TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE 7
1.1 Problématique 7
1.2 Objectifs 8
1.3 Déroulement du mémoire 9

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART ET DÉFINITION 11
2.1 Définitions 11
2.1.1 La notion de coûts 11
2.1.2 Spécification 12
2.1.3 Tolérance géométrique et annotation 13
2.1.4 La précision et la justesse 15
2.2 Les différentes méthodes d'estimation 16
2.2.1 Les approches quantitatives 18
2.2.1.1 Les techniques paramétriques 18
2.2.1.2 Les techniques analytiques 19
2.2.2 Les approches qualitatives 21
2.2.2.1 Les techniques analogiques 22
2.2.2.2 Les techniques intuitives 22
2.2.3 Synthèse des modèles conventionnels 24
2.2.4 Les nouvelles tendances de modèles hybrides 26
2.2.5 Les logiciels d'estimation 28
2.3 La gestion des connaissances numériques 29
2.3.1 Le modèle 3D enrichi 30
2.3.2 Les moteurs de recherche géométrique 31
2.4 Les connaissances tacites 32

CHAPITRE 3 CADRE DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES 37
3.1 Hypothèses retenues 37
3.2 Cadre de recherche 37

CHAPITRE 4 ÉTUDE EN INDUSTRIE 39
4.1 La procédure d'estimation 40
4.2 Les modèles utilisés 44
4.2.1 Observations générales 44
4.2.2 La diversité des modèles 46
4.2.2.1 Les entrants 46
4.2.2.2 Les coûts sortants 48
4.2.2.3 Les interactions et règles de décisions 50

4.3 Influence des connaissances tacites et de l'expertise 52
4.3.1 Sélection des pièces 52
4.3.2 Le processus de cotation 55
4.3.3 Analyses et discussions 59
4.4 Ouverture sur l'intérêt d'une nouvelle approche 65

CHAPITRE 5 DESCRIPTION DU MODÈLE GÉNÉRALISÉ 69
5.1 Contexte 69
5.2 Les paramètres et les relations 69
5.3 La notion d'origine et la décomposition 71
5.3.1 L'origine 71
5.3.2 La décomposition 72
5.4 La similarité 73
5.4.1 Généralités 73
5.4.2 Index de similarité 75
5.5 Indice de confiance 76
5.6 La notion de priorité et les niveaux d'assistance 79
5.6.1 Les priorités 79
5.6.2 Les niveaux d'assistance 80

CHAPITRE 6 ADAPTATION À L'ESTIMATION DES COÛTS EN USINAGE AÉRONAUTIQUE 83
6.1 Mise en place 83
6.1.1 Architecture des données 83
6.2 Le choix de la machine 85
6.3 Le coût matière 86
6.3.1 Le volume de matière brute 87
6.4 Le coût d'usinage 88
6.4.1 Calcul du temps d'usinage 89
6.4.1.1 Le temps d'usinage en fonction du volume à usiner 90
6.4.1.2 Le temps d'usinage en fonction de la surface totale 91
6.4.1.3 Le temps d'usinage en fonction des annotations 92
6.5 Le coût d'ébavurage 93
6.5.1 Calcul du temps d'ébavurage 94
6.6 Analyse de corrélation et de régression linéaire 95
6.6.1 Analyse primaire 95
6.6.2 Combinaison des composants du temps d'usinage 103
6.6.3 Analyse de régression linéaire 106
6.7 Influence de la similarité sur les corrélations et la régression 111
6.7.1 Calcul de l'index de similarité 111
6.7.2 Résultats et discussions 114

CHAPITRE 7 VALIDATION DU MODÈLE L'ESTIMATION DES COÛTS 121
7.1 Validation empirique 121

7.2 Estimation hors-contexte 124
7.3 Discussions des résultats 125

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 129

ANNEXE I ARTICLE DE CONFÉRENCE PLM 2017 135

LISTE DE RÉFÉRENCES 155

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Liste des tolérances géométriques selon la norme ASME Y14.5 14

Tableau 2.2 Résumé des méthodes d'estimation 25

Tableau 4.1 Importance qualitative des différents entrants pour l'estimation des coûts 47

Tableau 4.2 Liste des coûts sortants pour les industriels avec leur considération associée 49

Tableau 4.3 Extraits et exemples des règles de décision et méthodes employées par les estimateurs 51

Tableau 4.4 Pièces sélectionnées pour l'exercice de cotation 53

Tableau 4.5 Pièces sélectionnées pour la mise en place du modèle et sa validation 55

Tableau 4.6 Résultats des différents coûts pour les pièces 1, 2 et 3 57

Tableau 4.7 Résultats des différents coûts pour les pièces 4 à 9 58

Tableau 4.8 Résultats du coût total pour les pièces 10, 11 et 13 59

Tableau 4.9 Moyenne et variance des différences en pourcentage par paramètre et par entreprise 60

Tableau 4.10 Moyenne des différences en pourcentage par groupe de pièces et par entreprise 62

Tableau 4.11 Moyenne et variance des différences en pourcentage par paramètre 64

Tableau 4.12 Taille moyenne des lots par entreprise et contribution de chacun des temps sur le temps global 65

Tableau 5.1 Classement des relations et des paramètres 70

Tableau 5.2 Les types de relations 71

Tableau 5.3 Les origines possibles des paramètres 72

Tableau 6.1 Informations géométriques pour le brut et l'ébavurage 96

Tableau 6.2 Informations géométriques pour l'usinage 97

Tableau 6.3 Coefficient de corrélation de Pearson entres les paramètres 98

Tableau 6.4 Valeurs des composants standardisés 105

Tableau 6.5 Coefficient de corrélation entre C_4 et T_{usi} 105

Tableau 6.6 Résultats des mesures et tests des régressions linéaires 107

Tableau 6.7 Liste des coefficients pour les fonctions décroissantes de similarité 112

Tableau 6.8 Index de similarité IS des pièces sélectionnées pour chacune des références 113

Tableau 6.9 Valeurs des composants standardisés pour les pièces sélectionnées 113

Tableau 6.10 Coefficient de Pearson avec la similarité 114

Tableau 6.11 Coefficient de détermination R^2_{ajus} et résultats des tests de Durbin-Watson avec la similarité 115

Tableau 6.12 Mesures des erreurs des régressions avec la similarité 116

Tableau 7.1 Résultats de la règle de décision pour le choix de la machine 122

Tableau 7.2 Résultats pour le calcul du coût de la matière 122

Tableau 7.3 Résultats pour le calcul du coût d'usinage 123

Tableau 7.4 Résultats pour le calcul du coût d'ébavurage 123

Tableau 7.5 Résultats pour le calcul du coût total 127

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 0.1 Les différentes sections du mémoire 5

Figure 1.1 Le déroulement du travail de recherche 10

Figure 2.1 Exemple des spécifications dans un modèle 3D annoté 12

Figure 2.2 Exemple d'annotation sémantique de perpendicularité 14

Figure 2.3 Représentation de la justesse, la fidelité et l'exactitude d'une mesure 16

Figure 2.4 Méthodes d'estimation en fonction de la phase d'insdutrialisation 17

Figure 2.5 Classement des différentes méthodes d'estimation des coûts 17

Figure 2.6 Courbe de la relation coût-tolérances. Tirée de Cheng & Maghsoodloo (1995) 19

Figure 2.7 Architecture d'une estimation de coûts d'usinage Tirée de Xu *et al.*, 2006 21

Figure 2.8 Fonctionnement du raisonnement par cas 24

Figure 2.9 Concept d'un modèle de coûts sémantique Tirée de Ma *et al.* (2014) 27

Figure 2.10 Exemple de logiciel d'estimation Tirée du site internet Watif, 2017 http://watif.fr/page/techniquote 29

Figure 2.11 Exemple de modèle 3D enrichi 30

Figure 2.12 Modes de création des connaissances Adaptée de Nonaka Takeuchi (1995) 35

Figure 4.1 Procédure de chiffrage des partenaires industriels Arconic, Techniprodec et Conception Génik 41

Figure 4.2 Procédure de chiffrage pour Stelia 42

Figure 4.3 Distribution des coûts pour une pièce usinée 46

Rapport-Gratuit.com

Figure 4.4 Carte des intéractions entre les paramètres pour les coûts matière et usinage 51

Figure 4.5 Sélection des pièces pour l'exercice de cotation 53

Figure 4.6 Sélection des 28 pièces pour le modèle 54

Figure 4.7 Objectif de l'outil d'aide à l'estimation 66

Figure 5.1 Exemple de décomposition pour le poids de la boîte englobante W_{BE} 73

Figure 5.2 Exemple de résultats suite à une recherche géométrique 75

Figure 5.3 Indice de confiance en fonction de l'origine 79

Figure 5.4 Les priorités d'obtention des valeurs 80

Figure 6.1 Architecture sommaire de de la base de donnnées 84

Figure 6.2 Gestion des origines, des indices de confiance et des relations dans la base de donnnées 85

Figure 6.3 Algorithme de choix de la machine 86

Figure 6.4 Décomposition du coût de la matière 87

Figure 6.5 Décomposition du coût d'usinage 89

Figure 6.6 Représentation de l'aire projetée selon les deux plus grandes dimensions 91

Figure 6.7 Décomposition du coût d'ébavurage 94

Figure 6.8 Distribution entre l_{BE} et l_{brut} 98

Figure 6.9 Distribution entre L_{BE} et L_{brut} 99

Figure 6.10 Distribution entre L_{Totale} et T_{eba} 99

Figure 6.11 Distribution entre C_1 et T_{usi} 100

Figure 6.12 Distribution entre C_2 et T_{usi} 100

Figure 6.13 Distribution entre C_3 et T_{usi} 101

Figure 6.14 Distribution entre C_4 et T_{usi} 104

Figure 6.15 Droite de régression entre C_4 et T_{usi} 107

Figure 6.16 Distribution des résidus pour T_{usi} 109

Figure 6.17 Distribution des résidus pour T_{eba} 109

Figure 6.18 Distribution des résidus pour L_{brut} 110

Figure 6.19 Résultats des recherches similaires pour les pièces 11 et 18 112

Figure 6.20 Résultats graphiques de la droite de régression pour (C_4 et T_{usi}) avec la pièce #11 116

Figure 6.21 Influence de la similarité sur les résidus du temps d'ébavurage pour la pièce #18 117

Figure 6.22 Influence de la similarité sur les résidus du temps d'usinage pour la pièce #11 118

Figure 6.23 Résidus des prédictions du temps d'usinage pour la pièce #11 119

Figure 7.1 Pourcentage d'erreur en fonction coût 126

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AISI	*American Iron and Steel Institute* (Institut Américain du Fer et de l'Acier)
APE	*Absolute Percentage Error* (Pourcentage d'Erreur Absolue)
API	*Application Programming Interface* (Interface de Programmation)
ASME	*The American Society of Mechanical Engineer* (La Société Américaine des Ingénieurs Mécaniques)
BAERD	*Bombardier Aerospace Engineering Requirement Document* (Document des Requis d'Ingénierie de Bombardier Aerospace)
BAPS	*Bombardier Aerospace Procedural Standards* (Procédures Standards de Bombardier Aerospace)
BE	Boîte Englobante
CAO	Conception assistée par ordinateur
CNC	*Computer Numerical Control* (Machine à contrôle numérique)
CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
ERP	*Enterprise Resource Planning* (Progiciel de gestion intégré)
ÉTS	École de Technologie Supérieure
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
GD&T	*Geometric Dimensioning and Tolerancing* (Dimensionnement et Tolérancement Géométrique)
ISO	*International Organization for Standardization* (Organisation Internationale pour la Standardisation)
JT	*Jupiter Tessellation* (Tessellation Jupiter)
PLM	*Product Lifecycle Management* (Gestion du cycle de Vie des Produits)
PMI	*Prodcut and Manufacturing Information* (Information d'Usinage et du Produit)

