). Bien que la complexité d'un produit usiné est un phénomène multidimensionnel, nous avons démontré que trois dimensions, le volume à être usiné, l'ordre de grandeur des éléments géométriques et la valeur de pondération des annotations permet d'estimer un indice de complexité ($C(G_1, G_2, G_3)$). Lors

de la validation du modèle, nous avons observé que celui-ci est apte à prédire un indice de complexité avec une erreur de prédiction ne dépassant pas 15% sur l'échelle de la complexité. Toutefois, nous avons constaté qu'une faible proportion des produits se trouve en dehors des limites de prédictibilité. Ainsi, nous supposons qu'un ou plusieurs aspects additionnels sont potentiellement nécessaires pour améliorer la précision du modèle. De plus, une étape de validation dite « hors-contexte » effectuée avec des produits représentatifs d'industries autres que celle des trains d'atterrissage démontre qu'il est nécessaire d'investiguer d'avantage le comportement du modèle lorsque les annotations d'un produit sont jugées « extrêmes ». Finalement, dû à des contraintes de natures logistiques et temporelles, combinées à un manque de données chez le partenaire industriel, il nous a été impossible de tirer une conclusion quant au niveau de corrélation entre l'indice de complexité d'un produit et la capacité du procédé à maintenir les spécifications du produit.

Deuxièmement, en vue de répondre à la seconde question de recherche qui nous demande d'équiper les entreprises d'un outil informatique afin de rendre accessible la méthodologie d'estimation développée dans ce projet de recherche, une application informatique a été conçue. Son architecture a été présentée, ainsi que son fonctionnement et son extrait. Les résultats et commentaires de notre partenaire industriel ont permis de conclure que l'application permet de rendre accessible notre méthodologie, et ce, d'une façon simplifiée et efficace. Il est donc maintenant facile pour le partenaire industriel d'estimer la complexité d'un produit usiné directement à partir des informations disponibles dans le modèle 3D enrichi d'un produit.

Pour résumer, dans le cadre de ce projet, nos contributions significatives à la science sont les suivantes :

- 1) Nous avons effectué un processus d'élicitation des connaissances avec un groupe d'experts industriels et nous avons été en mesure de convertir une partie de leurs connaissances en plusieurs énoncés mathématiques structurés;
- 2) Nous avons développé une échelle de référence hiérarchisant la complexité dans l'industrie des trains d'atterrissage;

- 3) Nous avons développé un modèle d'estimation de la complexité d'un produit usiné;
- 4) Nous avons élaboré les fondements pour l'analyse mathématique des annotations contenues dans un modèle 3D enrichi;
- 5) Nous avons démontré la pertinence et la précision du modèle d'estimation;
- 6) Nous avons développé une application informatique dans le but d'automatiser et de rendre accessible aux entreprises le modèle d'estimation;
- 7) Nous avons implanté et assuré l'utilisation de l'outil chez le partenaire industriel, et ainsi, démontré l'aspect réel et concret des solutions développées dans ce mémoire;
- 8) Finalement, nous avons présenté un article pour la conférence MOSIM 2016 (*11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation*). Celui-ci a été accepté pour publication (Voir ANNEXE II).

En terminant, le lecteur se doit d'être conscient qu'un modèle n'est qu'une abstraction et une formalisation approximative d'une réalité beaucoup plus complexe étant elle-même difficile à résumer en seulement quelques formules : « *All models are wrong* » disait le célèbre statisticien George Box. Le modèle développé n'en fait pas exception : nous avons constaté que celui-ci comporte une marge d'erreur et que des opportunités d'amélioration ont été mises en évidence. Néanmoins, un modèle peut être utile. Nous avons démontré que celui-ci peut correctement estimer la complexité d'un produit usiné et ainsi être utile aux entreprises dans le but de les aider à cibler de façon efficace et systématique les produits à forte complexité. Notre équipe, au travers de ce projet de recherche, a donc contribué à mettre en place les fondations d'une méthodologie d'estimation de la complexité d'un produit usiné.

RECOMMANDATIONS

Tel que soulevé lors de la conclusion, le modèle a été développé avec les données obtenues chez notre partenaire industriel œuvrant dans l'industrie des trains d'atterrissage. Bien entendu, cette limitation au secteur de la conception, fabrication et assemblage de composants et de systèmes de train d'atterrissage a limité et encadré la portée de notre étude. Afin d'atténuer ce phénomène, nous avons tout de même procédé à une phase de validation dite « hors-contexte ». Les résultats de cette étape nous laissent supposer qu'une part des erreurs observées peut être due aux connaissances spécifiques du groupe d'experts industriels à l'industrie des trains d'atterrissage. Ce faisant et dans le but d'évaluer les performances et les points à améliorer du modèle, d'augmenter la validité externe de nos conclusions, d'augmenter la portabilité du modèle et de confronter celui-ci à des experts d'une industrie différente, il est désirable, voire nécessaire, de transposer le modèle dans une industrie fondamentalement différente de celle de la conception, fabrication et assemblage de train d'atterrissage. Tout de même, le ou les entreprises choisies pour réaliser cette confrontation doivent opérer un procédé d'usinage sur machine CNC. Comme point de départ, nous suggérons ces exemples d'industries : l'industrie de la fabrication de produits d'aérostructure, l'industrie de la fabrication de produits reliés à la propulsion aéronautique (ex : turbopropulseur) ou encore l'industrie de la fabrication de matrices d'étrirage. Ces secteurs sont, selon nous, de très bons candidats pour confronter le modèle d'estimation de la complexité et ses résultats à différentes réalités. Une évaluation dans d'autres industries permettrait donc de valider la portabilité du modèle. De plus, cette étape permettrait probablement de mettre en évidence des lacunes du modèle qui n'ont pas pu être mises en avant dans ce projet par la nature même de l'industrie dans laquelle il est réalisé.

Ensuite, lors de l'analyse de corrélation de la section 6.5, nous avons mis en évidence le faible coefficient de corrélation du composant candidat G_4 . Malgré son retrait du modèle d'estimation de la complexité, nous restons persuadés de l'impact de cette dimension sur la complexité d'un produit usiné. C'est pourquoi, une première approche pour améliorer sa structure réside dans le lien sémantique entre une annotation de type texte contenant la

référence à une spécification (ex : peinture) et l'élément géométrique sur laquelle la spécification est appliquée (ex : face(s) à peindre). En modifiant les habitudes de conception des entreprises (incluant celles de notre partenaire industriel) et en utilisant pleinement le potentiel des logiciels de conception assistée par ordinateur, nous serions en mesure d'augmenter la profondeur de notre analyse. À titre d'exemple, il serait possible de déterminer si une face ou un élément géométrique primaire d'un produit possède une superposition de traitements de surface (ex : anodisation puis peinture, *cadmium* puis peinture ou encore dépôt de nickel puis chrome). De plus, en ayant accès à la topologie associée sémantiquement à la spécification, il serait facile d'obtenir des données pertinentes telles que la superficie de la face associée et ainsi, d'inclure ces informations dans l'évaluation d'un composant candidat G_4 réformé. Malheureusement, bien que cet aspect ait été abordé lors du processus d'élicitation des connaissances du groupe d'experts, le manque de données ou l'indisponibilité de celles-ci doublé d'une contrainte de nature temporelle ont rendu impossible l'application de cette recommandation à notre projet.

Dans le même ordre d'idée, le modèle utilise de nombreuses informations provenant du modèle 3D enrichi. Par contre, il serait intéressant d'inclure dans le modèle un nouveau composant candidat basé sur l'interprétation des éléments géométriques primaire dans leur « contexte géométrique ». C'est-à-dire, est-ce que l'emplacement spatial d'un élément géométrique (ex : élément cylindrique) dans l'espace occupé par le produit à usiner affecte la complexité de celui-ci. Par exemple, est-ce que le fait qu'un petit perçage devant être fait au fond d'un cylindre profond représente une complexité (i.e. : contrainte du ratio diamètre-longueur et contrainte d'outillage en porte-à-faux)? Ce concept de « contexte géométrique » a été soulevé lors du processus d'élicitation du groupe d'expert. En revanche, la difficulté de convertir cette portion abstraite des connaissances du groupe d'experts en un énoncé mathématique nous contraint à délaissier cette avenue. Qui plus est, la difficulté de mettre en application cette recommandation réside dans le fait qu'il est ardu de « typer » les différents éléments géométriques dans un modèle 3D enrichie, ainsi que de les mettre en relation les uns avec les autres. Malgré tout, ceci reste un sujet d'étude en constante évolution. Le lecteur peut donc se référer à Backes et al. (2010), Cardone, Gupta et Karnik (2003), ou encore

Denis et al. (2008) comme point de départ dans ce champ de recherche. Nous présumons que l'ajout de cette dimension au modèle lui apporterait un niveau supplémentaire de précision. De plus, l'addition de cet aspect au modèle permettrait de répliquer avec d'avantage de précision le raisonnement d'un expert de ce domaine.

Par ailleurs, dans le même ordre d'idées que la recommandation précédente, il est possible d'extrapoler le concept de « contexte géométrique » afin d'inclure dans le modèle la notion d'accessibilité. En effet, en mettant en relation les éléments géométriques les uns avec les autres, et, en incluant, dans notre analyse, des données sur les machines-outils CNC disponibles chez le partenaire industriel, ainsi que sur les outils de coupe, il serait possible d'évaluer si certains éléments géométriques seront inaccessibles par les machines-outils CNC. Autrement dit, ce concept permettrait de répliquer le raisonnement d'un expert lorsque celui-ci tente de déterminer le nombre de montage qui seront nécessaires pour la fabrication du produit (gamme d'opérations). Un point de départ pour tout chercheur intéressé à s'aventurer dans cette direction serait de consulter les travaux de Chang (1990). Les recherches de celui-ci traitent, entre autre, de l'élaboration de systèmes experts dans un contexte d'interprétation géométrique des fichiers CAD dans le but de déterminer la gamme d'opérations nécessaires à sa fabrication. Nous croyons que l'intégration de cette recommandation à nos travaux permettrait d'augmenter la précision du modèle, et ainsi de fournir une information de qualité supérieure aux intervenants du processus.

D'autre part, la portion dite hors-contexte de la phase de validation empirique du modèle a permis de déceler une difficulté du modèle à correctement prédire la complexité d'un produit usiné lorsque des annotations « extrêmes » sont appliquées sur le produit. Dû à des contraintes temporelles, il nous a été impossible d'étudier d'avantage ce phénomène, mais il serait intéressant d'investiguer celui-ci dans le but d'augmenter la précision du modèle. Comme point de départ, nous suggérons d'étudier, de façon comparative, le comportement de l'équation (6.8) lorsqu'un produit possède des annotations « normales » et lorsqu'un produit possède des annotations « extrêmes ». Nous conjecturons que la « vitesse » à laquelle la valeur des équations (équation (7.1)) augmente n'est pas représentative de celle observée

chez le groupe d'experts industriels. L'ajout de poids ou de nouveaux paramètres pourraient donc améliorer la qualité du composant G_3 .

Ensuite, une partie de l'objectif de ce travail était de quantifier le lien causal entre le modèle développé et la capabilité d'un procédé. Dû à des contraintes de différentes natures, nous n'avons pas tiré de conclusion quant à ce lien. Malgré tout, des travaux dans ce domaine ont déjà été entrepris dans le but de déterminer si certains requis complexes d'un produit sont le reflet de la capabilité d'un procédé à les produire (ex : positionnement d'un pattern d'éléments cylindriques (Tahan et Levesque, 2009) ou encore le profil d'une surface (Lépine, 2014)). Dans ce projet de recherche, nous avons développé un modèle d'estimation de la complexité d'un produit dans son ensemble. Il est donc naturel de désirer savoir si les concepts de Tahan et Levesque (2009) et de Lépine (2014) pourraient être transposés dans notre contexte de recherche. En d'autres mots, serait-il possible, à partir des données historiques d'inspection d'une entreprise, d'établir une « capabilité agrégée » pour un produit - non pas pour seulement un requis de celui-ci - et d'évaluer si celle-ci est liée à l'indice de complexité produit par le modèle? Serait-il également possible d'inclure le concept d'« extensibilité »⁴? Autrement dit, serait-il possible de prédire le comportement du procédé en fonction du niveau de complexité d'un produit? Inversement, pour un niveau de capabilité du procédé désiré, pourrait-on obtenir le degré de complexité maximal du produit? Tel qu'énoncé plus haut, bien que notre équipe ait désiré poursuivre dans cette direction, nous avons malheureusement dû restreindre nos travaux et ne pas continuer dans cette direction.

Dans une optique d'« Industrie 4.0 », nous recommandons à notre partenaire industriel, Héroux-Devtek Inc., de poursuivre les travaux entrepris dans ce projet de recherche. Le modèle développé avec leur aide peut d'ores et déjà fournir une information de qualité permettant d'orienter le jugement des intervenants du processus. Toutes améliorations de leur part au modèle se traduiront potentiellement en une amélioration de l'efficacité de leur

⁴ De l'anglais *scalability*

processus. En ce moment, le modèle se concentre seulement sur les produits, il serait donc attrayant d'extrapoler celui-ci dans l'intention d'inclure les modèles 3D enrichies des assemblages. Héroux-Devtek Inc. est un assembleur de système de train d'atterrissage, cette avenue pourrait donc être une étape future et intéressante en vue de poursuivre les travaux entrepris dans ce projet. Nous leur suggérons également d'exporter la méthodologie et l'outil informatique développés au siège social de l'entreprise (situé à Longueuil, Québec) afin d'utiliser le modèle dès la phase de conception des produits.

De plus, une autre avenue de développement que nous jugeons intéressante pour le partenaire industriel serait d'inclure la notion de sous-traitance. En fait, dans le processus d'estimation des nouveaux contrats de fabrication, Héroux-Devtek Inc. doit prendre la décision de fabriquer le produit à l'interne, ou de sous-traiter celui-ci à un fournisseur (*Make-Or-Buy Decision*). Ce processus nécessite évidemment un délai de réflexion et d'analyse de la part de plusieurs intervenants du processus. Nous croyons qu'il serait pertinent de développer et d'inclure des règles de décision reflétant le processus décisionnel de leurs experts. Ces règles pourraient prendre en compte des informations telles que la géométrie du produit à fabriquer ou encore son niveau de complexité. L'ajout de ce concept permettrait d'aider les intervenants du processus à prendre une décision éclairée et rapide sur la question de la sous-traitance. Le point de départ pour notre partenaire industriel serait de procéder à un processus d'élicitation des connaissances, semblable à celui effectué dans ce projet, avec le groupe d'experts responsables du processus d'estimation des nouveaux contrats. Néanmoins, bien que nous voulions inclure ce concept dans l'outil informatique développé, des contraintes de natures temporelles et logistiques nous ont empêchées de mettre en œuvre cette recommandation.

En dernier lieu, bien que le modèle démontre une précision adéquate, de nombreuses questions restent sans réponse : comment le modèle se comporte-t-il réellement dans une industrie différente? Comment mieux intégrer les connaissances des experts? Les fondements du modèle sont-ils portables dans un procédé différent de l'usinage (tel que la fabrication additive)? L'indice de complexité d'un produit est-il fortement lié avec la capacité du

procédé à le fabriquer? Etc. Nous espérons que les opportunités d'amélioration et les avenues de recherche présentées à cette section seront adressées par d'autres chercheurs et que ceux-ci seront en mesure d'apposer leurs briques sur les fondations que nous avons érigées. Après tout, une recherche n'est-elle jamais terminée...?

ANNEXE I

MÉTHODES D'ÉVALUATION DES ANNOTATIONS EXCLUES

Lors de ce projet de recherche, plusieurs méthodes d'évaluation objectives des annotations ont été développées, testées et, finalement, exclues. Cette annexe présente deux méthodes ayant aboutis à des résultats et les raisons ayant poussées notre équipe à exclure ces méthodes de la méthodologie développée. La présente annexe est à titre informative pour quiconque décide de poursuivre les travaux entrepris dans ce projet.

Méthode basée sur des règles de décision

Le principe central de cette méthode consiste à faire la somme de la valeur x_i de toutes les règles i reliées aux annotations déclenchées lors de leur analyse par rapport aux annotations extraites du modèle 3D enrichi. Cette méthode prend en compte seulement l'intervalle permis par rapport à une valeur nominal (ex : 0.500 in \pm 0.010 in)

Rappelons-nous que chaque règle a été définie sous la forme « *IF* [condition] *THEN* [résultat] » (section 5.2.1). Par conséquent, lorsque l'algorithme d'analyse (*Inference engine*) rencontre une annotation de même type qu'une règle préalablement définie, il vérifie si l'annotation remplit la condition. S'il s'avère que l'annotation remplit la condition, l'algorithme ajoute le résultat (x_i) (section « *THEN* » de la règle) au total de G_3 selon l'équation (I.1):

$$G_3 = \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{I.1})$$

Où i représente une règle et n le nombre total de règles déclenchées reliées aux annotations contenues dans la base de données.

Nous avons abandonné cette méthode pour deux raisons : premièrement, les résultats de l'analyse de corrélation linéaire n'étaient pas suffisamment élevés pour justifier son utilisation dans le modèle d'estimation de la complexité. Deuxièmement, cette méthode étant basée seulement sur l'interprétation de l'intervalle de tolérance, elle ne prenait pas en compte l'aspect géométrique auquel chaque annotation est sémantiquement reliée. Conséquemment, une information d'une grande importance était délaissée.

Méthode basée sur le calcul de l'aire sous la courbe

Une autre méthode visant l'interprétation objective des annotations d'un modèle 3D enrichi a été développée. Cette méthode est basée sur la valeur de l'aire sous une courbe. La méthodologie employée pour cette méthode est basée sur celle utilisée à la section 6.3. En d'autres mots, un résultat est calculé pour chaque annotation extraite du modèle 3D enrichi d'un produit. Ensuite, une courbe empirique de la fonction de distribution est générée grâce au logiciel statistique. Finalement, la valeur de l'aire sous la courbe est obtenue en appliquant la Méthode des Trapèze (calcul numérique d'une intégrale). Les figures suivantes présentes des exemples de courbes obtenues grâce à cette méthode :