PRC	*Product Representation Compact* (Représentation Compacte des Produits)
RMSE	*Root Mean Square Error* (Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne)
SAP	*Systems, Applications and Products for data processing* (Systèmes, Applications et Produits pour le traitement des données)
UQAM	Université du Québec À Montréal
VIM	Vocabulaire International de Métrologie
WMAPE	*Weighted Mean Absolute Percentage Error* (Erreur Absolue Moyenne Pondérée en Pourcentage)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A_{totale}	Aire du produit
A_{XY}	Aire projetée selon les deux plus grande dimensions
C_i	Composant pour le temps d'usinage
$\hat{C}_i$	Composant standardisé pour le temps d'usinage
C_{divers}	Coût divers
C_{eba}	Coût d'ébavurage
C_{mat}	Coût de la matière brute
$C_{operation_i}$	Coût de l'opération i
C_{piece}	Coût d'une pièce
C_{post}	Coût des post-traitements
C_{prog}	Coût de la programmation
CS	Coefficient de similarité
CS_{date}	Coefficient de similarité lié à la date de fabrication
CS_{IM}	Coefficient de similarité lié à l'indice d'usinabilité
CS_{geo}	Coefficient de similarité basé sur la géométrie
CS_{lot}	Coefficient de similarité lié à la taille du lot
C_{usi}	Coût d'usinage
d	Distance renvoyée par la recherche de similarité géométrique
h_{brut}	Épaisseur du brut
h_{BE}	Épaisseur de la boîte englobante
$IC_{initial}$	Indice de confiance initial du paramètre
$IC_{reg,ij}$	Indice de confiance issu de la régression entre les paramètres i et j
IC_{sim}	Indice de confiance basé sur la similarité

in	*Inch* (Pouce)
IS	Index de similarité
lb	Livre
L_{BE}	Longueur de la boîte englobante
l_{BE}	Largeur de la boîte englobante
L_{brut}	Longueur du brut
l_{brut}	Largeur du brut
$L_{brut,reg}$	Longueur du brut trouvée par régression
$l_{brut,reg}$	Largeur du brut trouvée par régression
L_{Totale}	Longueur totale des arêtes de la pièce
min	Minute
$Prix_{mat}$	Prix de la matière brute par unité de poids
TH_{eba}	Taux horaire d'ébavurage
TH_{prog}	Taux horaire de programmation
TH_{usi}	Taux horaire d'usinage
$T_{estimation}$	Temps passé à faire l'estimation
$T_{inspection}$	Temps d'inspection
T_{prog}	Temps de programmation
T_{setup}	Temps d'installation
T_{usi}	Temps d'usinage
V_{BE}	Volume de la boîte englobante
V_{Brut}	Volume du matériau brut servant à fabriquer la pièce
$V_{effectif}$	Volume effectif de la pièce
V_{final}	Volume du produit
V_{remove}	Différence entre le volume effectif et le volume du produit

W	Poids de la pièce
W_{BE}	Poids de la boîte englobante du produit
I_m	Indice d'usinabilité du matériau
x_i	Paramètre du modèle lié à la pièce
x_j	Paramètre du modèle lié à l'environnement
$\hat{y}$	Prédiction de la régression linéaire
y	Observation de la régression linéaire
β_i	Coefficients des régressions linéaires
λ	Constante d'agrandissement de l'aire projetée
ε	Erreurs des régressions linéaires
$	Dollar Canadien

INTRODUCTION

Grâce à l'essor du secteur aéronautique au cours des dernières années, bon nombre de jeunes entreprises ont émergé sur le marché entrainant avec elles de nouveaux défis technologiques. En effet, les industries manufacturières fonctionnent dorénavant à plein régime pour satisfaire la demande croissante de pièces usinées. Ces dernières doivent garantir un standard de qualité tout en composant avec des contraintes temporelles et budgétaires. Afin de respecter leurs engagement, les compagnies se doivent d'utiliser les meilleures techniques d'usinage disponibles. La technologie de fabrication la plus utilisée dans ce domaine demeure, encore et toujours, l'usinage à commande numérique (CNC). Cette technique est principalement employée pour fabriquer des pièces en alliage d'aluminium, d'acier et parfois de titane. Grâce à sa capacité à réaliser des produits à forte valeur ajoutée, complexes et de haute précision, ce procédé est favorisé par les entreprises. L'usinage CNC permet aussi une exécution rapide lors de la fabrication de pièces structurelles de grandes dimensions. Pour tous ces avantages, ce type d'usinage est la méthode préconisée pour fabriquer des pièces aéronautiques.

Bien que son efficacité soit incontestable, l'usinage à commande numérique (CNC) présente encore plusieurs contraintes majeures. Les entreprises doivent demeurer compétitives en livrant des produits de haute qualité en temps et en heure, malgré une concurrence de plus en plus forte notamment causée par la délocalisation de certaines parties de la production. Afin de rester concurrentielles, elles comptent sur le développement de leur chaîne de production et l'adoption de nouvelles méthodes, mais aussi sur la maîtrise de leur processus, leurs compétences et leur expertise. Il ne fait aucun doute que parmi ces avancements, la réduction des différents coûts constitue une priorité majeure. Elle constitue d'ailleurs de nombreux axes de développement à travers l'amélioration des lignes de production avec, par exemple, la réduction des temps morts. Un autre de ces axes de développement est essentiellement centré sur le chiffrage des pièces. En effet, une estimation des coûts fiable et précise occupe une place primordiale dans le processus d'amélioration. Une bonne estimation limite les risques de frais

Rapport-Gratuit.com

inattendus et permet une meilleure gestion de la production et du budget, favorisant également la prise de décision stratégique. De la même façon que l'utilisation des logiciels de conception et fabrication assistée par ordinateur (CAO et FAO) a permis d'énormes gains de temps au cours des dernières années en facilitant la création et la fabrication des pièces (Liu et Qiao, 2012), l'estimation des coûts représente une tâche qui profiterait grandement d'une application informatique permettant de faire des chiffrages plus rapides et plus précis pour les donneurs d'ordre et les clients.

Pour les sous-traitants, l'activité de calcul des coûts est nécessaire, répétitive, fastidieuse et reste une opération risquée. Surestimer les coûts de fabrication d'une pièce peut faire perdre un contrat à une industrie créant un manque à gagner parfois critique. À l'inverse, si les coûts sont sous-estimés, la compagnie risque de perdre de l'argent lors de la production, et, dans le pire des cas, pourrait perdre sa crédibilité auprès du client. Ceci dit, pour le client, il est essentiel d'avoir une idée du prix qu'il devrait payer pour un produit avant d'aller le soumettre sur le marché industriel. Cela lui permet également d'analyser les soumissions des différents fournisseurs et de choisir avec qui il fera affaire. C'est d'ailleurs pour ces raisons que les clients ont commencé à utiliser une méthode d'estimation connue sous le nom du *True Should Cost*. Il est également important pour le client de minimiser son nombre de fournisseurs, afin d'être plus stable sur le plan économique et de développer des relations fiables. L'estimation des coûts est donc une étape cruciale dans le processus de fabrication et de négociation tel que le rappelle Shehab& Abdalla, 2001. Toutefois, les chiffrages sont presque toujours effectués à la main. Cette tâche est souvent confiée à un ou deux experts qui s'appuieront à la fois sur leurs connaissances tacites acquises avec l'expérience et sur des paramètres explicites ou des standards et normes de fabrication (Roy, Kelvesjo, Forsberg & Rush, 2001). De plus, ils passent souvent plus de temps à demander aux sous-traitants des devis spécifiques pour certains prix ou à chercher dans toutes sortes de documents plutôt que de chiffrer. Des applications logicielles telles que *Apriori* ou *Techniquote* sont parfois utilisées, mais elles présentent également cer-

taines limites. Leurs bases de données doivent être maintenues à jour et adaptées aux différents processus de l'entreprise. De plus, ces logiciels nécessitent beaucoup de temps pour faire une estimation. Ils se basent principalement sur la génération automatique de la gamme d'usinage et le calcul complet des trajectoires d'outils pour estimer un prix et il est assez commun que des erreurs, qui doivent alors être corrigées à la main, apparaissent. Bien que le résultat final soit plus juste, ces corrections contribuent à alourdir le processus de chiffrage.

Les entreprises doivent contrôler de multiples facteurs et luttent à obtenir des prix qui soient répétitifs pour le même type de pièces usinées au cours du temps. Pour atteindre un tel but, il faut trouver un moyen de combiner de manière efficace et intelligente toutes les informations disponibles dans l'entreprise lors de la cotation. La solution devrait permettre de combiner plusieurs facteurs regroupant les capacités de l'entreprise, le type de pièce et ses caractéristiques ainsi que les aspects humains et financiers. Ces connaissances étant à la fois tacites et explicites rendent encore plus complexe la recherche de modèle conduisant à une estimation de coût efficace, fiable et répétable. Pour l'instant, aucune méthode certifiée disponible sur le marché ne permet une estimation rapide et systématique du coût de fabrication. Pour être efficace, une telle méthode devra prendre tous ces facteurs en compte tout en pouvant s'adapter à son environnement.

Dans le contexte spécifique de l'usinage des pièces aéronautiques et dans le but de répondre à cette problématique, ce mémoire consiste à développer un modèle d'estimation de coûts versatile visant à harmoniser les meilleures pratiques de chiffrage pour les pièces usinées en se basant sur des modèles explicites, la réutilisation des connaissances et toutes les informations disponibles dans les entreprises. Ce mémoire est réalisé dans le cadre d'un projet CRIAQ Lean 702 en partenariat avec cinq entreprises québécoises que sont Stelia North America, Arconic, Techniprodec, Conception Genik et 3Dsemantix. Il a pour objectif de fusionner les stratégies de gestion avec diverses technologies de traitement de données afin de mettre en place une

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

aide à l'estimation multifactorielle. Dans cette optique, le modèle utilisera les bases de données venant des systèmes ERP et les modèles 3D enrichis des pièces étudiées. Les ERP et les modèles 3D sont remplis d'informations géométriques, sémantiques et textuelles qui sont bien souvent sous-exploitées. En utilisant ces informations, il est possible d'aider les estimateurs dans leur évaluation. Le projet repose donc sur des outils informatiques qui pourront extraire, gérer et analyser ces informations à la fois alphanumériques et géométriques réparties à travers les entreprises.

Ce mémoire présente les résultats de nos recherches et s'articule autour de sept chapitres. Le CHAPITRE 1 présente la problématique, les différents objectifs généraux et spécifiques que nous nous sommes donnés et la méthodologie suivie au cours du projet. Le CHAPITRE 2, quant à lui, comprend une revue de la littérature sur l'estimation des coûts et les différents concepts qui seront abordés dans ce présent travail. Le CHAPITRE 3 aborde le cadre de recherche et les hypothèses formulées suite à l'état de l'art universitaire. Ensuite, le CHAPITRE 4 fait l'analyse des observations et des données que nous avons pu obtenir lors de nos différentes visites en industries. Le CHAPITRE 5 présente alors la proposition du modèle d'estimation et les différentes notions qui ont été mises en place. Le CHAPITRE 6 montre une adaptation possible de ce modèle dans le cadre du projet Lean 702. Enfin, le CHAPITRE 7 vient valider le modèle mis en place. Le mémoire se termine par les conclusions du projet et les recommandations de travaux futurs.

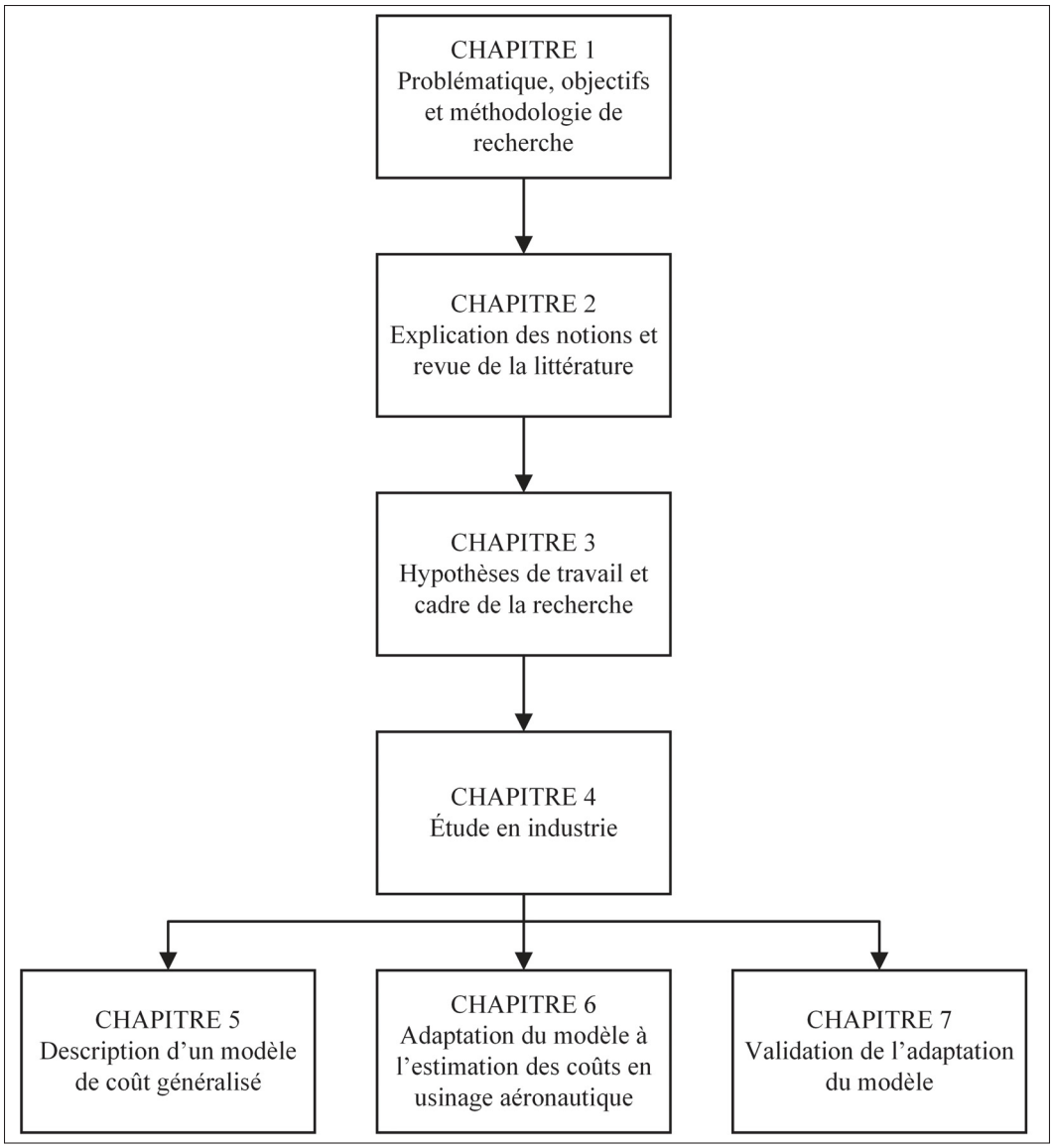

Figure 0.1 Les différentes sections du mémoire

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

1.1 Problématique

L'industrie manufacturière s'est transformée au cours des dernières années, obligeant les compagnies à essayer de se démarquer de plus en plus, à proposer des prix plus compétitifs et à prendre certains risques en élargissant leur catalogue de fabrication. Plus concrètement, les pièces aéronautiques se sont complexifiées et les exigences en termes de qualité et de délai des donneurs d'ordres ont augmenté mettant les fabricants dans une position délicate. L'ensemble du processus de fabrication est affecté par ces nouvelles exigences avec par exemple une nette augmentation de la charge de travail lors de l'usinage.

En effet, la marge d'erreur s'amincit et une mauvaise gestion des risques et des coûts peut avoir des effets très dommageables pour une entreprise. C'est pour cette raison que nous pouvons affirmer que les estimations des pièces jouent un rôle crucial dans les performances financières d'une compagnie. Une bonne gestion des estimations permet de prendre de meilleures décisions stratégiques concernant la production et les contrats à accepter. Cette gestion permet de mieux mesurer certains risques encourus lors de l'usinage. Or, l'estimation relève, dans la plupart des cas, d'experts industriels utilisant leurs connaissances et les spécifications liées à l'entreprise. Il est certain que ces estimations peuvent cacher des incertitudes plus ou moins importantes à cause de leur nature subjective. De plus, tout oubli ou erreur d'identification d'une caractéristique peut se traduire par une estimation faussée. Une telle faute pourrait s'avérer critique et avoir des conséquences postproduction sur le bénéfice réalisé.

Les industries sont laissées sans parachute de secours face à ces risques qui pourraient être évités grâce à une estimation objective, quantitative et précise. Malgré l'existence de nombreuses méthodes et logiciels de chiffrage, très peu d'entre eux peuvent s'adapter aux différents environnements, mettre en évidence les points critiques de l'estimation, ou encore proposer un indice de confiance sur le chiffrage calculé. À notre connaissance, les méthodes disponibles ne

mettent pas suffisamment à profit les informations disponibles au sein des entreprises et aucune n'utilise vraiment le principe de similarité et plus précisément de similarité géométrique afin d'estimer le coût d'un produit.

La problématique peut ainsi se résumer en trois questions de recherche qui ont menées le reste du projet :

1. Quelle est l'influence des connaissances de l'expert lors du processus de cotation ?
2. Comment pouvons-nous utiliser au mieux la notion de similarité afin d'estimer le coût d'une pièce avec une bonne précision et un bon degré de confiance ?
3. Comment pouvons-nous proposer une aide au chiffrage qui soit à la fois simple à mettre en œuvre, fidèle et adaptable à différentes entreprises ?

1.2 Objectifs

Une estimation fiable et précise se basant sur les données internes et l'historique des pièces similaires permettra de diminuer les risques et de mieux anticiper les coûts relatifs à la production.

En se basant sur les trois questions soulevées précédemment, nous pouvons définir les trois objectifs principaux de ce mémoire :

1. Étudier l'impact des connaissances tacites des experts ;
2. Proposer une nouvelle approche et un modèle pour l'estimation des coûts des pièces usinées en aéronautique ;
3. Évaluer l'influence de la similarité sur le coût.

L'étude et la mise en place d'un modèle de chiffrage novateur comprennent plusieurs étapes. Les objectifs ci-dessus correspondent donc à plusieurs objectifs spécifiques :

1. Identifier les façons de faire actuelles,
2. Comprendre et identifier les différents paramètres influençant le coût d'une pièce usinée,

3. Étudier l'influence de l'environnement et des connaissances des différents estimateurs,
4. Développer un modèle d'estimation des pièces usinées,
5. Évaluer l'impact de la similarité sur le chiffrage,
6. Valider la précision et la confiance du modèle de façon empirique.

1.3 Déroulement du mémoire

Afin de mener à bien ce mémoire de recherche, nous proposons la méthodologie suivante se divisant en six étapes distinctes et permettant d'atteindre les différents objectifs que nous nous sommes fixés à la section 1.2. La Figure 1.1 offre une représentation graphique de ce déroulement.

Premièrement, nous effectuerons un état de l'art complet sur ce qui est actuellement employé en matière d'estimation des coûts pour les pièces usinées. Ce n'est pas un sujet nouveau et il y a beaucoup de travaux sur le domaine. Néanmoins, les domaines de la similarité géométrique et de l'utilisation massive des données sont plus récents et ils méritent notre attention. Le CHAPITRE 2 constitue donc le départ de ce mémoire de recherche avec une revue de la littérature nous permettant de survoler ce qui a déjà été fait à ce sujet. Ces références nous donneront des pistes de réflexions et de solution pour la mise en place de notre modèle.

Deuxièmement, nous effectuerons une étude complète du processus de cotation des différentes industries partenaires afin de bien comprendre leur réalité et leur façon de fonctionner. Cette étude nous donnera une meilleure compréhension des besoins des industriels et des défis qu'ils doivent surmonter lors des estimations.

Troisièmement, une étude plus quantitative sera menée avec les partenaires industriels en vue d'évaluer l'influence des connaissances tacites des experts sur les estimations et de déterminer les paramètres prédominants utilisés par chacune des compagnies. Le CHAPITRE 4 couvrira les deux étapes précédentes et c'est également dans cette partie que nous détaillerons les données que nous avons pu collecter.

Le CHAPITRE 5 est le point névralgique de la recherche : il constitue la proposition qualitative de notre modèle adaptatif de chiffrage et représente la quatrième étape de notre processus.

Quatrièmement, suite au détail de la construction du modèle, nous proposons une adaptation de ce modèle dans le cas des pièces en aluminium fraisées dans le secteur aéronautique. Le CHAPITRE 6 détaille les différents paramètres ainsi que leurs combinaisons pour parvenir à l'estimation finale.

Dans le CHAPITRE 7, dans le but de valider le modèle, nous mettons en scène un exercice d'estimation de deux ou trois pièces différentes dans une entreprise fictive. Cette dernière étape vise à comparer les résultats du chiffrage obtenus avec notre modèle au prix réel des pièces.

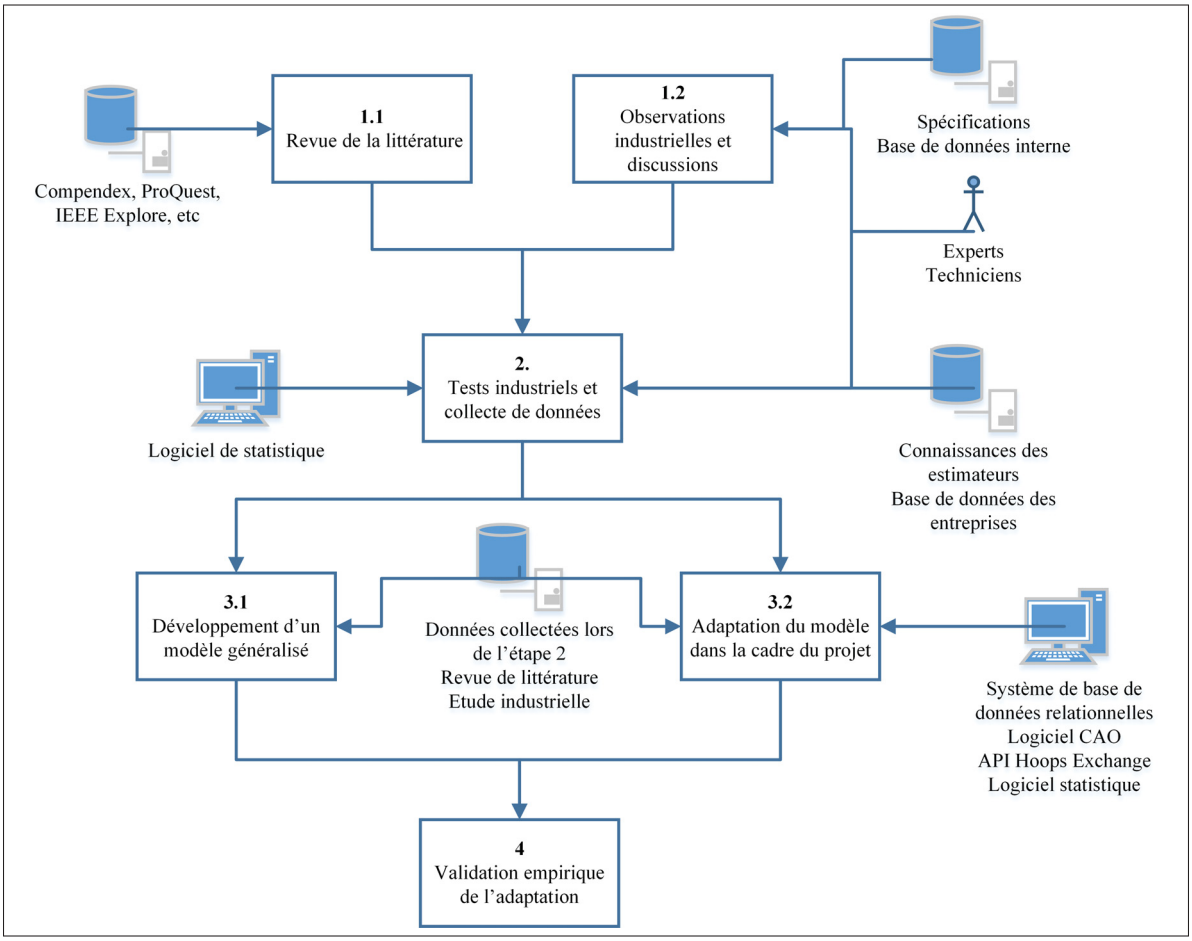

Figure 1.1 Le déroulement du travail de recherche

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART ET DÉFINITION

2.1 Définitions

Plusieurs termes et concepts abordés et utilisés dans ce travail de recherche méritent d'être définis et explicités afin de bien comprendre la suite du travail. Les paragraphes suivants serviront à mettre en lumière certaines définitions clés pour la réalisation de ce projet.

2.1.1 La notion de coûts

Dans un premier temps il est primordial de bien définir la notion de coût, car bien que ce mot soit utilisé couramment, il comporte certaines subtilités. D'un point de vue du contrôle de gestion, le coût constitue l'évaluation monétaire d'un ensemble de ressources associées à un achat ou à une activité. Le coût regroupe différents concepts parmi lesquels on peut citer :

- les coûts fixes et variables : Tout ce qui ne varie pas avec le niveau d'activité ou les quantités produites est considéré comme un coût fixe (coûts administratifs, loyer, etc.). À l'inverse, les coûts variables dépendent des quantités fabriquées par l'entreprise ;
- les coûts directs et indirects : Cette notion désigne la relation entre le coût et le produit. Un coût direct est lié directement à la production et peut ainsi désigner les matières premières utilisées pour la fabrication d'une seule pièce, alors qu'un coût indirect fait plutôt référence à une charge nécessaire à la production de plusieurs pièces différentes. En usinage numérique, les temps de préparation sont souvent considérés comme indirects, alors que les temps d'usinage sont des coûts directs ;
- le coutant et le vendant : Ils correspondent respectivement au prix du produit à deux étapes différentes de son cycle de vie. Le coutant réfère au prix net de la pièce après fabrication, cela pourrait correspondre en un sens au *Should-Cost*. Le vendant, comme son nom l'indique, correspond au coût de la pièce après négociation avec le client, applications des marges et décisions stratégiques de vente. C'est le prix que paiera l'acheteur.

Rapport-Gratuit.com

2.1.2 Spécification

Dans le domaine de l'usinage aéronautique, tout est contrôlé et règlementé, du matériau brut à l'inspection finale, en passant par les traitements thermiques et la fabrication. L'ensemble des normes, standards et procédés à respecter par l'entreprise de fabrication est explicité par les spécifications de la pièce. Certaines de ces spécifications seront communes (ex : ASME Y14.100 pour l'interprétation des données ou ASME Y14.5 pour les tolérances), mais chaque client possède ses propres exigences. Certaines seront plus spécifiques que d'autres (ex : BAERD BA500 pour les finitions et BAPS 188 pour les règles d'usinage de chez Bombardier). Ces informations se trouvent généralement sur une feuille de notes accompagnant la pièce ou alors directement sur le modèle 3D. Les pratiques varient suivant les entreprises et l'ancienneté des pièces traitées, mais dans les deux cas, ces spécifications sont interprétables de manière informatique. Pour nos partenaires industriels, nous retrouvons les deux situations. La Figure 2.1 montre un exemple de spécifications contenues dans un modèle 3D.