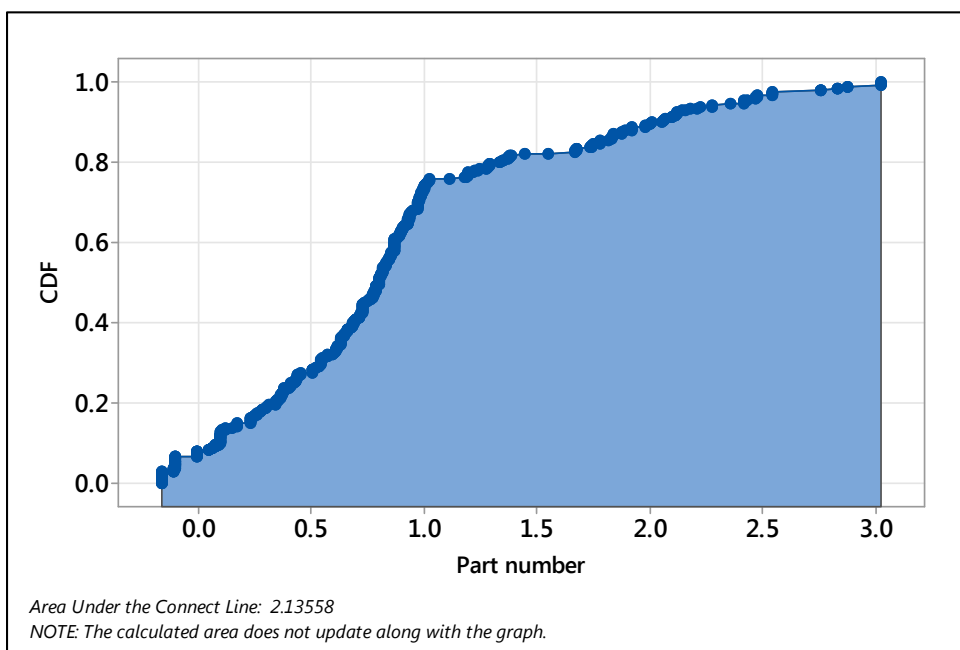


Figure-A I-1 Exemple 1 de la méthode basée sur l'aire sous la courbe

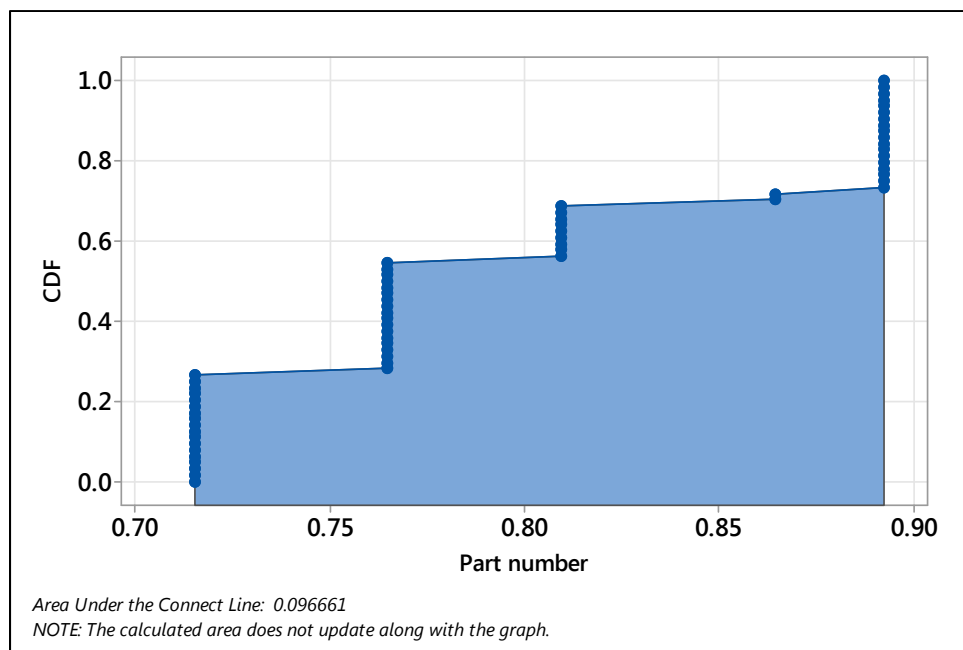


Figure-A I-2 Exemple 2 de la méthode basée sur l'aire sous la courbe

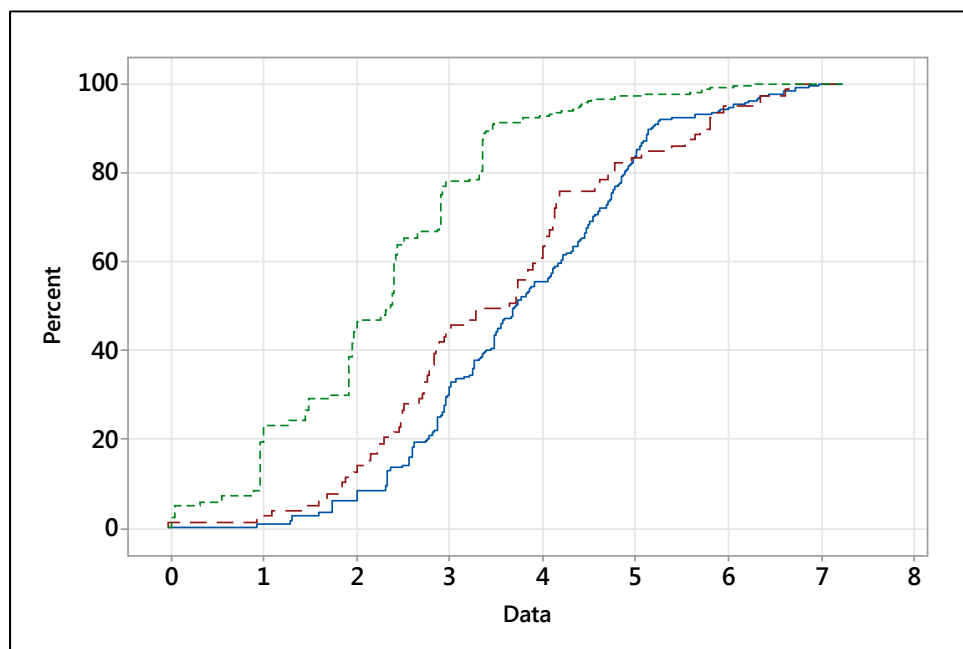


Figure-A I-3 Exemple de courbes cumulatives pour trois produits différents

Bien que cette méthode prenne en compte le lien sémantique entre une annotation et son contexte géométrique, elle a dû être abandonnée à cause de son faible coefficient de corrélation de Pearson et de l'inconsistance de ses résultats.

ANNEXE II

PROPOSITION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ GÉOMÉTRIQUE D'UN PRODUIT USINÉ BASÉ SUR LA MAQUETTE 3D

11e Conférence Francophone d'Optimisation et Simulation- MOSIM'16
Du 22 au 24 août 2016
Montréal, Québec, Canada

« L'innovation technologique au service des systèmes : défis et opportunités »

PROPOSITION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ GÉOMÉTRIQUE D'UN PRODUIT USINÉ BASÉ SUR LA MAQUETTE 3D

Antoine Proteau, S.-Antoine Tahan, Roland Maranzana

École de technologie supérieure, Montréal, Canada
antoine.proteau.1@ens.etsmtl.ca,
antoine.tahan@etsmtl.ca, roland.maranzana@etsmtl.ca

Pascal Lavoie

Héroux-Devtek Inc., Laval, Canada
plavoie@herouxdevtek.com

RÉSUMÉ : De nos jours, un procédé d'usinage reste l'une des techniques les plus employées par l'industrie manufacturière pour fabriquer des produits complexes et de haute-précision. Plusieurs travaux de recherche ont démontré qu'une mauvaise évaluation de la complexité d'un produit aura des conséquences néfastes durant le processus de fabrication. En effet, un modèle d'estimation qui permet d'identifier les produits à forte complexité et d'établir un lien causal avec la capacité du procédé à maintenir un requis est précieux pour une entreprise dans un contexte de conception pour fabrication. Dans cet article, nous proposons un modèle d'estimation de la complexité basé entièrement sur les informations volumétriques et topologiques contenues dans la maquette 3D. Notre proposition est un modèle prédictif fondé sur deux métriques : le volume à usiner et le nombre d'éléments géométriques à usiner. Notre étude se base sur l'analyse de 54 différents produits choisis à partir des documents techniques de notre partenaire industriel. Les résultats démontrent que le modèle est fortement lié à la complexité tel qu'évaluée par un groupe d'experts. La validation empirique du modèle démontre qu'il est possible de prédire la valeur de la complexité d'un produit avec une erreur ne dépassant pas 10%. Le modèle proposé offre aux équipes d'ingénieurs un outil qui permet d'identifier les produits à forte complexité dès la phase de conception dans le but de les assister dans leurs démarches de conception ou encore dans les opérations de planification des gammes de fabrication.

MOTS-CLÉS : Complexité des produits, élicitation des experts, conception pour fabrication, capacité des procédés, analyse de maquettes 3D, conception assistée par ordinateur

1 INTRODUCTION

Pour se démarquer de la compétition sans cesse grandissante, les entreprises manufacturières doivent fabriquer des produits conformes à des exigences sévères tout en respectant des contraintes de productivité (délais plus courts). Il est connu et étudié que la complexité est fortement liée aux performances d'un procédé de fabrication à respecter des exigences (spécifications) préétablies : pour un procédé donné, la capacité à respecter, sur une base probabiliste, une exigence, est fonction du produit comme tel. À titre d'exemple, un procédé d'usinage numérique (CNC) sera « capable » de rencontrer une spécification donnée (tolérance) sur une pièce à géométrie simple (ex. cylindre) et peut échouer à respecter la même exigence si elle est appliquée sur une surface complexe (*free form*). Aujourd'hui, il n'existe pas de méthode homologuée ou un standard qui permet, pour un procédé donné, une « mise à l'échelle » entre complexité et capacité. De tels outils seront fort utiles en amont du processus de fabrication pour permettre une conception rapide et juste en fonction de la méthode de fabrication (*Design for Manufacturing*). En effet, l'exercice de synthèse des tolérances (distribution des tolérances) est généralement réservé aux concepteurs/experts d'une entreprise. Une identification qualitative (ex. facile, difficile, etc.) basée sur l'expérience d'un expert peut cacher des

incertitudes souvent critiques (Morgan, 2014). C'est précisément la motivation du présent travail de recherche.

La capacité d'un procédé est un terme qui désigne l'attitude d'un procédé à maintenir, sur une base probabiliste, une spécification (ex : dimensionnelle, géométrique, etc.). Aussi, cette capacité est fortement liée au niveau de complexité. Dès lors, tous risques omis d'être identifiés en amont ou une mauvaise évaluation de la complexité du produit se traduit par des complications dans le processus de fabrication. Ces complications auront de facto des conséquences sur les coûts de fabrication et sur le niveau de compétitivité de l'entreprise.

Si le terme capacité est encadré par des normes reconnues (ex : ISO 22514-6:2013, *Statistical methods in process management - Capability and performance - Part 6*), le terme complexité, en revanche, ne possède pas une définition unique et son interprétation dépend de son contexte (ElMaraghy et al., 2012; Jacobs, 2013; Orfi, Terpeny et Sahin-Sariisik, 2011; Rodriguez-Toro et al., 2003; Samy et ElMaraghy, 2010). De façon générale, on admet que le terme « complexe » désigne quelque chose « qui se compose d'éléments différents, dont la combinaison est difficile à comprendre » (Larousse, 2015). De manière plus précise, Colwell (2005) définit la complexité en gestion de projet comme étant la quantité d'incertitude injectée dans le projet. Orfi, Terpeny et

Sahin-Sariisik (2011) croient que la complexité est fonction de cinq éléments : la variété, la complexité fonctionnelle, la complexité structurelle, la complexité du design et la complexité de la production. Aussi, Jacobs (2013) explique que la complexité est un état défini par la multiplicité, la diversité et l'interrelation des éléments fonctionnels où un élément peut être un composant, une fonction ou encore une variation dans un produit. En d'autres mots, la littérature n'a pas encore atteint un consensus quant à une définition précise et acceptée du concept de la complexité.

D'un autre côté, les chercheurs tendent à s'accorder sur les conséquences d'une mauvaise gestion de la complexité. En fait, une gestion incorrecte cause une augmentation dans les coûts d'un produit, une diminution dans la qualité (Ameri et al., 2008; Jenab et Liu, 2010; Samy et ElMaraghy, 2010; Zhuo et Qunhui, 2007), ainsi que des effets négatifs sur la productivité (Joshi et Ravi, 2010). Orfi, Terpeny et Sahin-Sariisik (2011) croient qu'une mauvaise gestion de la complexité génère des inefficacités dans le processus de fabrication, et donc, augmente les travaux en cours et les besoins en contrôle de la qualité.

Dans le but de quantifier la complexité d'un produit ou d'un assemblage, plusieurs méthodes ont été élaborées. Qamar, Arif et Sheikh (2004) ont développé une méthode pour quantifier la complexité dans l'industrie de l'extrusion. Leurs travaux concluent que la complexité C est obtenue à partir de l'équation (1).

$$C = \alpha + \beta \left(\frac{P_0}{P_s}\right)^\gamma \quad (1)$$

Où P_s représente le périmètre d'une section du profile, P_0 le périmètre d'une section circulaire équivalente. Les paramètres α , β et γ sont obtenus par une régression.

Joshi et Ravi (2010) ont développé une métrique pour mesurer la complexité dans l'industrie des produits forgés/moulés. Les auteurs proposent que le coût de fabrication est fortement lié à la complexité CF qui est fonction de six paramètres : le ratio du volume de la pièce C_{vol} , le ratio de l'aire C_{ar} , le nombre de cavités C_{NC} , le ratio du volume des cavités C_{CR} , le ratio des épaisseurs C_{TS} et finalement, le ratio C_{DR} du retrait. Pour obtenir une estimation de la complexité, les paramètres sont linéairement combinés grâce à l'équation (2).

$$CF_{estimee} = \omega_1 C_{vol} + \omega_2 C_{ar} + \omega_3 C_{NC} + \omega_4 C_{CR} + \omega_5 C_{TS} + \omega_6 C_{DR} \quad (2)$$

D'autres méthodes basées sur l'entropie d'un produit ont aussi été développées. Samy et ElMaraghy (2010) croient que la complexité augmente linéairement en fonction de la quantité d'information incluse dans un

assemblage. Ils évaluent la complexité d'un produit ($C_{Produit}$) avec l'équation (3).

$$C_{Produit} = [n_p] + \alpha_{Produit} [\log_2(N_p + 1)] + [n_f] [\log_2(N_f + 1)] \quad (3)$$

Où N_p et N_f représentent respectivement le nombre total de composants et de fixations, n_p et n_f représentent le nombre de composants et de fixations uniques et $\alpha_{Produit}$ est l'index de complexité de l'assemblage.