NOTE(S)

1. FINISH SPEC PER BAERD BA670/690-001
2. FINISH CODES PER BAERD GEN-004
3. IDENTIFY PER BAPS 144-005
4. MACHINE PER BAPS 188-001
5. DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M - 1994

Figure 2.1 Exemple des spécifications dans un modèle 3D annoté

2.1.3 Tolérance géométrique et annotation

En ingénierie manufacturière, les tolérances sont utilisées pour définir rigoureusement la forme géométrique des pièces à usiner. Les plus standards sont les tolérances dimensionnelles. Ces dernières permettent de spécifier les distances et les dimensions des éléments ainsi que leurs écarts de tolérance acceptables. Cependant, des défauts nuisibles au fonctionnement sont toujours possibles. L'utilisation des tolérances géométriques permet alors de limiter les écarts admissibles de formes, d'orientation et de position des différents éléments géométriques d'une pièce. Ce système de définition, communément appelé GD&T (*Geometric Dimensioning and Tolerancing*), s'est vu standardisé à travers différentes normes comme le ASME Y14.5 ou certaines normes ISO. Les annotations rassemblent donc l'ensemble de ces informations, dimensionnelles et géométriques, spécifiées sur un produit.

Quand une annotation est rattachée à un objet et qu'elle contient à la fois des informations compréhensibles par un homme et par une machine, celle-ci est alors dite sémantique. Ainsi, contrairement aux annotations textuelles classiques, une annotation sémantique pourra être lue par un ordinateur ou programme et deviendra une information pouvant être extraite, classée puis filtrée. Pour que cela soit possible elles doivent respecter une syntaxe prédéfinie et être enregistrées dans le modèle 3D annoté. La Figure 2.2 donne un exemple d'annotation géométrique de type perpendicularité qui pourrait être qualifiée de sémantique. Le Tableau 2.1 présente les annotations que l'on peut trouver sur un modèle 3D avec leur symbole correspondant selon la norme ASME Y14.5.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 2.1 Liste des tolérances géométriques selon la norme ASME Y14.5

Type de Tolérance	Cas	Symbole	Observations
Forme	Rectitude	—	S'utilise sans élément de référence
	Planéité	▱	
	Circularité	○	
	Cylindricité	⌭	
Profil	Profil d'une ligne	⌒	S'utilise avec et sans élément de référence
	Profil d'une surface	⌓	
Orientation	Parallélisme	//	S'utilisent avec élément de référence
	Perpendicularité	⊥	
	Inclinaison	∠	
Position	Concentricité ou coaxialité	◎	
	Symétrie	⌯	
	Localisation	⌖	
Battement	Battement simple	↗	
	Battement double	⌰	

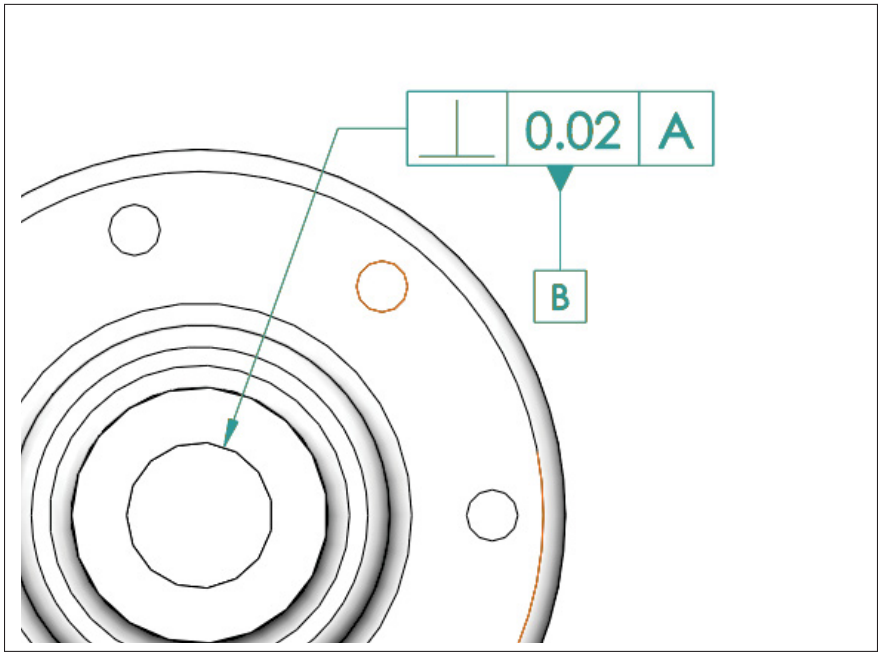

Figure 2.2 Exemple d'annotation sémantique de perpendicularité

2.1.4 La précision et la justesse

Une estimation de coût est d'abord une méthode de mesure du prix d'un objet ou d'un service. Comme tout appareil de mesure, un modèle de chiffrage est défini par plusieurs caractéristiques définies dans le Vocabulaire international de Métrologie (VIM) et dans la norme ISO 5725 qui sont les suivantes :

- l'étendue de mesure : étendue des valeurs possibles (dans notre cas de quelques dollars à plusieurs milliers) ;
- la résolution : plus petite variation perceptible par le modèle ;
- la sensibilité : impact d'une variation en entrée sur la sortie ;
- l'exactitude : coïncidence entre la valeur vraie et la valeur que l'on mesure. L'exactitude est souvent définie par l'erreur de mesure. Cette erreur est la somme de l'erreur systématique (ou biais) provenant de la justesse de l'appareil et de l'erreur aléatoire qui correspond à un défaut de fidélité. Elle est liée à ces deux autres caractéristiques :
    - la justesse : capacité à donner des résultats sans erreur. Elle est généralement mesurée par la différence entre la vraie valeur et la moyenne des valeurs mesurées ;
    - la fidélité : capacité à donner des mesures sans erreurs accidentelles. Elle représente souvent la dispersion des résultats et la probabilité que la mesure soit représentative. La répétition d'une mesure est un des moyens de s'assurer de la fidélité du résultat.

La Figure 2.3 ci-dessous offre une représentation visuelle des notions d'exactitude, de justesse et de fidélité telles que présentées en métrologie.

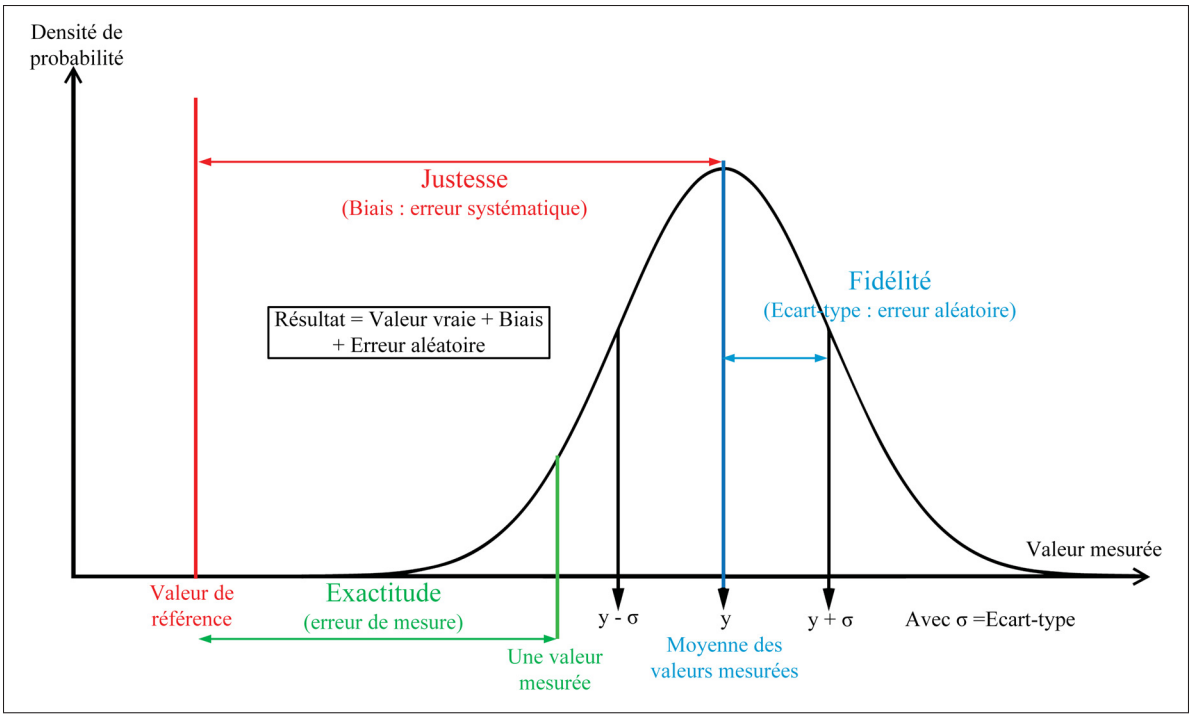

Figure 2.3 Représentation de la justesse, la fidelité et l'exactitude d'une mesure

2.2 Les différentes méthodes d'estimation

L'estimation des coûts est un nerf vivant de l'industrie manufacturière depuis presque 100 ans, car elle constitue une étape primordiale dans le cycle de vie des produits comme le souligne Boothroyd & Reynolds (1989) ou encore Mirdamadi, Etienne, Hassan, Dantan & Siadat (2013). L'estimation est requise pour prévoir un budget, planifier la production ou encore négocier les contrats. C'est une des raisons pour lesquelles beaucoup de recherches ont été conduites dans le but de trouver la meilleure façon de faire un chiffrage de pièce. Ainsi, on peut rencontrer une large panoplie de méthodes et de techniques utilisables. Chacune dépend des informations disponibles en entrées, du type de produit concerné, des matériaux et de la phase d'industrialisation au cours de laquelle l'estimation a lieu. Ficko, Drstvenšek, Brezočnik, Balič & Vaupotic (2005) mettent en avant cet aspect crucial des différentes techniques illustrées par la Figure 2.4. Comme le décrivent Niazi, Dai, Balabani & Seneviratne (2006) ou Ben-Arieh (2010), toutes ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories : les qualitatives et les quantitatives. Tel que le montre la Figure 2.5, chacune de ces catégories se sépare en deux sous-classes

qui peuvent à leur tour être subdivisées. Le lecteur peut se reporter aux deux références précédentes pour de plus amples détails sur cette classification. Cela étant dit, nous allons tout de même explorer les principales méthodes d'estimation à la section suivante. Comme vous pourrez le voir chaque modèle et plus largement chaque catégorie possède ses avantages, son domaine de prédilection, mais également ses limites.

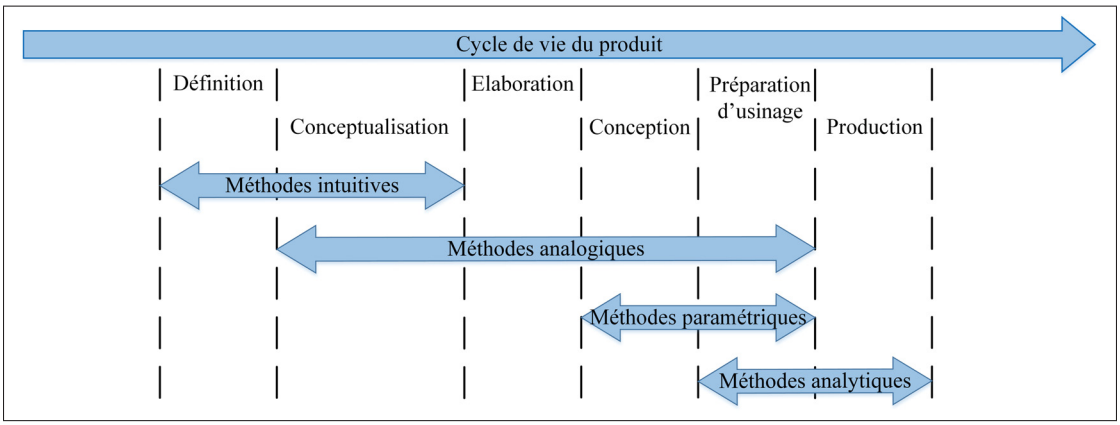

Figure 2.4 Méthodes d'estimation en fonction de la phase d'insdutrialisation

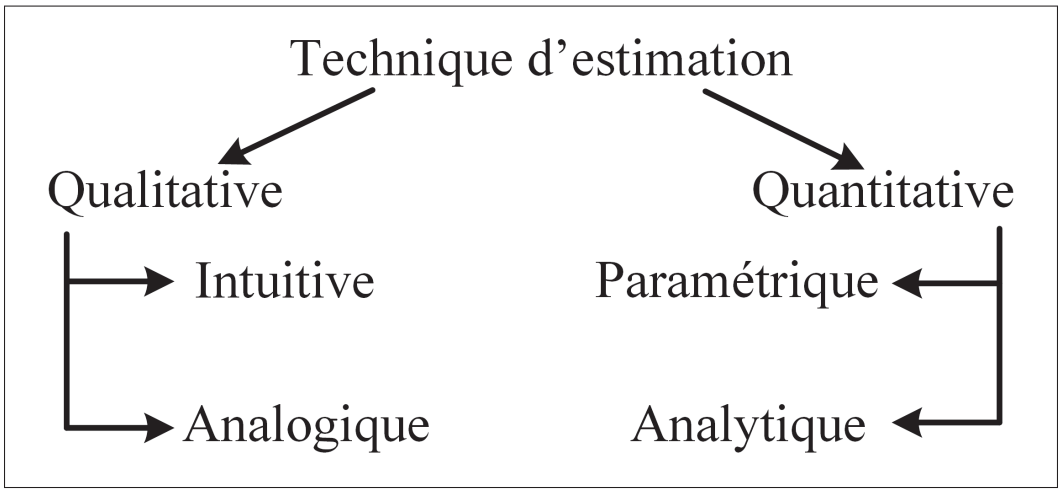

Figure 2.5 Classement des différentes méthodes d'estimation des coûts

2.2.1 Les approches quantitatives

Elles se basent principalement sur une analyse détaillée de la conception d'un produit, de ses caractéristiques et des processus de fabrication correspondants. Les coûts sont donc calculés soit en utilisant une fonction analytique de certaines variables représentant différents paramètres du produit, soit en faisant la somme des ressources utilisées et consommées pendant la durée de vie du produit.

2.2.1.1 Les techniques paramétriques

Ces méthodes sont très répandues, car elles produisent, dans la plupart des cas, des estimations assez précises et faciles à implémenter. Elles s'appuient essentiellement sur de l'analyse statistique où le coût est exprimé comme étant une fonction de différentes variables préalablement choisies. Cavalieri, Maccarrone & Pinto (2004) proposent un modèle paramétrique estimant le coût de production d'un disque de frein en se basant sur l'expression 2.1 avec C le coût d'un disque, FC le facteur de coût, C_{co} le coût du cœur par kilogramme de fonte, N_{co} le nombre de cœurs, C_{rm} le coût unitaire du matériau brut, SC le taux de rebus, TF le coefficient de conversion acier fonte et W le poids.

$$C = FC + (C_{co} N_{co} + \frac{C_{rm} TF}{1 - SC}) W \tag{2.1}$$

De façon analogue, Boothroyd & Reynolds (1989) adoptent un coût paramétrique se basant sur le volume des pièces tournées pour réussir à les chiffrer. Un des problèmes majeurs provient des paramètres moteurs du coût. Ces paramètres doivent être correctement identifiés en amont. Cela a pour conséquence de limiter chaque implémentation à un type de pièce très spécifique. En effet, il risque d'y avoir beaucoup d'erreurs lorsque les pièces sortent du cadre défini. Bien que Chougule & Ravi (2006) mettent en évidence certaines améliorations pour ces techniques, plusieurs limitations sont toujours présentes et inhérentes à l'approche paramétrique elle-même (Cavalieri *et al.*, 2004).

2.2.1.2 Les techniques analytiques

Elles regroupent plusieurs méthodes dont celles basées sur les relations de coût-tolérances, les fonctionnalités des produits ou encore les opérations. Chacune de ces techniques dispose également d'une multitude de déclinaisons différentes.

Les modèles de coût-tolérances prennent racine dans les travaux de Speckart (1972), de Sutherland & Roth (1975), ou encore de Cheng & Maghsoodloo (1995). Ils ont tenté de définir les tolérances optimales pour minimiser les coûts de production tout en gardant les pièces fonctionnelles. Les méthodes reposent sur l'utilisation de courbes d'ajustement à l'aide de fonction réciproque ou exponentielle de la forme de l'équation (2.2) avec A et B deux coefficients, n un entier et x la variation de la tolérance. Ces travaux ont ensuite été couplés à ceux de Taguchi (1986) et sa fonction de perte de qualité tel qu'illustré par la Figure 2.6.

$$f(x) = A + \frac{B}{x^n} \tag{2.2}$$

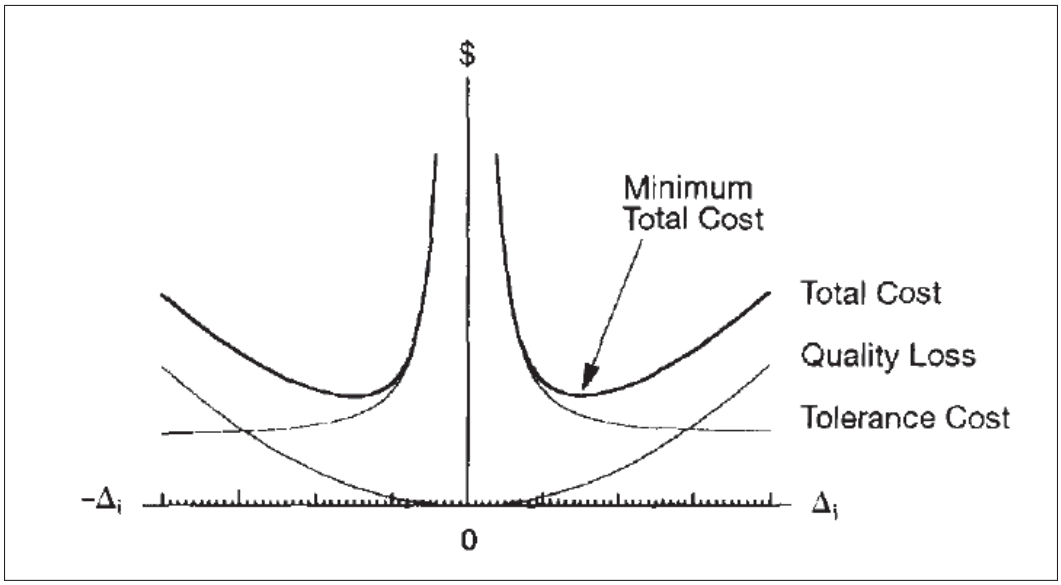

Figure 2.6 Courbe de la relation coût-tolérances.
Tirée de Cheng & Maghsoodloo (1995)

Les modèles conventionnels de coûts basés sur les tolérances s'appuient essentiellement sur des analyses de régression des données empiriques fréquemment utilisées en fabrication. Le problème de ces méthodes est de ne pas considérer les variations dans l'environnement de travail et donc d'être sujettes à des erreurs d'adaptation. Dong, Hu & Xue (1994) proposent alors plusieurs façons d'améliorer ces modèles en ayant recours à des courbes polynomiales de 4eme et 5eme ordre ou bien à des combinaisons de fonctions. Ces modèles de haut degré polynomial présentent moins d'erreurs d'adaptation, mais ont des formes plus complexes et nécessitent donc plus de paramètres en entrée. De plus, si les données ne possèdent aucune nature polynomiale, l'utilisation d'une telle méthode peut produire de grandes oscillations non voulues. Afin d'éviter certains de ces problèmes, Yang, Mao, Zhang & Cao (2010) ont proposé l'utilisation d'un réseau neuronal flou permettant la prise en considération des changements dans l'environnement de travail. Toutefois, ce modèle doit être entrainé pour un type d'élément spécifique et ne permet donc pas de traiter la pièce dans son ensemble, mais simplement les surfaces individuellement, ce qui constitue un inconvénient majeur.

Les modèles basés sur les opérations d'usinage ou la reconnaissance de forme, tels que présentés par Feng, Kusiak & Huang (1996) ou Xu, Fang & Gu (2006), servent essentiellement dans les dernières phases de conception. Ainsi Jung (2002) proposa l'équation (2.3) ou R_o est le taux horaire opérateur, R_m le taux machine, T_{su} le temps d'installation, T_{ot} le temps d'opération, Q la taille du lot et T_{no} le temps de non-opération.

$$\text{Cost} = (R_o + R_m)\left[\frac{T_{su}}{Q}\,T_{ot}\,T_{no}\right] + \text{Material cost} + \text{factory expenses} \tag{2.3}$$

Ces modèles se basent sur les caractéristiques machines pour calculer le temps de production lié à chaque opération. Ces opérations sont déterminées par reconnaissance de surface et association des fonctions d'usinage correspondantes comme le montre la Figure 2.7. Cependant, une telle reconnaissance est souvent hasardeuse et mène à des opérations mal attribuées. Les temps qui en résultent sont faussés et l'estimateur doit alors les corriger. Aussi, tous les procédés ne sont pas pris en compte. C'est pourquoi ce type de modèle rencontre des difficultés

pour les pièces complexes. Finalement, on remarque que l'impact des tolérances sur le coût final est totalement absent du modèle. À cause de la grande quantité d'informations requises, ces techniques sont, la plupart du temps, restreintes aux dernières phases d'industrialisation du produit. Elles se résument à faire en amont le travail du programmeur CNC, ce qui est la plupart du temps considéré comme un inconvénient. Il serait plus rentable de faire la vraie gamme d'usinage puis de calculer directement le coût réel.

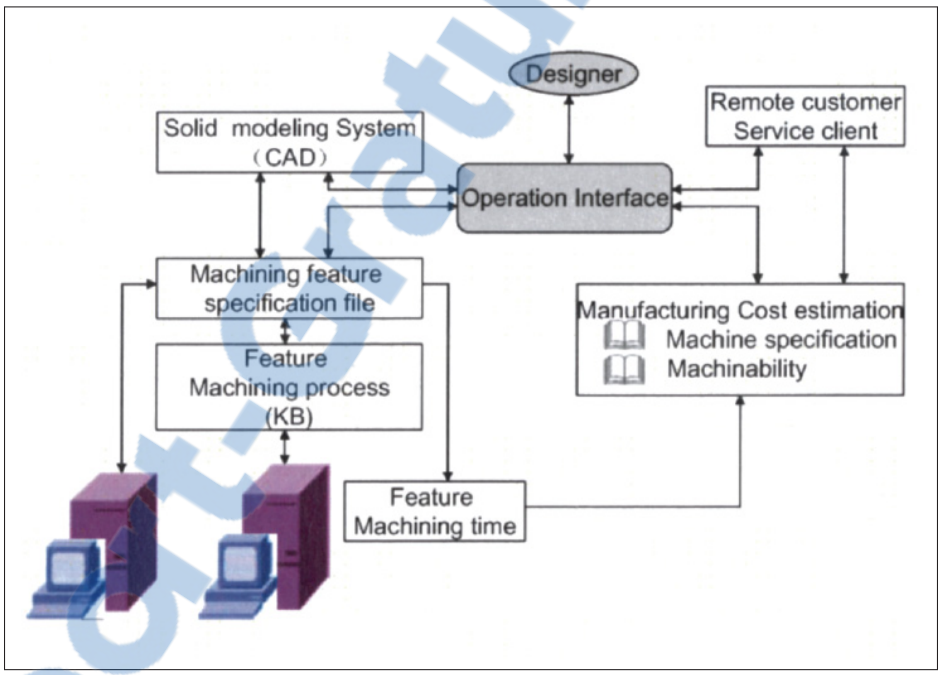

Figure 2.7 Architecture d'une estimation de coûts d'usinage
Tirée de Xu *et al.*, 2006

2.2.2 Les approches qualitatives

Contrairement aux approches quantitatives, celles-ci s'articulent autour des analyses comparatives entre les produits qui ont déjà été fabriqués et le nouveau produit. Les ressemblances et différences permettent d'incorporer les données historiques dans l'estimation et de les adapter à la solution existante.

Rapport-gratuit.com

2.2.2.1 Les techniques analogiques

Ces modèles comptent essentiellement sur des analyses de régression ou des réseaux neuronaux afin de trouver des relations entre le coût et une liste de variables prédéfinies. On utilise les données antérieures de coûts pour établir une corrélation entre le coût des pièces et certains paramètres sélectionnés. Les relations trouvées peuvent ensuite être utilisées pour prédire le coût d'un nouveau produit. Les réseaux neuronaux déterminent automatiquement la meilleure relation possible pour le calcul et possèdent une grande capacité d'adaptation. Ils sont donc particulièrement efficaces pour les problèmes non linéaires et complexes. Özcan & Fıglalı (2014) ont comparé par exemple un modèle de régression avec un réseau neuronal artificiel pour l'estimation des coûts des matrices d'estampage. Les résultats vont largement en faveur du réseau neuronal, mais ceux-ci sont extrêmement dépendants des données d'entrées et très difficiles à implanter en milieu industriel de par leur manque de transparence. Ces réseaux agissent comme des boites noires et il est parfois difficile de vérifier la qualité de la méthode lorsqu'elle présente des résultats contre-intuitifs ou questionnables.