En résumé, la revue de la littérature nous permet d'avancer que les conséquences d'une mauvaise gestion de la complexité sont concrètes. De ce fait, un processus efficace de gestion de la complexité d'un produit débute par l'identification du produit à l'aide d'un modèle d'estimation de la complexité. Bien que des méthodes aient été développées, le procédé d'usinage par machine CNC semble avoir été mis de côté. Par conséquent, un modèle d'estimation permettant de créer un lien causal entre la complexité et la capacité d'un procédé à maintenir les spécifications prédéfinies est désiré. Dès lors, dans le contexte spécifique de l'usinage par machine CNC, cet article va démontrer la validité d'un nouveau modèle d'estimation dont les intrants seront seulement les informations contenues dans un fichier CAO. Ainsi, il sera possible pour une entreprise d'évaluer la complexité d'un produit dès la phase de conception. Ceci leur permettra de réduire les risques de complications durant le processus de fabrication.

Nos travaux sont réalisés en partenariat avec l'industriel Héroux-Devtek Inc. division Laval (Laval, Québec) qui est une entreprise manufacturière spécialisée dans l'usinage de haute-précision de matériaux (ex : acier outil, titane, etc.) pour la fabrication de composants de train d'atterrissage. Dans son ensemble, le groupe Héroux-Devtek Inc. conçoit, fabrique, assemble et répare des composants de train d'atterrissage. La division de Laval nous a fourni un environnement de recherche idéal et suffisamment de données pour élaborer et valider le modèle d'estimation de la complexité.

Cet article est structuré de la façon suivante : après l'introduction, la section 2 présente nos hypothèses de recherche, la section 3 présente les données utilisées dans l'élaboration du modèle. La section 4 présente la structure du modèle, ainsi que les résultats d'analyses. La section 5 présente le modèle d'estimation et les étapes de validation. Finalement, la section 6 présente une discussion et des recommandations pour de futurs travaux.

2 HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Dans le cadre de nos travaux, les hypothèses de travail considérées sont les suivantes :

- Seules les informations contenues dans le fichier CAO sont utilisées comme intrant du modèle;

- Nous nous limitons à la famille de produit du partenaire industriel;
- Nous considérons les fichiers CAO comme parfaitement fidèle à la définition nominale du produit;
- Tout traitement statistique sera effectué en s'appuyant sur des normes à portée internationale.

3 DONNÉES COLLECTÉES POUR L'ÉLABORATION DU MODÈLE

Dans le but de développer un modèle d'estimation, trois catégories de données sont nécessaires ; deux sont considérées comme des intrants et la dernière est considérée comme l'extrant. La première catégorie représente celle des produits fabriqués à l'usine de Laval. La seconde catégorie présente un indice de matériau reflétant l'usinabilité de celui-ci. L'extrant décrit le résultat d'un processus d'élicitation des connaissances d'un groupe d'experts industriels en ce qui concerne la complexité de plusieurs produits typiques et représentatifs. Ce groupe est composé de trois agents de méthodes séniors, ainsi que du directeur de l'ingénierie manufacturière.

3.1 Catégorie des produits

Dans notre contexte, chaque catégorie de produit représente un certain nombre de produits groupés selon leur degré de similarité en termes de complexité géométrique et de difficulté de fabrication. Suite à une phase d'observation *in situ*, des produits sont sélectionnés dans le but de couvrir tous les critères de similarité sur l'étendue complète des gammes de produits usinés par le partenaire. Cette sélection est approuvée par le groupe d'experts. La Figure 1 fournit un résumé des données collectées.



Figure 1 Sommaire des données collectées

3.2 Indices liés au matériau

La seconde catégorie de données représente un indice reflétant deux phénomènes liés au matériau (ex : titane Ti-6AL-4V) : ① l'usinabilité et, ② le comportement dimensionnel causé par le niveau des contraintes résiduelles du produit.

3.2.1 Indice d'usinabilité

Le concept d'usinabilité tient son origine des travaux de l'*American Iron and Steel Institute* (AISI). Dans leurs travaux, ils considèrent l'usinabilité d'un matériau comme la facilité avec laquelle un matériau peut être travaillé avec un outil de coupe. Par définition, le matériau standard (l'acier B1112 à 160 Brinell) possède une machinabilité de 100% (Schneider Jr, 2002). Un matériau avec une valeur supérieure à 100% est plus facile à usiner que l'acier B1112 et vice-versa. Le Tableau 1 présente les valeurs de l'usinabilité (M) pour la majorité

des matériaux utilisés. Ces données sont obtenues directement des fabricants de matériaux ou estimées par le groupe d'experts.

Grade	M	Grade	M
AL 2024	150%	4130	72%
AL 6061	190%	4140	66%
AL 7049	120%	4340	57%
AL 7050	120%	300M	57%
AL 7075	120%	9310	40%
AL 7085	120%	135	45%
AL 7175	120%	AesMet 100	45%
AL A356	140%	Custom 465	25%
303	75%	440C	39%
304	40%	Ti-6AL-4V	22%
PH13-8Mo	40%	Ti-10V-2FE-3L	15%
15-5PH	45%	Ti-5AL-5V-3MO-3CR	8%
17-4PH	45%	Bronze C630	30%

Tableau 1 Valeurs de l'usinabilité

Les données du Tableau 1 sont séparées en classe avec l'équation (4).

$$W_M = \frac{1}{n} (Max_M - Min_M) \quad (4)$$

Où W_M représente la largeur d'une classe, Max_M représente la valeur maximale de l'usinabilité M , Min_M représente la valeur minimale et n le nombre de classe désirée. Dans notre contexte, nous utilisons $n = 10$. Ensuite, une valeur entière (I_M) allant de 1 (indice élevé) à 10 (indice faible) est assignée à chaque classe. Le Tableau 2 présente le résultat de cette opération de classification.

Class [% , 0%]	I_M	Class [% , 0%]	I_M
[8% , 26%]	10	[99% , 117%]	5
[26% , 44%]	9	[117% , 135%]	4
[44% , 63%]	8	[135% , 154%]	3
[63% , 81%]	7	[154% , 172%]	2
[81% , 99%]	6	[172% , 180%]	1

Tableau 2 Indice d'usinabilité par classe

3.2.2 Indice de contraintes résiduelles

Parce que l'indice d'usinabilité ne peut pas expliquer l'entière du phénomène se produisant lorsqu'un matériau est travaillé à l'aide d'un outil de coupe, le concept de contraintes résiduelles est introduit. Cet indice représente la capacité d'un matériau à ne pas se déformer lorsque des contraintes résiduelles sont libérées par le passage d'un outil de coupe. Les données sont établies par le groupe d'experts et les valeurs (S) vont de 0% à 100%. 0% représente une forte déformation alors que 100% représente une faible déformation. Le Tableau 3 présente les valeurs des contraintes résiduelles.

Grade	Format	S	Grade	Format	S
AL 2024	Plate	100%	4130	Plate	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	Forging	80%		Forging	90%
AL 6061	Plate	100%	4140	Plate	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	100%
	Forging	80%		Forging	90%
AL 7049	Plate	100%	4340	Plate	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	Forging	70%		Forging	90%
AL 7050	Plate	100%	300M	Plate	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	Forging	70%		Forging	90%
AL 7075	Plate	100%	9310	Plate	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	Forging	70%		Forging	90%
AL 7085	Plate	100%	135	Plate	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	Forging	70%		Forging	95%
AL 7175	Plate	50%	AerMet 100	Plate	100%
	Extrusion	40%		Extrusion	100%
	Forging	30%		Forging	90%
AL A356	Plate	100%	Custom 465	Plate	100%
	Extrusion	95%		Extrusion	100%
	Forging	70%		Forging	90%
303	Plate	100%	440C	Plate	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	100%
	Forging	95%		Forging	95%
304	Plate	100%	Ti-6AL-4V	Plate	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	95%
	Forging	95%		Forging	90%
PH13-8Mo	Plate	100%	Ti-10V-2FE-3L	Plate	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	95%
	Forging	95%		Forging	90%
15-5PH	Plate	100%	Ti-5AL-5V-5MO-3CR	Plate	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	95%
	Forging	95%		Forging	90%
17-4PH	Plate	100%	Bronze C630	Plate	100%
	Extrusion	100%		Extrusion	95%
	Forging	95%		Forging	70%

Tableau 3 Valeurs de l'indice S

Les données du Tableau 3 sont séparées en classe avec l'équation (5).

$$W_s = \frac{1}{n} (Max_s - Min_s) \quad (5)$$

Où Max_s représente la valeur maximale des contraintes résiduelles (S), Min_s représente la valeur minimale et n le nombre de classes désirées. Une fois de plus, nous avons utilisé $n = 10$. Ensuite, une valeur entière (I_s) allant de 1 (indice élevé) à 10 (indice faible) est assignée à chaque classe. Le Tableau 4 présente les résultats de cette opération de classification.

Class [%]	I_s	Class [%]	I_s
[30%, 37%]	10	[65%, 72%]	5
[37%, 44%]	9	[72%, 79%]	4
[44%, 51%]	8	[79%, 86%]	3
[51%, 58%]	7	[86%, 93%]	2
[58%, 65%]	6	[93%, 100%]	1

Tableau 4 Indice I_s par classe

3.3 Résultats du processus d'élicitation des experts

Pour obtenir une estimation de la complexité des produits sélectionnés, un processus d'élicitation a été entrepris avec le groupe d'experts industriels. Ce processus a été conduit à l'aide d'une figure de référence (Figure 2).

Complexity factor	Qualifier	Material	Example
0	None		
1	Very low	Ti-6AL-4V	
2			
3	Low	15-5PH	
4			
5			
6	High	Ti-6AL-4V	
7			
8	Very high	300M	
9			
10	Extremely high	300M Forging	

Figure 2 Figure de référence

Au total, 54 produits sont soumis aux experts pour évaluation. Leur travail consiste à évaluer la complexité en assignant une valeur allant de 0 (aucune complexité) à 10 (complexité extrêmement élevée). Le Tableau 5 présente l'estimation de la complexité (C_x) obtenue en faisant la moyenne simple des évaluations des quatre experts.

Part	1	2	3	4	C_x	Part	1	2	3	4	C_x
1	0.0	0.3	0.0	1.0	0.3	28	4.0	5.0	5.0	5.0	4.8
2	0.5	0.0	0.0	1.0	0.4	29	2.5	3.0	3.5	6.0	5.0
3	1.0	0.7	0.0	1.0	0.7	30	4.5	5.5	5.0	6.0	5.3
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	31	5.0	5.3	6.0	5.0	5.3
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	32	6.0	6.0	5.5	5.0	5.6
6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	33	6.5	5.5	5.5	5.0	5.6
7	2.0	1.2	0.5	1.0	1.2	34	5.7	6.0	6.0	5.0	5.7
8	1.5	1.3	0.5	2.0	1.3	35	5.0	6.5	6.0	6.0	5.9
9	2.0	1.5	0.5	2.0	1.5	36	5.5	5.5	6.5	6.0	5.9
10	1.5	1.5	1.0	2.0	1.5	37	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
11	2.0	1.7	1.0	2.0	1.7	38	7.5	6.0	6.0	6.0	6.4
12	2.0	1.7	1.0	2.0	1.7	39	6.0	7.0	6.5	7.0	6.6
13	2.0	1.8	1.5	2.0	1.8	40	6.0	7.0	7.0	7.0	6.8
14	2.0	2.2	1.5	3.0	2.2	41	7.0	7.0	7.0	6.0	6.8
15	2.0	2.0	3.0	2.0	2.3	42	7.0	8.0	7.5	7.0	7.4
16	3.5	2.5	2.0	2.0	2.5	43	8.0	8.0	8.5	7.0	7.9
17	3.0	2.7	2.0	3.0	2.7	44	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
18	2.5	3.0	3.0	3.0	2.9	45	8.7	9.0	8.0	9.0	8.7
19	3.5	2.5	2.5	3.0	2.9	46	8.7	9.0	8.0	9.0	8.7
20	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	47	8.5	9.0	9.0	8.5	8.8
21	3.5	3.0	3.5	4.0	3.5	48	9.0	9.3	10.0	9.0	9.3
22	3.5	4.0	4.0	4.0	3.9	49	9.0	9.3	10.0	9.0	9.3
23	4.0	5.0	4.5	4.0	4.4	50	10.0	9.7	10.0	9.0	9.7
24	4.5	4.5	5.0	4.0	4.5	51	9.5	9.8	10.0	10.0	9.8
25	4.5	4.0	5.5	4.0	4.5	52	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
26	4.0	4.5	4.5	5.0	4.5	53	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
27	4.5	4.5	4.0	5.0	4.5	54	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

Tableau 5 Résultats du processus d'élicitation par expert

Par la suite, une étude Gage R&R est effectuée pour s'assurer que le niveau de reproductibilité entre les experts est acceptable et statistiquement adéquat. À l'aide

du logiciel statistique Minitab®, nous obtenons une erreur de reproductibilité d'une valeur de 7.34% par rapport à l'étendue des valeurs de C_p .

Statistiquement, pour qu'un système de mesure soit jugé adéquat, l'erreur doit être inférieure ou égale à 10%. Conséquemment, nous pouvons conclure que notre système de mesure (processus d'élicitation) est acceptable.

Finalement, à partir des 54 produits évalués, 11 sont sélectionnés aléatoirement (1-5-14-19-22-29-36-41-44-47-54) en vue d'être utilisés à l'étape de validation. Les 43 autres produits sont utilisés dans la construction du modèle d'estimation. La Figure 3 présente une distribution de chaque produit en fonction de son évaluation.

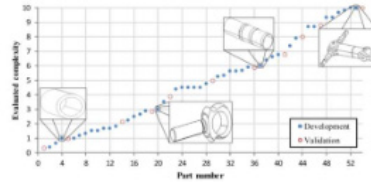


Figure 3 Distribution des résultats du processus d'élicitation

4 LA MODÉLISATION

Cette section présente chaque composant (G_i) du modèle d'estimation de la complexité, ainsi que leur coefficient de corrélation de Pearson à l'évaluation de la complexité (C_p). La présente proposition est constituée de deux composants : G_1 qui est le volume de matériau usiné en fonction du matériau brut, et G_2 qui est le ratio de l'aire d'une sphère de même volume et l'aire du produit.

4.1 Le volume usiné en fonction du matériau

Ce premier composant représente le volume qui doit être usiné d'un matériau brut pour obtenir le produit final, pondéré en fonction du type de matériau utilisé pour sa fabrication. La Figure 4 présente sa construction.

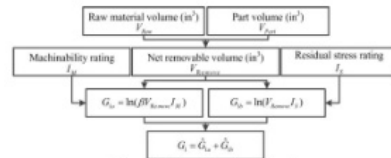


Figure 4 Construction de G_1

La première partie représente le volume net à usiner (V_{remov}). Il est obtenu en faisant la différence entre le volume du matériau brut (V_{rm}) et le volume du produit

(V_{part}). L'équation (6) nous donne le volume net à usiner.

$$V_{remov} = V_{rm} - V_{part} \tag{6}$$

La seconde partie représente la pondération du matériau en fonction de l'indice d'usinabilité et de l'indice des contraintes résiduelles (voir Tableau 2 et Tableau 4).

En termes de procédé, l'usinage d'un produit consiste, fondamentalement, en deux étapes : l'ébauche et la finition. Nous conjecturons que ces deux étapes n'ont pas le même impact sur la complexité d'un produit. En fait, nous supposons que la majorité de la complexité reliée à l'indice d'usinabilité se trouve à l'étape de finition et non pas à l'étape d'ébauche. De façon à refléter ce concept, la valeur du volume net à usiner en fonction de l'indice d'usinabilité (G_{1s}) est calculé selon deux angles grâce à l'équation (7).

$$G_{1s} = \ln(\beta V_{remov} I_m) \tag{7}$$

$$\beta = \begin{cases} 0.90 & \text{if } \frac{V_{remov}}{V_{rm}} < 0.8 \\ 0.15 & \text{if } \frac{V_{remov}}{V_{rm}} \geq 0.8 \end{cases}$$

D'un côté, l'équation (7) nous montre que si la majorité du matériau est usiné, plus de travail est dédié à l'ébauche, et donc que G_{1s} devrait voir sa valeur diminuer. D'un autre côté, si peu de matériau est usiné ou si un *forging* est utilisé, moins d'ébauche sera nécessaire. Par conséquent, la valeur de G_{1s} est minimalement réduite. La Figure 5 présente un exemple visuel de ce concept.

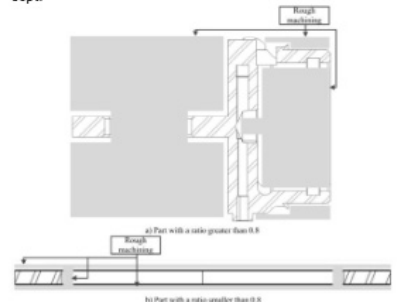


Figure 5 Exemple dans la différence d'usinage requis pour deux produits

Cette logique n'est pas appliquée au volume net à usiner en fonction de l'indice de contraintes résiduelles (G_{1r}). Nous croyons que les contraintes résiduelles sont continuellement libérées durant le procédé d'usinage (i.e. durant l'étape d'ébauche et de finition), et donc, sa valeur ne doit pas être modifiée. Ce faisant, G_{1r} est obtenu avec l'équation (8).

$$G_{1s} = \ln(V_{\text{équiv}} I_2) \quad (8)$$

Ensuite, G_{1s} et G_{1v} sont standardisé en assignant une valeur allant de 1 (plus petite valeur) à 10 (plus grande valeur). Finalement, le volume net à usiner en fonction du matériau utilisé (G_1) est obtenu en faisant la somme des valeurs standardisées avec l'équation (9).

$$G_1 = \hat{G}_{1s} + \hat{G}_{1v} \quad (9)$$

4.2 Le ratio de l'aire d'une sphère de volume équivalente et de l'aire du produit

Inspiré par les travaux de Joshi et Ravi (2010), le second composant représente le ratio (R) entre l'aire (A) d'une sphère ($A_{\text{sphère}}$) de volume équivalent au produit (V_{part}) et l'aire du produit (A_{part}) multiplié par le logarithme naturel du nombre de faces usinées du produit (F_{part}). Puisque l'aire tend à augmenter avec l'ajout d'élément géométrique primaire (cylindre, poche, rainure, etc.), ce facteur nous fournit l'information à propos de l'ordre de grandeur de la présence des éléments géométriques primaires. La Figure 6 présente la construction de G_2 .

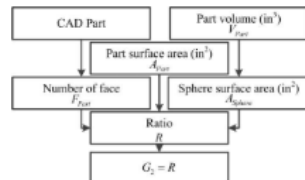


Figure 6 Construction de G_2

Les informations volumétriques sont obtenues directement à partir du logiciel de conception assistée par ordinateur. Ensuite, pour obtenir le nombre de faces usinées du produit (F_{part}), nous utilisons la fonction recherche du logiciel de conception. Par conséquent, le nombre de faces est obtenu en comptant les résultats de la fonction recherche du logiciel de conception.

L'aire de la sphère est obtenue à partir de l'équation (10).

$$A_{\text{sphère}} = \sqrt[3]{4\pi} (3V_{\text{part}})^{2/3} \quad (10)$$

Finalement, G_2 est obtenu en faisant le ratio R selon l'équation (11).

$$G_2 = R = \left(1 - \frac{A_{\text{sphère}}}{A_{\text{part}}}\right) \ln(F_{\text{part}}) \quad (11)$$

4.3 Analyse de corrélation

Afin d'investiguer si les deux composants du modèle d'estimation de la complexité ont une influence significative sur la complexité évaluée, une analyse de corrélation linéaire dite de Pearson est effectuée à l'aide du logiciel Minitab®. Le Tableau 6 présente les informations volumétriques et topologiques des produits, le Tableau 7 présente les résultats des équations (6) à (11) et finalement, le Tableau 8 présente les valeurs standardisées pour G_1 et G_2 .

Part	V_{part} [in³]	$V_{\text{sphère}}$ [in³]	$V_{\text{équiv}}$ [in³]	A_{part} [in²]	$A_{\text{sphère}}$ [in²]	F_{part} [-]
2	0.31	1.13	0.82	6.49	2.21	16
3	0.04	0.92	0.88	1.16	0.53	6
4	119.49	202.80	83.31	551.87	117.32	11
6	2.46	18.85	16.39	23.42	8.81	139
7	0.98	24.54	23.56	13.12	4.77	6
8	0.38	5.94	5.56	6.90	2.52	71
9	0.21	2.15	1.94	5.08	1.70	17
10	5.45	9.55	4.10	47.43	14.97	132
11	2.11	10.83	8.72	20.52	7.94	52
12	7.06	106.91	99.85	50.74	17.80	86
13	1.05	9.19	8.14	11.01	5.00	35
15	2.60	14.73	12.13	26.28	9.14	78
16	0.69	6.62	5.93	10.00	3.78	52
17	0.07	1.33	1.26	2.11	0.81	58
18	1.92	19.88	17.96	17.76	7.46	74
20	4.24	40.64	36.40	24.51	12.68	82
21	3.26	24.54	21.28	22.21	10.64	31
23	103.84	721.00	617.16	513.66	106.84	213
24	126.12	692.70	566.58	695.86	121.62	79
25	8.66	41.63	32.97	97.91	20.39	121
26	10.73	95.43	84.70	140.28	23.52	139
27	9.99	58.91	48.92	87.24	22.43	56
28	33.82	238.16	204.54	206.92	50.58	190
30	30.57	508.94	478.37	382.99	47.28	94
31	0.94	4.12	3.19	15.67	4.63	62
32	28.50	199.10	170.60	383.83	45.12	40
33	28.01	203.25	175.24	389.87	44.60	88
34	22.32	156.00	133.68	120.34	38.34	159
35	27.28	433.59	406.31	308.51	43.82	352
37	24.01	221.43	197.42	468.54	40.25	26
38	24.70	225.62	200.91	476.55	41.02	37
39	33.25	508.94	475.69	453.66	50.00	81
40	40.78	349.90	309.12	416.95	57.29	203
42	216.73	776.02	559.29	1984.94	174.49	303
43	223.75	682.16	458.41	1854.56	178.23	166
45	88.20	478.44	390.23	457.64	95.82	422
46	96.51	478.44	381.93	488.85	101.75	494
48	238.64	1327.57	1088.93	1260.15	186.06	2058
49	558.81	2930.24	2371.42	1806.48	328.09	931
50	79.09	548.68	469.58	783.44	89.11	420
51	358.88	1485.73	1126.85	1474.99	244.22	1211
52	52.63	828.35	775.72	459.22	67.92	383
53	154.20	1056.45	902.26	1062.35	139.06	430