2.2.2.2 Les techniques intuitives

Les modèles intuitifs regroupent deux catégories majeure : le raisonnement par cas et les systèmes d'aide à la décision. Par opposition aux techniques analogiques, ces systèmes sont souvent plus rapides, donnent des résultats fiables et réussissent à mieux gérer les incertitudes. Rubio, De la Sen, Longstaff & Fletcher (2013) proposent un algorithme de règles de décision pour la sélection et l'optimisation des procédés d'usinage alors que Shehab & Abdalla (2001) présentent un système d'aide basé sur les connaissances pour le chiffrage durant les phases de conception préliminaires en y incorporant de la logique floue. L'ajout de logique floue leur permit notamment de mieux gérer les données imprécises. Les techniques d'aide à la décision cherchent donc principalement à réutiliser les connaissances des experts dans un domaine afin d'orienter l'utilisateur vers la bonne solution. La représentation la plus commune consiste à stocker ces connaissances sous forme de règles de décision, ou alors sous la forme de systèmes experts qui tentent de répliquer le processus de réflexion de l'humain. Ce type de technique est

efficace à condition de maintenir les systèmes à jour. Par contre, ils se limitent trop souvent à une seule famille de produits. Leur implémentation demande également beaucoup d'efforts, car il faut parvenir à transcrire ces connaissances en une base de données structurée.

Le raisonnement par cas résout certaines de ces problématiques et constitue une des techniques les plus en vogue aujourd'hui. Sa popularité provient de sa capacité de réutiliser les connaissances de l'historique en plus d'être personnalisable. Des études menées par Ficko *et al*. (2005) ou encore An, Kim & Kang (2007) essayent différentes techniques de raisonnement par cas. Les deux études se basent sur l'abstraction des caractéristiques géométriques depuis le modèle CAO dans le but de traduire cette géométrie sous forme vectorielle. Il est ainsi possible de calculer une distance entre les pièces. Dans le modèle de Ficko *et al*. (2005), les composants vectoriels sont d'abord normalisés en fonction de leur importance dans le coût du produit. La distance peut s'exprimer par l'équation (2.4) ou P_i, représente la distance de la pièce i, d_j le coefficient de normalisation du paramètre j, g_{cj} et g_{sj} respectivement le paramètre j du cas cible et du cas source.

$$P_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} d_j \left(g_{cj} - g_{sj}\right)^2} \tag{2.4}$$

D'une manière générale, la procédure du raisonnement par cas suit le schéma de la Figure 2.8. Ces solutions ont de nombreux avantages. Elles fonctionnent rapidement, de façon transparente, on sait d'où vient la solution, et il est possible de combiner différentes méthodes durant la phase d'adaptation des résultats. Les principaux inconvénients sont la nécessité d'extraire les paramètres importants pour pouvoir comparer les pièces entre elles et d'utiliser une mesure de la similarité appropriée. Cela rend souvent chaque implémentation dépendante d'un type de pièce. De plus, il est généralement assez difficile d'obtenir des tendances générales. Un autre des inconvénients évidents est le besoin d'une base de données de pièces existante. Nous remarquons par ailleurs qu'aucune des variations ne se base sur une mesure de similarité géométrique standardisée.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

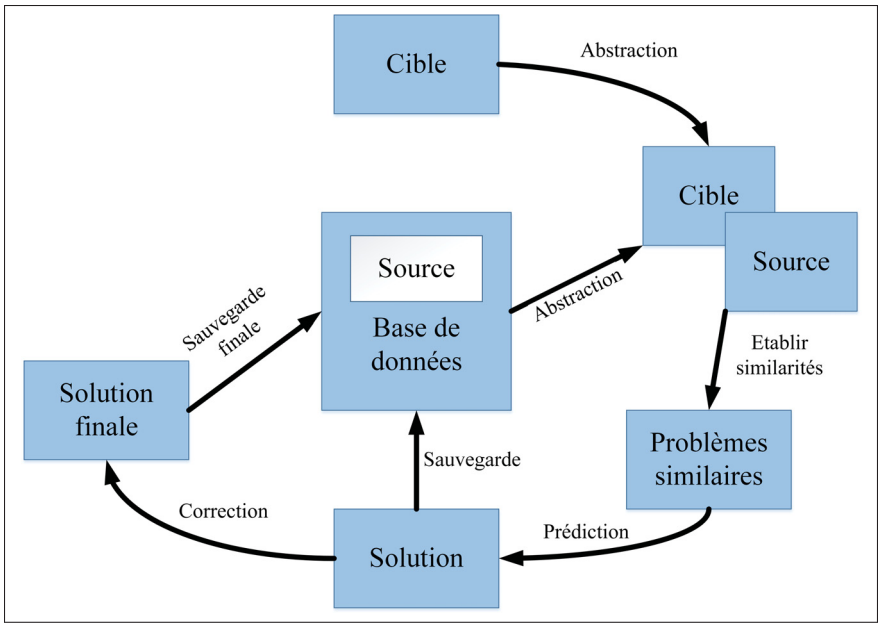

Figure 2.8 Fonctionnement du raisonnement par cas

2.2.3 Synthèse des modèles conventionnels

Pour résumé simplement, les approches qualitatives fournissent une estimation généralement plus grossière qui aidera les experts dans leur prise de décision, alors que les approches quantitatives fournissent des résultats plus précis, mais sont plus dures à mettre en place. Les modèles paramétriques sont rapides à l'exécution, facile à l'emploi, et pourtant très peu utilisés en industrie. En effet, les données sont souvent trop contextuelles et complexes pour permettre leur bonne utilisation. Comme on peut le constater, un nombre impressionnant de modèles et techniques ont été développés pour une grande variété d'applications, mais les modèles existants présentent plusieurs défauts dont la liste suivante donne un bref aperçu :

- forte dépendance aux modèles mathématiques ;
- difficulté de personnalisation pour les besoins de chaque entreprise ;
- manque de précision pour les techniques analogiques ;
- fonctionnement semblable à des boites noires pour les réseaux neuronaux ;
- maintien des connaissances pour les systèmes basés sur des règles trop compliqué.

Comme discuté précédemment, d'autres points forts et points faibles existent spécifiquement à chaque technique et Le Tableau 2.2 résume les méthodes abordées jusqu'ici en précisant leur principal avantage et inconvénient.

Tableau 2.2 Résumé des méthodes d'estimation

Technique d'estimation			**Avantages**	**Inconvénients**
Qualitative	Intuitive	Raisonnement par cas	Utilise les connaissances passées	Dépend principalement des données historiques
		Système de décision	Résultats fiables, gèrent bien les incertitudes	Difficile et long à installer, pièces complexes exclues
	Analogique	Régression	Simple à mettre en place	Limitation aux problèmes linéaires simples
		Réseau neuronal	Gestion des problèmes non linéaires	Dépend des données d'entrées, boîte noire
Quantitative	Paramétrique		Utilisation efficace des paramètres moteurs du coût	Difficile d'identifier les bons paramètres en amont
	Analytique	Coût-Tolérance	Mesure efficace de l'impact des tolérances sur le coût	Besoin d'informations détaillées et restreint à un type de surface
		Basée sur les opérations d'usinage	Optimisation possible des stratégies d'usinage, coût assez détaillé	Prend du temps et difficile d'estimer les pièces complexes ou petites
		Décomposition des coûts	Méthode la plus facile	Demande une ventilation précise des ressources dépensées

2.2.4 Les nouvelles tendances de modèles hybrides

Les principales exigences pour un modèle d'estimation mentionnées par Layer, Brinke, Houten, Kals & Haasis (2002) sont les suivantes :

- facile à utiliser et à prendre en main,
- transparent sur les coûts,
- rapide dans son exécution,
- précis,
- adaptable aux changements et aux différents types de pièces.

Si une de ces exigences est manquante, la méthode ne franchira certainement pas la frontière du monde universitaire et ne sera pas utilisée en industrie. C'est pourquoi les recherches les plus récentes dévoilent une nouvelle tendance visant à rassembler au mieux ces qualités en combinant deux ou plusieurs méthodes d'estimation. Ainsi Yang *et al*. (2010) proposent l'utilisation de logique floue sur une fonction de coût-tolérance. Lin & Chang (2002) optent, quant à eux, pour l'utilisation de réseaux neuronaux afin de trouver la meilleure courbe d'ajustement pour la fonction coût-tolérance. Roy *et al*. (2001) sont parmi les premiers à introduire un modèle hybride pour l'estimation des coûts en ingénierie en combinant les approches qualitatives et quantitatives. Ils se sont appuyés sur les analyses statistiques des données extraites du modèle 3D des pièces et sur l'extraction des connaissances des experts à travers divers questionnaires. Dans un autre ordre d'idée, Hillsman, Wang & Nazzal (2013) introduisent une approche combinant le regroupement par similarité et l'utilisation de régression linéaire pour l'estimation des moules d'injection. Les régressions sont construites en fonction de la complexité du moule, elle-même évaluée à partir du dessin 2D. L'approche, bien qu'innovante, présente plusieurs limitations. Un expert est toujours requis pour identifier certains des facteurs non reconnus par le modèle, et la préparation des images s'avère assez longue. C'est une approche qui avait également été utilisée par Watson (2006) pour l'estimation des pièces usinées dans un contexte aéronautique. Plus récemment Ma, Sajadfar & Campos Triana (2014) ont introduit un aspect sémantique au modèle de coût basé sur les opérations permettant d'associer les opérations à

des coûts en fonction d'une base de connaissances et du contexte géométrique des éléments comme l'illustre la Figure 2.9. Ces récentes tendances sont notamment rendues possibles grâce aux nouvelles capacités de traitements de mégadonnées, de recherches sémantiques et d'apprentissage par machine.

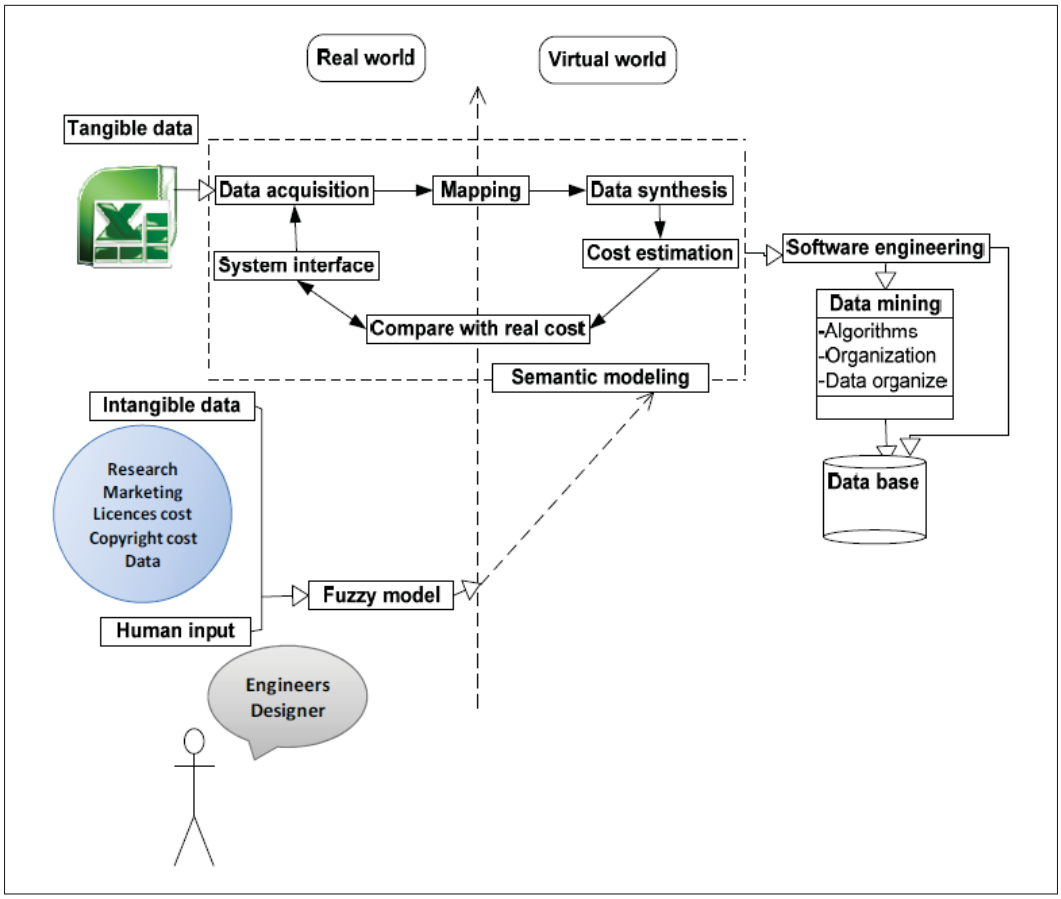

Figure 2.9 Concept d'un modèle de coûts sémantique
Tirée de Ma *et al.* (2014)

2.2.5 Les logiciels d'estimation

Parallèlement aux recherches universitaires, des logiciels d'estimation des coûts ont émergé sur le marché lors des dix dernières années. Pour ne citer que les plus connus :

- *aPriori*,
- *LeanCost*,
- *TechniQuote*,
- *Xometry*.