Tableau 6 Information volumétrique et topologique

Part	I_M	I_S	G_{1a}	G_{1b}	G_{1c}	G_{1d}	G_1	G_2
2	9	1	1.89	-0.20	2.74	1.00	3.74	1.83
3	9	1	0.18	-0.12	1.00	1.08	2.08	0.98
4	10	1	6.62	4.42	7.53	5.34	12.88	1.89
6	4	1	2.29	2.80	3.14	3.82	6.96	3.08
7	4	1	2.65	3.16	3.51	4.16	7.66	1.14
8	8	1	1.90	1.72	2.75	2.80	5.55	2.71
9	8	1	0.84	0.66	1.68	1.81	3.49	1.89
10	4	1	2.69	1.41	3.55	2.52	6.07	3.34
11	4	1	1.66	2.17	2.50	3.22	5.72	2.42
12	4	1	4.09	4.60	4.97	5.51	10.49	2.89
13	4	1	1.59	2.10	2.43	3.16	5.59	1.94
15	4	1	1.98	2.50	2.83	3.53	6.37	2.84
16	8	1	1.96	1.78	2.81	2.86	5.67	2.46
17	9	1	0.53	0.23	1.36	1.40	2.76	2.50
18	8	1	3.07	2.89	3.93	3.90	7.84	2.50
20	8	1	3.78	3.59	4.65	4.57	9.22	2.13
21	8	1	3.24	3.06	4.11	4.06	8.17	1.79
23	4	1	5.91	6.43	6.82	7.22	14.04	4.25
24	4	1	5.83	6.34	6.73	7.14	13.88	3.61
25	8	1	5.47	3.50	6.37	4.47	10.84	3.80
26	4	1	3.93	4.44	4.80	5.36	10.16	4.11
27	8	1	4.07	3.89	4.95	4.84	9.79	2.99
28	10	2	7.52	6.01	8.44	6.84	15.28	3.96
30	8	1	6.35	6.17	7.26	6.99	14.25	3.98
31	8	1	3.13	1.16	4.00	2.28	6.28	2.91
32	10	1	5.54	5.14	6.44	6.02	12.46	3.26
33	10	1	5.57	5.17	6.47	6.04	12.51	3.97
34	4	1	4.38	4.90	5.27	5.79	11.05	3.45
35	8	1	6.19	6.01	7.10	6.83	13.93	5.03
37	10	1	5.69	5.29	6.59	6.15	12.75	2.98
38	8	1	5.49	5.30	6.38	6.17	12.55	3.30
39	8	1	6.35	6.16	7.26	6.98	14.24	3.91
40	8	1	5.92	5.73	6.82	6.58	13.40	4.58
42	10	2	8.52	7.02	9.46	7.78	17.25	5.21
43	10	2	8.32	6.82	9.26	7.60	16.86	4.62
45	10	2	8.16	6.66	9.10	7.45	16.54	4.78
46	10	2	8.14	6.64	9.08	7.42	16.50	4.91
48	8	2	8.97	7.69	9.91	8.41	18.32	6.50
49	4	5	9.05	9.38	10.00	10.00	20.00	5.59
50	8	2	8.13	6.84	9.06	7.62	16.68	5.35
51	4	5	8.31	8.64	9.25	9.30	18.55	5.92
52	8	1	6.84	6.65	7.75	7.44	15.19	5.07
53	8	2	8.78	7.50	9.72	8.23	17.96	5.27

Tableau 7 Résultats des équations (6) à (11)

Part	\hat{G}_1	\hat{G}_2	C_E	Part	\hat{G}_1	\hat{G}_2	C_E
2	1.83	2.38	0.38	28	7.63	5.86	4.75
3	1.00	1.00	0.67	30	7.11	5.89	5.25
4	6.42	2.48	1.00	31	3.11	4.14	5.33
6	3.45	4.42	1.00	32	6.21	4.71	5.63
7	3.81	1.26	1.17	33	6.24	5.86	5.63
8	2.74	3.81	1.33	34	5.51	5.03	5.67
9	1.71	2.48	1.50	35	6.95	7.60	5.88
10	3.00	4.85	1.50	37	6.36	4.26	6.00
11	2.83	3.35	1.67	38	6.26	4.78	6.38
12	5.22	4.11	1.67	39	7.11	5.77	6.63
13	2.76	2.56	1.83	40	6.68	6.87	6.75
15	3.16	4.03	2.25	42	8.62	7.90	7.38
16	2.81	3.41	2.50	43	8.42	6.93	7.88
17	1.34	3.47	2.67	45	8.26	7.19	8.67
18	3.89	3.47	2.88	46	8.24	7.41	8.67
20	4.59	2.87	3.00	48	9.16	10.00	9.33
21	4.06	2.32	3.50	49	10.00	8.52	9.33
23	7.01	6.32	4.38	50	8.33	8.13	9.67
24	6.92	5.28	4.50	51	9.27	9.06	9.83
25	5.40	5.59	4.50	52	7.59	7.66	10.00
26	5.06	6.10	4.50	53	8.97	7.99	10.00
27	4.88	4.28	4.50				

Tableau 8 Valeurs standardisées de \hat{G}_1 et \hat{G}_2

Le Tableau 9 fournit les résultats de l'analyse de corrélation linéaire entre \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et la complexité évaluée (C_E).

C_E	Pearson's correlation coefficient	\hat{G}_1	\hat{G}_2
		0.871	0.887
	p-Value	≈ 0	≈ 0

Tableau 9 Coefficient de corrélation entre \hat{G}_1 , \hat{G}_2 et C_E

La Figure 7 et la Figure 8 présentent une distribution graphique entre les \hat{G}_1 et C_E .

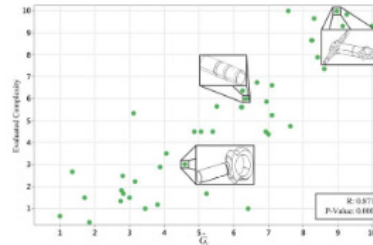


Figure 7 Distribution graphique entre \hat{G}_1 et C_E

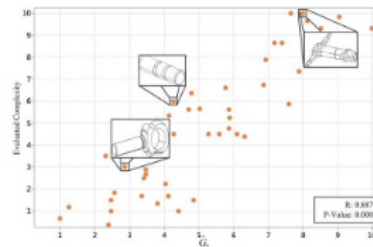


Figure 8 Distribution graphique entre \hat{G}_2 et C_E

5 PROPOSITION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DE LA COMPLEXITÉ

Afin de représenter la complexité calculée C , nous proposons un modèle multiplicatif. L'équation (12) présente les fondements du modèle d'estimation de la complexité.

$$C = \sqrt{\prod_{i=1}^{n-2} |\hat{G}_i|} \tag{12}$$

Le Tableau 10 présente les résultats de notre modèle et le Tableau 11 fournit le résultat d'une analyse de corrélation entre la complexité de notre modèle (C) et C_E .

Part	\hat{G}_1	\hat{G}_2	C	C_E
2	1.83	2.38	2.09	0.38
3	1.00	1.00	1.00	0.67
4	6.42	2.48	3.99	1.00
6	3.45	4.42	3.91	1.00
7	3.81	1.26	2.19	1.17
8	2.74	3.81	3.23	1.33
9	1.71	2.48	2.06	1.50
10	3.00	4.85	3.82	1.50
11	2.83	3.35	3.08	1.67
12	5.22	4.11	4.64	1.67
13	2.76	2.56	2.66	1.83
15	3.16	4.05	3.57	2.25
16	2.81	3.41	3.09	2.50
17	1.34	3.47	2.16	2.67
18	3.89	3.47	3.68	2.88
20	4.59	2.87	3.63	3.00
21	4.06	2.32	3.07	3.50
23	7.01	6.32	6.66	4.38
24	6.92	5.28	6.05	4.50
25	5.40	5.59	5.50	4.50
26	5.06	6.10	5.55	4.50
27	4.88	4.28	4.57	4.50

Tableau 10 Résultats de la complexité calculée C

C_E	Pearson's correlation coefficient	0.913
	P-Value	≈ 0

Tableau 11 Coefficient de corrélation entre C_E et C

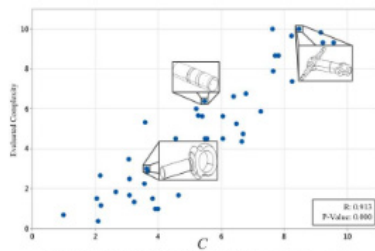


Figure 9 Distribution graphique entre C_E et C

5.1 Validation du modèle.

Dans le but d'investiguer si le modèle d'estimation de la complexité proposé est précis et valide, une phase de validation empirique est entreprise. Cette phase consiste à appliquer notre modèle (équation (12)) aux 11 produits préalablement sélectionnés. Le Tableau 12 liste les valeurs de \hat{G}_1 , \hat{G}_2 , C, C_E et la valeur des résidus, qui est la différence de quantité entre C et C_E ($C - C_E$).

Part	\hat{G}_1	\hat{G}_2	C	C_E	Residual
1	0.82	1.39	1.07	0.33	0.73
5	2.08	2.45	2.26	1.00	1.26
14	2.37	3.85	3.02	2.17	0.85
19	3.37	2.93	3.14	2.88	0.27
22	6.36	5.95	6.16	3.90	2.26
29	6.39	4.61	5.43	5.00	0.43
36	6.49	6.83	6.66	5.88	0.78
41	6.34	7.21	6.76	6.80	-0.04
44	7.20	6.96	7.08	8.00	-0.92
47	8.70	7.23	7.93	8.80	-0.87
54	9.95	11.17	10.54	10.00	0.54

Tableau 12 Valeurs de \hat{G}_1 , \hat{G}_2 , C, C_E et des résidus pour les produits de validation

Le Tableau 13 présente les résultats d'une analyse de corrélation linéaire.

C_E	Pearson's correlation coefficient	0.964
	P-Value	≈ 0

Tableau 13 Coefficient de corrélation entre C_E et C pour les produits de validation

La Figure 10 présente la distribution graphique entre C et C_E .

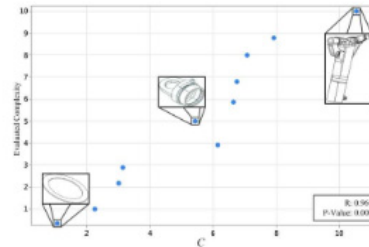


Figure 10 Distribution graphique entre C_E et C pour les produits de validation

Une méthode pour valider un modèle prédictif est de représenter sur un graphique les résidus afin de procéder à une inspection visuelle. La Figure 11 présente (a) la distribution graphique entre les résidus et C, (b) la fréquence de chaque résidu et finalement, (c) un graphique comparatif des valeurs de C_E et de C.

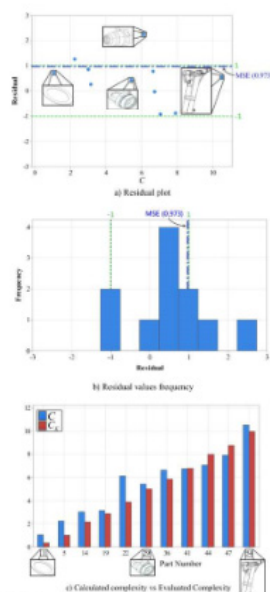


Figure 11 Représentation visuelle des résidus et des valeurs de C_z et de C

De plus, nous utilisons le standard de l'erreur quadratique moyenne (MSE) pour évaluer l'erreur moyenne du modèle. En appliquant l'équation du MSE aux données du Tableau 12, nous obtenons un MSE d'une valeur de 0.973.

De surcroît, nous effectuons un test t de Student dans l'intention de découvrir si un biais significatif est présent. Autrement dit, pouvons-nous accepter l'hypothèse nulle (H_0) stipulant que toutes différences est purement aléatoire? La Figure 12 présente de façon visuelle les résultats de ce test et nous démontre que H_0 se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance (établi à 95%, $\alpha = 0.05$).

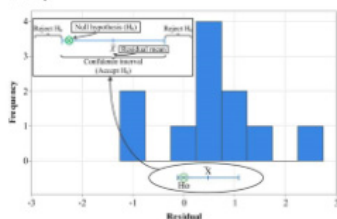


Figure 12 Résultat du test t de Student

6 ANALYSE DES RÉSULTATS – DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

En ce qui concerne les composants candidats de notre modèle d'estimation, les résultats de l'analyse de corrélation linéaire démontrent que ceux-ci sont suffisamment liés aux résultats du processus d'élicitation pour justifier leur utilisation. Nous pouvons également supporter cette conclusion par le fait qu'une fois combinés, le coefficient de corrélation linéaire est supérieur à celui produit unitairement par chacun des composants candidat. En effet, le coefficient de corrélation linéaire du modèle pourrait donc être qualifié de « fort ». En d'autres termes, la complexité d'un produit usiné peut être grandement expliquée par le modèle.

Ensuite, corrélation n'est pas synonyme de causalité. Par conséquent, une étape de validation empirique du modèle était obligatoire pour déterminer si le modèle est capable de prédire de façon précise la complexité d'un produit. La section 5.1 a présenté les résultats de cette étape de validation. Comme premier indicateur de la validité du modèle, le Tableau 13 démontre qu'il y a une corrélation pouvant être qualifiée de forte et positive entre la complexité prédite et la complexité évaluée. De plus, nous observons à la Figure 11, que la majorité des résidus se trouve entre les valeurs -1.0 et 1.0. En fait, neuf produits sur onze sont englobés dans l'intervalle [-1.0, 1.0]. Également, le MSE du modèle supporte ce fait puisqu'en moyenne les valeurs de C se trouvent dans un intervalle ne dépassant pas un point de leur valeur C_z respective.

Par contre, le résidu de deux produits (#5 et #22) se trouve en dehors de l'intervalle moyen [-1.0, 1.0]. Ce phénomène s'explique par le fait que nous observons deux aspects d'un phénomène multidimensionnel. Dans cet article, nous démontrons que la complexité est fonction de deux aspects de nature purement géométrique. Néanmoins, l'étude d'autres aspects d'un produit usiné, tels que les annotations (GD&T, rugosité, note, etc.), les spécifications de matériaux, de procédés spéciaux ou encore les standards exigés (ex : AMS, ASTM, MIL-STD, ISO, etc.), pourrait expliquer les différences entre les valeurs de C et de C_z pour ces deux produits. De plus, une étude de ces aspects pourrait permettre d'augmenter la précision globale du modèle d'estimation. Aussi, les différences entre C et C_z pourraient également être expliquées par une possible erreur dans le processus d'élicitation du groupe d'experts industriels puisque les données sont basées sur leurs expériences.

Finalement, malgré ces différences, les résultats du modèle sont cohérents et d'une précision adéquate. Par conséquent, le modèle pourrait être utilisé par les équipes d'ingénieurs dès la phase de conception dans le but d'identifier les produits à forte complexité. Correctement utilisé, nous pensons que ce modèle permet une saine

gestion de la complexité, et ainsi, de prévenir les risques manufacturiers.

7 CONCLUSION

Le concept de la complexité des produits usinés a été étudié en utilisant les informations volumétriques et topologiques contenues dans le fichier CAO d'un produit. Des analyses de corrélation linéaire ont été effectuées sur 43 produits fournis par notre partenaire industriel, Héroux-Devtek, Inc. Avec ces analyses, nous pouvons conclure que le volume à être usiné en fonction du matériau, ainsi que le nombre d'éléments géométriques à usiner semblent avoir une influence significative sur la complexité d'un produit.

Également, un modèle d'estimation de la complexité a été développé et validé sur une base statistique. Les résultats obtenus démontrent que les valeurs prédites par le modèle sont fortement liées aux données obtenues du groupe d'experts. Une étape de validation effectuée avec 11 produits a permis d'établir que la majorité des valeurs prédites se trouve dans un intervalle ne dépassant pas une erreur de 10%. Le modèle peut être utilisé durant la phase de conception pour fournir un support au processus décisionnel des équipes d'ingénieurs. Les prochains développements du modèle incluent une étude des autres aspects d'un produit usiné pouvant être ajoutés au modèle en vue d'améliorer sa précision et sa qualité.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le partenaire industriel Héroux-Devtek Inc. pour avoir fourni un environnement de recherche et avoir partagé ses données. De plus, nous remercions le personnel de l'usine de Laval pour leur temps et leur engagement dans ce projet. Finalement, nous remercions le FRQNT et le CRSNG pour leur contribution financière au travers de la bourse de recherche BMP Innovation (CRSNG #485378 and FRQNT #195652).

REFERENCES

Ameri, Farhad, Joshua D Summers, Gregory M Mocko et Matthew Porter. 2008. « Engineering design complexity: an investigation of methods and measures ». *Research in Engineering Design*, vol. 19, n° 2-3, p. 161-179.

Colwell, Bob. 2005. « Complexity in Design ». *Computer*, vol. 38, n° 10, p. 10-12.

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.

Jacobs, Mark A. 2013. « Complexity: Toward an empirical measure ». *Technovation*, vol. 33, n° 4-5, p. 111-118.

Jenab, K, et D Liu. 2010. « A graph-based model for manufacturing complexity ». *International Journal of Production Research*, vol. 48, n° 11, p. 3383-3392.

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.

Larousse. 2015. *Dictionnaire Larousse maxipoche plus*. Paris: Larousse, 1616 p.

Morgan, M Granger. 2014. « Use (and abuse) of expert elicitation in support of decision making for public policy ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, n° 20, p. 7176-7184.

Orfi, Nihal, Janis Terpeny et Asli Sahin-Sariisik. 2011. « Harnessing Product Complexity: Step 1—Establishing Product Complexity Dimensions and Indicators ». *The Engineering Economist*, vol. 56, n° 1, p. 59-79.

Qamar, Sayyad Zahid, Abul Fazal M. Arif et Anwar Khalil Sheikh. 2004. « A new definition of shape complexity for metal extrusion ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155-156, p. 1734-1739.

Rodriguez-Toro, Carlos A., S. J. Tate, G. E. M. Jared et K. G. Swift. 2003. « Complexity metrics for design (simplicity+ simplicity= complexity) ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 217, n° 5, p. 721-725.

Samy, S. N., et H. ElMaraghy. 2010. « A model for measuring products assembly complexity ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 23, n° 11, p. 1015-1027.

Schneider Jr, George. 2002. *Cutting Tool Applications*. Novelt, Ohio: ASM International, 243 p.

Zhuo, Zhang, et Luo Qunhui. 2007. « A grey measurement of product complexity ». In *Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference on*. (Montreal, Oct. 7-10 2007), p. 2176-2180. IEEE.

BIBLIOGRAPHIE

- Abanda, Henry, Austine Ng'ombe, Joseph H. M. Tah et Ramin Keivani. 2011. « An ontology-driven decision support system for land delivery in Zambia ». *Expert Systems With Applications*, vol. 38, n° 9, p. 10896-10905.
- Abdullah, Umair, Mohammad Jamil Sawar et Aftab Ahmed. 2009. « Design of a Rule Based System Using Structured Query Language ». In *Proceedings of the 2009 Eighth IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing*. (Chengdu, Dec. 12-14 2009), p. 223-228. IEEE Computer Society.
- Abdullah, Umair, Mohammad Jamil Sawar et Aftab Ahmed. 2010. « Enhanced Design of a Rule Based Engine Implemented using Structured Query Language ». *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, vol. 2183, n° 1, p. 67 - 71.
- Ameri, Farhad, Joshua D Summers, Gregory M Mocko et Matthew Porter. 2008. « Engineering design complexity: an investigation of methods and measures ». *Research in Engineering Design*, vol. 19, n° 2-3, p. 161-179.
- Amici, Elisabetta, Francesca Campana et Edoardo Mancini. 2007. « A Computer-Aided Design Module to Analyze Manufacturing Configurations of Bent and Hydroformed Tubes ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, n° 5, p. 979-983.
- Backes, André Ricardo, Danilo Medeiros Eler, Rosane Minghim et Odemir Martinez Bruno. 2010. « Characterizing 3D Shapes Using Fractal Dimension ». In *Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications*, sous la dir. de Bloch, Isabelle, et Roberto M Cesar, Jr. Vol. 6419, p. 14-21. Coll. « Lecture Notes in Computer Science »: Springer Berlin Heidelberg.
- Bahrami, Mehdi. 2008. « A New Method for Knowledge Representation in Expert System's (XMLKR) ». In *Emerging Trends in Engineering and Technology, 2008. ICETET '08. First International Conference on*. (Nagpur, Maharashtra, Jul. 16-18 2008), p. 326 - 331. IEEE.
- Barclay, I., et Zoe Dann. 2000. « New-product-development performance evaluation: a product-complexity-based methodology ». *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -*, vol. 147, n° 2, p. 41-55.
- Bashir, Hamdi A., et Vince Thomson. 1999. « Estimating Design Complexity ». *Journal of Engineering Design*, vol. 10, n° 3, p. 247-257.

- Bogdan, Patrut. 2010. « Accounting Knowledge Representation in PROLOG Language ». *BRAND : Broad Research in Accounting, Negotiation, and Distribution*, vol. 1, n° 1, p. 11-18.
- Bose, Prosenjit, Anil Maheshwari, Chang Shu et Stefanie Wuhler. 2011. « A survey of geodesic paths on 3D surfaces ». *Computational Geometry*, vol. 44, n° 9, p. 486-498.
- 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.
- Chang, Tien-Chien. 1990. *Expert Process Planning for Manufacturing*. Addison-Wesley Publishing Company, 283 p.
- Colwell, Bob. 2005. « Complexity in Design ». *Computer*, vol. 38, n° 10, p. 10-12.
- 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.
- Denis, Estelle Parra, Cécile Barat, Dominique Jeulin et Christophe Ducottet. 2008. « 3D complex shape characterization by statistical analysis: Application to aluminium alloys ». *Materials characterization*, vol. 59, n° 3, p. 338-343.
- ElMaraghy, W. H., et R. J. Urbanic. 2003. « Modelling of Manufacturing Systems Complexity ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 52, n° 1, p. 363-366.
- 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.
- Fouquet, Dany. 2009. « Formalisation des connaissances d'usinage pour une intégration des logiciels de CFAO : application aux pièces structurales aéronautiques ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique. Montréal, École de technologie supérieure, 210 p.
- Frizelle, Gerry, et Yuri Suhov. 2008. « The measurement of complexity in production and other commercial systems ». *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 464, n° 2098, p. 2649-2668.
- Gero, John S, et Ricardo Sosa. 2008. « Complexity measures as a basis for mass customization of novel designs ». *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 35, n° 1, p. 3-15.