Les problèmes majeurs de ces différentes solutions sont sensiblement les mêmes. Ils se basent tous sur la construction d'un coût basé sur les opérations d'usinage par reconnaissance des surfaces tel qu'illustré par la Figure 2.10. Cela nécessite la mise en place de bases de données considérables contenant les machines, les outils et les paramètres de coupe optimaux liés à chaque opération. Bien que la plupart de ces logiciels viennent avec une base de données très complète, les entreprises doivent généralement passer de long mois à adapter cette base de données à leur propres procédés et parc machine quand cela est possible. Par exemple, *TechniQuote* ne permet pas une telle personnalisation, ce qui pose problème lors de l'attribution des paramètres de coupe qui ne correspondent pas à ce que la compagnie utilise habituellement.

Le second problème vient de la perte de temps amenée par leur utilisation. En tentant de reproduire la simulation d'usinage, l'estimateur se retrouve à faire le travail du programmeur en amont. De plus, comme signalé précédemment, la reconnaissance est parfois hasardeuse pour les pièces un peu plus complexes. L'utilisateur doit alors corriger les différentes erreurs produites par le logiciel. Pour avoir vu *TechniQuote* à l'œuvre chez un des partenaires, les coûts peuvent être très précis et exacts à condition de passer plusieurs heures par pièce, luxe que les estimateurs ne possèdent pas.

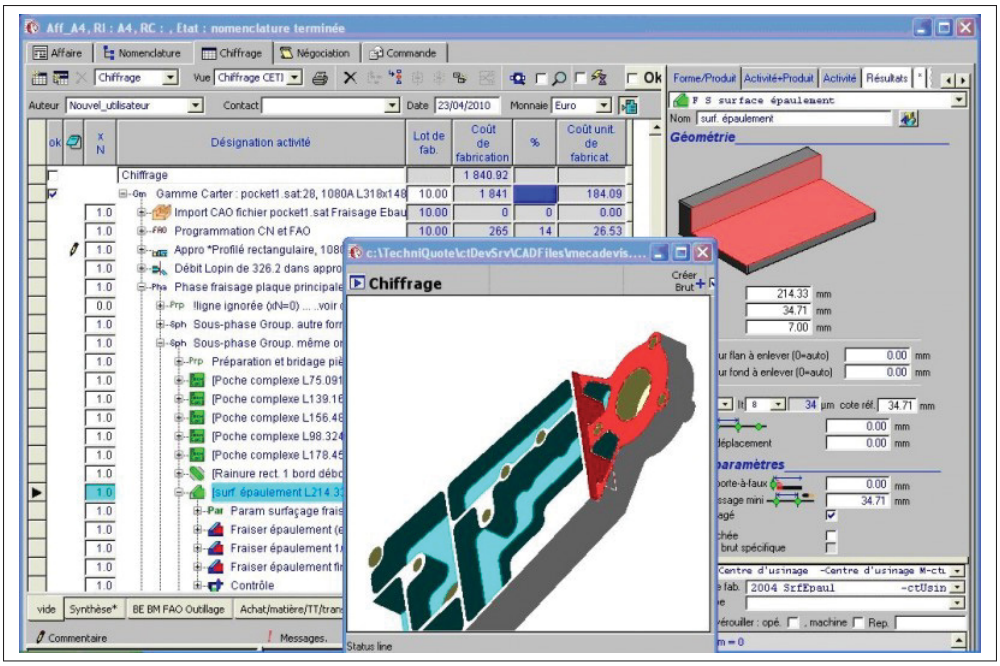

Figure 2.10 Exemple de logiciel d'estimation
Tirée du site internet Watif, 2017 http://watif.fr/page/techniquote

2.3 La gestion des connaissances numériques

La dernière décennie a connu des avancements intéressants concernant le traitement de grands volumes de données non structurées. Les entreprises comptent de plus en plus sur les documents numériques et les applications informatiques comme le mentionnent Alemanni, Destefanis & Vezzetti (2010). La conception et la fabrication assistée par ordinateur (CAO et FAO), les outils de gestion du cycle de vie des produits (PLM) et les ERP (*Entreprise Resource Planning*) sont largement utilisés. Néanmoins, l'interopérabilité entre ces applications est pratiquement inexistante. L'information se retrouve dispersée dans d'innombrables fichiers de différents formats, ce qui entraîne peu d'interconnexion, des doublons et des incohérences. On pourrait dire que les entreprises reposent sur une mine d'informations et de connaissances qu'elles ne parviennent pas à exploiter à leur plein potentiel. Le problème est même plus présent au niveau de l'ingénierie mécanique où une partie importante de l'information est contenue dans la géométrie des pièces. Une grande majorité des informations telles que les tolérances géométriques et dimensionnelles et les spécifications dépendent de leur contexte géométrique.

Malheureusement, ces données cruciales sont complexes à extraire et à interpréter depuis les dessins techniques alors que leur extraction serait très simple à partir d'un fichier numérique. Ces considérations et la volonté de regroupement des informations sonnent l'ère d'une nouvelle pratique en ingénierie : le modèle 3D enrichi.

2.3.1 Le modèle 3D enrichi

Le modèle 3D enrichi, ou MBD pour *Model-Based Definition*, tel que décrit par Quintana, Rivest, Pellerin, Venne & Kheddouci (2010), comprend la géométrie 3D ainsi que l'ensemble des détails sur la fabrication du produit (les PMI). Ces informations incluent notamment les dimensionnements géométriques, les annotations, le matériau, les spécifications, les finitions et tout autre renseignement relié à la fabrication. Cela permet d'avoir une représentation complète de la pièce dans un seul fichier. Historiquement, les dessins d'ingénierie étaient exigés pour fournir de tels détails, mais depuis 2003, grâce à la norme ASME Y14.41-2003 (qui fut révisée en 2012), l'utilisation des modèles 3D annotés est standardisée et approuvée. La Figure 2.11 montre un exemple de modèle 3D enrichi.

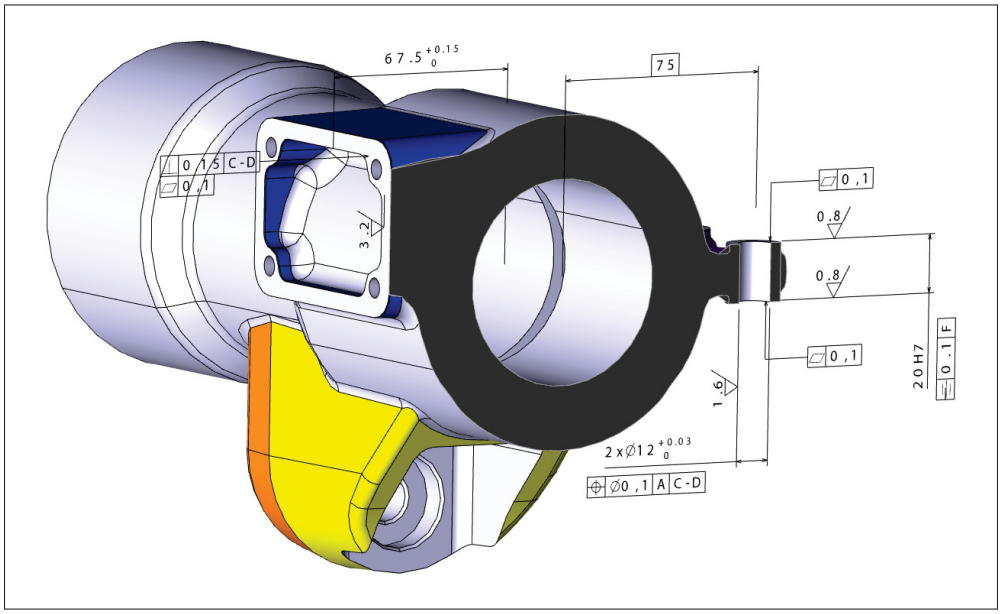

Figure 2.11 Exemple de modèle 3D enrichi

Liu & Qiao (2012) montrent les bénéfices du MBD et son utilisation dans les industries d'usinage. Selon Venne (2009), de plus en plus de compagnies aéronautiques et automobiles se tournent vers le MBD et prêchent cette pratique lorsqu'il est question de réduire les temps de conception et de rassembler numériquement toutes les informations au même endroit. Il convient de noter que cela est possible grâce au respect croissant des normes internationales dans l'industrie et à la capacité logicielle de transposer l'information sans perte de détails. L'arrivée de nouveaux formats de stockage tels que le PRC et le JT facilitent grandement cette transition qui proposent des fichiers plus petits, mais non dégradés en données comme le suggère Kheddouci (2010). En effet, le format, dit de bas niveaux, PRC se charge d'encoder le modèle pour offrir la représentation exacte de la géométrie tout en préservant la topologie native lors de sa reconstruction. De plus, il est capable d'interpréter toutes sortes de données non géométriques comme les tolérances, les annotations, les références, les symboles de rugosités, etc. Enfin, les spécifications du PRC, sont maintenant standardisées par la norme ISO 14739-1 :2014.

2.3.2 Les moteurs de recherche géométrique

Cette prolifération des données numériques a créé le besoin de moteurs de recherche et il existe près d'une cinquantaine de moteurs de recherche d'entreprise créée par Oracle, SAP ou Dassault par exemple. Cependant, ils sont majoritairement limités à l'indexation des éléments alphanumériques qui ne peuvent être appliqués aux modèles 3D. Plusieurs approches d'indexation des modèles 3D et des dessins techniques ont été proposées dans des articles scientifiques dans le but de développer des moteurs de recherche basés sur la géométrie. Peu de ces applications ont franchi le stade de la recherche universitaire. En outre, les méthodes s'appuyant sur la similarité géométrique pour estimer un coût sont encore plus rares et souvent très limitées (Hillsman *et al.*, 2013), car une mesure standard et généralisée des différences entre les modèles 3D est requise. Les travaux de Msaaf, Maranzana & Rivest (2007), de Brière-Côté & Rivest (2010) et également de Brière-Côté, Rivest & Maranzana (2012) mettent en avant une nouvelle approche dans la comparaison des modèles CAO et dans la mesure de leurs différences.

Rapport-Gratuit.com

Ces avancées ont rendu possible la recherche basée sur la géométrie grâce à l'amélioration de l'interprétation des modèles 3D. Ainsi, certains logiciels comme 3DPartFinder sont nés de ces travaux de recherche et sont capables d'indexer directement les éléments géométriques. Ces logiciels se basent sur la représentation par les frontières des éléments et sont caractérisés par un degré de précision plus élevé, un indice plus concis et de meilleures performances. Comme indiqué par Xu *et al.* (2006), la ressemblance et la réutilisation des connaissances sont des domaines sous-exploités alors que plus de 70 % des produits personnalisés peuvent être élaborés à partir des ressources existantes. Cela démontre bien l'intérêt d'utiliser la similarité.

2.4 Les connaissances tacites

Il est important de rappeler qu'une des parties du travail de recherche se concentre sur la gestion des connaissances tacites des estimateurs et sur la meilleure façon de les intégrer dans notre modèle. Les systèmes experts ont déjà été abordés dans l'état de l'art sur les modèles d'estimation des coûts, mais il nous semble important de revenir brièvement sur ce sujet et d'en faire un point universitaire.

Premièrement, la gestion des connaissances peut être défini comme étant le processus de création, d'enrichissement et de regroupement des savoirs mettant en œuvre l'entièreté d'une organisation. Cela se traduit généralement par un ensemble de processus, dispositifs et outils visant à faciliter la collecte, l'organisation, le stockage et l'échange de connaissances entre individus et groupes à l'intérieur et à l'extérieur d'une entreprise. Un tel système tente de gérer à la fois les connaissances déjà présentes mais aussi la création de nouvelles connaissances. On y retrouve souvent trois composants, un composant humain, un autre attaché aux processus et enfin des outils techniques qui soutiennent la démarche. Face à l'abondance d'informations de tels systèmes sont aujourd'hui indispensables dans les entreprises. La maîtrise de ces connaissances en permet une meilleure exploitation, aidant les prises de décisions et facilitant l'adaptation aux changements. Ces systèmes nécessitent cependant de bien comprendre la nature des connaissances et leur origines possibles.

Dans le modèle de connaissance mis en avant par Nonaka (1994), celles-ci sont distinguées en deux catégories : tacite et explicite. Selon ce dernier les connaissances explicites et tacites sont complémentaires et l'intéraction entre ces deux types de connaissance est primordiale dans la création de nouvelles connaissances. McInermey (2002) ré-affirme cette dualité des connaissances de tout être humain. L'ensemble des connaissances d'un individu se manifeste alors à travers ses habitudes et routines, ses observations ou encore ses intuitions et inspirations. Une connaissance explicite est organisée, structurée, et peut être facilement partagée, car elle est élucidable et stockée dans un document, une base de données. À l'inverse, une connaissance tacite, qui relève de l'intuition, de l'expérience, sera difficile à articuler et à transmettre. Cette même connaissance tacite comporte deux volets : le cognitif qui concerne les idées reçues, les croyances et le volet technique qui regroupe le savoir-faire, les compétences.