- Golini, Ruggero, et Matteo Kalchschmidt. 2014. « Designing an expert system to support competitiveness through global sourcing ». *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 13, p. 3836-3855.
- Gruber, Thomas R. 1995. « Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? ». *International Journal of Human - Computer Studies*, vol. 43, n° 5, p. 907-928.
- Jacobs, Mark A. 2013. « Complexity: Toward an empirical measure ». *Technovation*, vol. 33, n° 4-5, p. 111-118.
- Jenab, K, et D Liu. 2010. « A graph-based model for manufacturing complexity ». *International Journal of Production Research*, vol. 48, n° 11, p. 3383-3392.
- Jin-Woo, Choi. 2009. « Architecture of a knowledge based engineering system for weight and cost estimation for a composite airplane structures ». *Expert Systems with Applications*, vol. 36, n° 8, p. 10828-10836.
- 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, Sanjay, et Tien-Chien Chang. 1988. « Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model ». *Computer-Aided Design*, vol. 20, n° 2, p. 58-66.
- Kaula, Rajeev. 2012. « Data Modeling of Knowledge Rules: An Oracle Prototype ». *Journal of Software; Vol 7, No 12 (2012)*, p. 2857-2865.
- Kerbrat, Olivier, Pascal Mognol et Jean-Yves 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.
- Larousse. 2015. *Dictionnaire Larousse maxipoche plus*. Paris: Larousse, 1616 p.
- Lépine, Marc, Jr. 2014. « Estimation des indices de capacité d'un assemblage mécano-soudé en tenant compte de la complexité géométrique ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique. Montréal, École de technologie supérieure, 134 p.
- Lin, Bor-Tsuen, et Shih-Hsin Hsu. 2008. « Automated design system for drawing dies ». *Expert Systems With Applications*, vol. 34, n° 3, p. 1586-1598.
- Little, G., R. Tuttle, D. E. R. Clark et Jonathan Corney. 1998. « A feature complexity index ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 212, n° 5, p. 405-412.

- Manson, Steven M. 2001. « Simplifying complexity: a review of complexity theory ». *Geoforum*, vol. 32, n° 3, p. 405-414.
- Marinov, Milko. 2008. « Using frames for knowledge representation in a CORBA-based distributed environment ». *Knowledge-Based Systems*, vol. 21, n° 5, p. 391-397.
- McInerney, Claire. 2002. « Knowledge management and the dynamic nature of knowledge ». *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 53, n° 12, p. 1009-1018.
- Minsky, Marvin. 1974. *A Framework for Representing Knowledge*. Memo 306. MIT-AI Laboratory: Massachusetts Institute of Technology, 76 p.
- Monarchi, David E., et James R. Smith. 1992. « The representation of rules in the ER model ». *Data & Knowledge Engineering*, vol. 9, n° 1, p. 45-61.
- Morgan, M Granger. 2014. « Use (and abuse) of expert elicitation in support of decision making for public policy ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, n° 20, p. 7176-7184.
- Okafor, Eric C., et Charles C. Osuagwu. 2007. « Issues in structuring the knowledge-base of expert systems ». *Electronic Journal of Knowledge Management*, vol. 5, n° 3, p. 313-322.
- Orfi, Nihal, Janis Terpenney et Asli Sahin-Sariisik. 2011. « Harnessing Product Complexity: Step 1—Establishing Product Complexity Dimensions and Indicators ». *The Engineering Economist*, vol. 56, n° 1, p. 59-79.
- Orfi, Nihal, Janis Terpenney et Asli Sahin-Sariisik. 2012. « Harnessing Product Complexity: Step 2—Measuring and Evaluating Complexity Levels ». *The Engineering Economist*, vol. 57, n° 3, p. 178-191.
- Perlis, Alan, et John McCarthy. 1960. « Recursive functions of symbolic expressions and their computation by machine, Part I ». *Communications of the ACM*, vol. 3, n° 4, p. 184-195.
- Qamar, Sayyad Zahid, Abul Fazal M. Arif et Anwar Khalil Sheikh. 2004. « A new definition of shape complexity for metal extrusion ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155–156, p. 1734-1739.
- Quéguiner, Jean-Louis. 2011. « Conception et mise en place sur le web d'un système interactif d'aide à la décision utilisant des bases de connaissances ». Mémoire de maîtrise en génie concentration personnalisée. Montréal, École de technologie supérieure, 173 p.

- Rattanaprateep, Chuleerat, et Suphamit Chittayasothorn. 2006. « A frame-based object-relational database expert system architecture and implementation ». In *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases*. (Madrid, Spain, Feb. 15-17 2006), p. 327-332. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).
- Robe, E. D., E. C. Chung, C. A. Vassiliadis, Roger Klingensmith et John Armstrong. 1994. « An object-oriented knowledge-based system for automating the routing process in a manufacturing environment ». *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 7, n° 4, p. 407-413.
- Rodriguez-Toro, Carlos A., S. J. Tate, G. E. M. Jared et K. G. Swift. 2003. « Complexity metrics for design (simplicity+ simplicity= complexity) ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 217, n° 5, p. 721-725.
- Rubio, Luis, Manuel De la Sen, Andrew P. Longstaff et Simon Fletcher. 2013. « Model-based expert system to automatically adapt milling forces in Pareto optimal multi-objective working points ». *Expert Systems with Applications*, vol. 40, n° 6, p. 2312-2322.
- Ruschitzka, Margot, Adam Suchodolski et Jerzy Wróbel. 2010. « Ontology-Based Approach in Hybrid Engineering Knowledge Representation for Stamping Die Design ». In *New World Situation: New Directions in Concurrent Engineering*, sous la dir. de Pokojski, Jerzy, Shuichi Fukuda et Józef Salwiński. p. 227-235. Coll. « Advanced Concurrent Engineering ». London: Springer London.
- Saa, Ruben, Alberto Garcia, Carlos Gomez, Jesus Carretero et Felix Garcia-Carballeira. 2012. « An ontology-driven decision support system for high-performance and cost-optimized design of complex railway portal frames ». *Expert Systems With Applications*, vol. 39, n° 10, p. 8784-8792.
- Sadeghian, Alireza, et J. D. Lavers. 2004. « Implementation of knowledge-based system for iron core inductor design ». *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 40, n° 6, p. 3495-3504.
- Samy, S. N., et H. ElMaraghy. 2010. « A model for measuring products assembly complexity ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 23, n° 11, p. 1015-1027.
- Schneider Jr, George. 2002. *Cutting Tool Applications*. Novelty, Ohio: ASM International, 243 p.

- Shafiei-Monfared, Sareh, et Kouroush Jenab. 2012. « A novel approach for complexity measure analysis in design projects ». *Journal of Engineering Design*, vol. 23, n° 3, p. 185-194.
- Shehab, Essam M., et Hassan S. Abdalla. 2006. « A cost-effective knowledge-based reasoning system for design for automation ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 220, n° 5, p. 729-743.
- Shortliffe, Edward Hance. 1976a. « Chapter 1 - Introduction ». In *Computer-Based Medical Consultations: Mycin*, sous la dir. de Shortliffe, Edward Hance. p. 1-61. Elsevier.
- Shortliffe, Edward Hance. 1976b. « Chapter 2 - Design Considerations for MYCIN ». In *Computer-Based Medical Consultations: Mycin*, sous la dir. de Shortliffe, Edward Hance. p. 63-78. Elsevier.
- Sorenson, D., C. K. Grissom, L. Carpenter, A. Austin, K. Sward, L. Napoli, H. R. Warner et A. H. Morris. 2008. « A frame-based representation for a bedside ventilator weaning protocol ». *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 41, n° 3, p. 461-468.
- Spelt, P. F., H. E. Knee et C. W. Glover. 1991. « Hybrid artificial intelligence architecture for diagnosis and decision-making in manufacturing ». *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 2, n° 5, p. 261-268.
- Tah, Joseph H. M., et Henry F. Abanda. 2011. « Sustainable building technology knowledge representation: Using Semantic Web techniques ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, n° 3, p. 547-558.
- Tahan, S. A., et S. Levesque. 2009. « Exploiting the process capability of profile tolerance according GD&T ASME-Y14.5M ». In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on*. (Troyes, Jul. 6-9 2009), p. 1285-1290. IEEE.
- Tan, Chee Fai, S. N. Khalil, Juffrizal Karjanto, L. S. Wahidin, W. Chen et G. W. Matthias Rauterberg. 2015. « An Expert Machine Tools Selection System for Turning Operation ». In *7th International Conference on Cooling & Heating Technologies (ICCHT 2014)*. (Selangor, Malaysia, Nov. 4-6 2014). Vol. 88, p. 012044. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Tekin Temur, Gül, Muhammet Balcilar et Bersam Bolat. 2014. « A fuzzy expert system design for forecasting return quantity in reverse logistics network ». *Journal of Enterprise Information Management*, vol. 27, n° 3, p. 316-328.
- Tilotma, Sharma, et Kelkar Deepali. 2012. « A Tour Towards Knowledge Representation Techniques ». *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering*, vol. 2, n° 2, p. 131-135.

- Tripathi, K. P. 2011. « A Review on Knowledge-based Expert System: Concept and Architecture ». *IJCA Special Issue on Artificial Intelligence Techniques - Novel Approaches & Practical Applications*, n° 4, p. 21-25.
- Valentan, Bogdan, Tomaž Brajljeh, Igor Drstvenšek et Jože Balič. 2012. « Development of a part-complexity evaluation model for application in additive fabrication technologies ». *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, n° 10, p. 709-718.
- Verhagen, Wim J. C., Pablo Bermell-Garcia, Reinier E. C. van Dijk et Richard Curran. 2012. « A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, n° 1, p. 5-15.
- Wilma, Polini, et Moroni Giovanni. 2015. « Manufacturing Signature for Tolerance Analysis ». *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 15, n° 2, p. 021005-021005-5.
- Yang, Jeongsam, et Soonhung Han. 2006. « Repairing CAD model errors based on the design history ». *Computer-Aided Design*, vol. 38, n° 6, p. 627-640.
- Yeo, S. H., M. Rahman et V. C. Venkatesh. 1988. « Development of an expert system for machinability data selection ». *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 17, p. 51-60.
- Zhuo, Zhang, et Luo Qunhui. 2007. « A grey measurement of product complexity ». In *Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference on*. (Montreal, Oct. 7-10 2007), p. 2176-2180. IEEE.