Selon d'autres études, les connaissances peuvent également se diviser en deux autres catégories, tel que souligné dans le travail de Tilotma & Kelkar (2012) et de Proteau (2016), les connaissances procédurales et les déclaratives. Les connaissances procédurales se caractérisent par leur structure de cause-conséquence et sont souvent traduites par une liste de règles de décision. Elles sont faciles à construire et à mettre en place. C'est un modèle qui se retrouve également pour l'estimation des coûts. En effet, Rubio *et al.* (2013) utilisent les règles de décision pour calculer le coût d'une pièce en choisissant les paramètres de coupe optimaux pour celle-ci. Il va sans dire que notre modèle pourrait tirer profit de l'utilisation des connaissances procédurales des experts pour certains aspects et choix concernant une nouvelle pièce. Voici quelques exemples d'utilisation : le choix de la machine ou la gestion des spécifications et des post-traitements. Cependant, la structure cause-conséquence ne couvre qu'une partie des connaissances. En effet, l'ensemble des connaissances plus complexes et plus subtiles dites déclaratives ne sont pas supportées par ce type de structure. Les connaissances déclaratives sont bien plus difficiles à transcrire et à extraire, car elles se basent souvent sur un ensemble d'informations et de concepts mêlés à l'expérience personnelle de l'expert. La connaissance qu'un trou incliné sur une certaine surface gauche soit plus difficile à réaliser est un exemple de connaissance déclarative.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Comme vous pouvez le constater plusieurs classification des connaissances ont été étudiées dans les dernières décennies et bien qu'elles soient toutes valides, celle mise en place par Nonaka (1994) reste une des plus fidèles. Le modèle SECI (Socialisation, Externalisation, Combinaison, Internalisation) mis en place par Nonaka Takeuchi (1995) se base sur l'intéraction entre le tacite et l'explicite et montre comment les connaissances peuvent se transférer. Ainsi ils proposent 4 façons différentes à travers lesquelles la connaissance peut être transformée, partagée :

- la Socialisation, de tacite à tacite. La connaissance est transmise par la pratique, l'imitation, l'observation ;
- l'Externalisation, de tacite à explicite. Ce processus demande beaucoup de temps car il implique le transfert de connaissances tacites en documents, diagrammes, modèles, afin qu'elles puissent être comprises plus facilement dans l'entreprise. Plusieurs méthodes pour expliciter ces connaissances existent mais elles ne couvrent qu'une petite partie du tacite ;
- la Combinaison, d'explicite à explicite. On tente de d'assembler des données explicites pour créer, clarifier de nouvelles connaissances explicites. Cela passe par la synthèse, le tri, la recontextualisation ;
- l'Internalisation, d'explicite à tacite. Cela correspond à l'appropriation des connaissances par les personnes. En utilisant des données explicites, les connaissances sont internalisées modifiant les connaissances tacites existantes de l'individu. Cela passe par la lecture de documents ou manuels par exemple.

Dans ce modèle, les connaissances ne cessent de se convertir et de s'accumuler dans une entreprise au fur et à mesure que les individus discutent, collaborent, travaillent. Le processus est alors perçu comme un mouvement perpétuel et dynamique de connaissances, appelé la spirale des connaissances, plutôt que comme un modèle statique. La Figure 2.12 montre une représentation visuelle de ces processus continus qui se chevauchent.

Pour notre part, notre outil d'aide pourrait se placer au niveau du processus d'externalisation et se comparer à un système expert, car il tente de répliquer le raisonnement de l'estimateur et de faire ressortir les connaissances tacites renfermées dans les données passées. Afin de trouver le

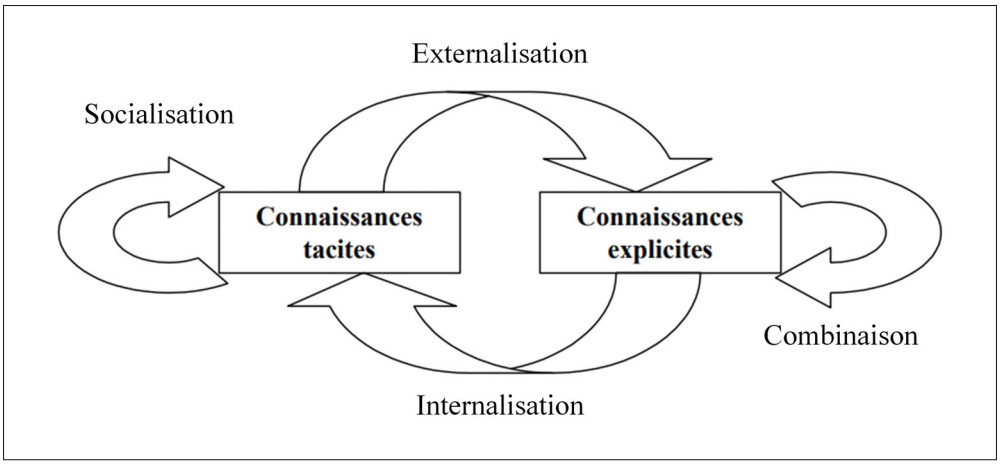

Figure 2.12 Modes de création des connaissances
Adaptée de Nonaka Takeuchi (1995)

prix des nouvelles pièces, notre modèle se reposera sur une base de connaissances constituées des pièces historiques et des coûts qui leur sont associés. Selon les caractéristiques données par Tripathi (2011), notre outil correspond à cette catégorie. La représentation des connaissances des experts constitue le défi majeur dans la création d'un tel système et plusieurs méthodes ont été développées dans le but de construire cette base de connaissances. Bien que des méthodes aient été mises en place dans le but de représenter ces connaissances, comme l'ontologie mise en avant dans les travaux de Saa, Garcia, Gomez, Carretero & Garcia-Carballeira (2012) ou encore la méthode des frames introduite par Minsky (1974), nous ne les utiliserons pas forcément dans notre travail. Cependant tout nous porte à croire qu'une bonne partie de ces informations déclaratives sont en fait emprisonnées dans les différentes estimations que font les experts et que nous pourrons les réutiliser en faisant appel à la similarité.

CHAPITRE 3

CADRE DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES

La revue de littérature que nous avons effectuée nous permet de mieux comprendre la problématique et la direction à prendre pour ce travail de recherche. Cela nous autorise à énoncer les différentes hypothèses retenues et à mieux délimiter notre cadre de travail. Il seront tous deux présentés dans ce chapitre au lecteur.

3.1 Hypothèses retenues

À la lumière des trois problématiques de recherche que nous avons soulevées nous pouvons émettre quatre hypothèses quant à la composition du coût d'une pièce, son processus d'estimation et l'utilisation de la similarité :

1. Le coût d'une pièce usinée se compose de trois facteurs majeurs : la matière brute, l'usinage et les post-traitements ;
2. Le coût d'usinage dépend du volume à usiner, de la géométrie, des annotations et des spécifications ;
3. Les connaissances tacites, l'expérience et le contexte jouent un rôle crucial dans le processus : chaque estimateur chiffre différemment ;
4. Deux pièces similaires géométriquement ont une fabrication et un prix semblables.

3.2 Cadre de recherche

Le projet Lean 702 a une étendue très large allant de la gestion des connaissances à la mise en place d'un démonstrateur de chiffrage. Il est donc nécessaire de bien définir les délimitations de ce mémoire qui se concentre uniquement sur une partie précise du projet. En encadrant correctement la portée de celui-ci, il sera plus aisé de le mener à terme. Le cadre de notre recherche se définit par les points suivants :

1. Nous nous limitons aux pièces usinées en aluminium ou en acier essentiellement ;

2. Les pièces sont issues d'usinage conventionnel ou CNC ;
3. Les procédés et les spécifications sont négligés, car ils sont généralement propres à chaque entreprise ;
4. Nous considérons que les estimations et les avis des experts industriels sont représentatifs et fiables ;
5. Nous assumons que les modèles 3D sont des sources d'informations exactes, de même que les PDF attachés aux pièces ;
6. Nous considérons que les fichiers Excel contenant les informations des bruts et des différents coûts et temps de fabrication sont fidèles et justes ;
7. Nous nous limitons au traitement des fichiers PDF structurés et des modèles 3D au format *Catia* ou *Solidworks* (CATPart ou SLDPRT), car ce sont les types d'entrants qui possèdent les informations sémantiques les plus riches ;
8. Les informations sont extraites des modèles 3D grâce à l'API *Hoops Exchange* de la société *Techsoft* et de leur démonstrateur et grâce au logiciel CATIA ;
9. Pour le CHAPITRE 6, nous considerons seulement des pièces de format plaque. Ce sont les seules auxquelles nous avons accès en nombre suffisant ;
10. Sauf indication contraire, les tolérances géométriques des pièces respectent la norme ASME Y14.5 ;
11. L'adaptation du modèle présenté se concentrera seulement sur une partie des coûts, à savoir, le coût d'ébavurage, d'usinage et de la matière brute.

Ces assomptions et décisions nous permettent de nous concentrer sur le développement d'un modèle adéquat et sur une preuve de fonctionnement sans devoir prendre en considération toutes les variables rentrant en compte pour les cinq différents partenaires industriels.

CHAPITRE 4

ÉTUDE EN INDUSTRIE

À la suite de la revue de la littérature, nous pouvons conclure que l'estimation des coûts en milieu industriel est un problème complexe. Pour bien saisir cette réalité, il est nécessaire de posséder une vision globale des façons de faire et des méthodes propres aux compagnies. De plus, une grande partie des connaissances demeurent implicites et les estimations dépendent fortement de leur environnement. Ceci étant dit, pour parvenir à construire un modèle adéquat, nous devons récupérer le plus de données possibles auprès des partenaires industriels. Cette collecte renferme plusieurs aspects importants pour la mise en place d'une bonne solution. La première phase d'échange avec les estimateurs s'intéresse au fonctionnement général du processus de cotation. La deuxième étape va plus loin et vise à extraire les modèles utilisés ainsi que les paramètres considérés. Cette deuxième phase sera donc unique pour chacun des partenaires. Enfin, la dernière étape est le résultat d'un exercice de cotation par les experts industriels au sein de chaque entreprise dans le but d'évaluer l'influence des connaissances tacites.

Ayant pour objectif de mener à bien cette collecte de données et de pouvoir confronter l'état de l'art avec les observations du monde industriel, une série de visites et de discussions ont été planifiées avec les estimateurs des différentes compagnies partenaires. Lors de ces visites, nous assistons l'expert dans sa tâche en essayant au maximum de le questionner et de l'inciter à expliciter ces choix. Ces exercices ont servi plusieurs objectifs :

- comprendre la problématique du chiffrage des pièces usinées en aéronautique dans son ensemble sans se limiter à l'usinage ou la fabrication ;
- étudier les différentes façons d'estimer des entreprises ;
- cerner les différents paramètres pris en compte et leur interaction ;
- comprendre et mesurer qualitativement l'influence des connaissances tacites et de l'environnement.

Les trois sections qui suivent font le compte-rendu de ces visites. Elles permettent de mieux saisir les points clés du chiffrage en milieu industriel et les enjeux qui leur sont liés.

4.1 La procédure d'estimation

Des les premières rencontres d'observations et de cotations, des habitudes et des techniques sont mises en évidence. Celles-ci sont partagées par tous les partenaires ayant un rôle de sous-traitant et de fabricant. Stelia North America agit différemment, endossant plutôt un rôle de donneur ordre demandant des soumissions. C'est pour cette raison qu'il sera traité séparément.

Pour ce qui est des autres partenaires industriels, malgré leurs diversités managériale, financière ou encore sectorielle, la procédure d'estimation repose sur les mêmes points clés qui sont les suivants :

- les soumissions et les pièces sont triées par rapport aux capacités de l'entreprise (parc machine, temps disponible, etc.) ;
- des soumissions sont envoyées le plus souvent possible pour connaitre exactement certains prix comme le matériau ou les post-traitements ;
- la réponse finale est toujours affectée par des facteurs stratégiques qui varient en fonction du client, de l'importance du contrat et de la situation financière de la compagnie ;
- le prix vendant n'est pas le même que le prix coutant ;
- les données historiques et la réutilisation des connaissances sont peu utilisées ;
- des erreurs arrivent souvent, mais dans la majeure partie des cas elles s'équilibrent au niveau macroscopique. Une pièce sur-cotée compensera une pièce qui a été sous-cotée plus tôt par exemple ;
- les prises de risques sont limitées et les industriels ne s'attardent pas à estimer une pièce qui ne leur serait pas assez rentable. Ainsi, plus le rapport du risque d'erreur lors du chiffrage sur le prix de vente est élevé, plus la soumission a de chances d'être rejetée dès le début.

Le diagramme de flux de la Figure 4.1 présente la procédure de chiffrage partagée par les trois premiers partenaires industriels, Arconic, Techniprodec et Conception Génik.

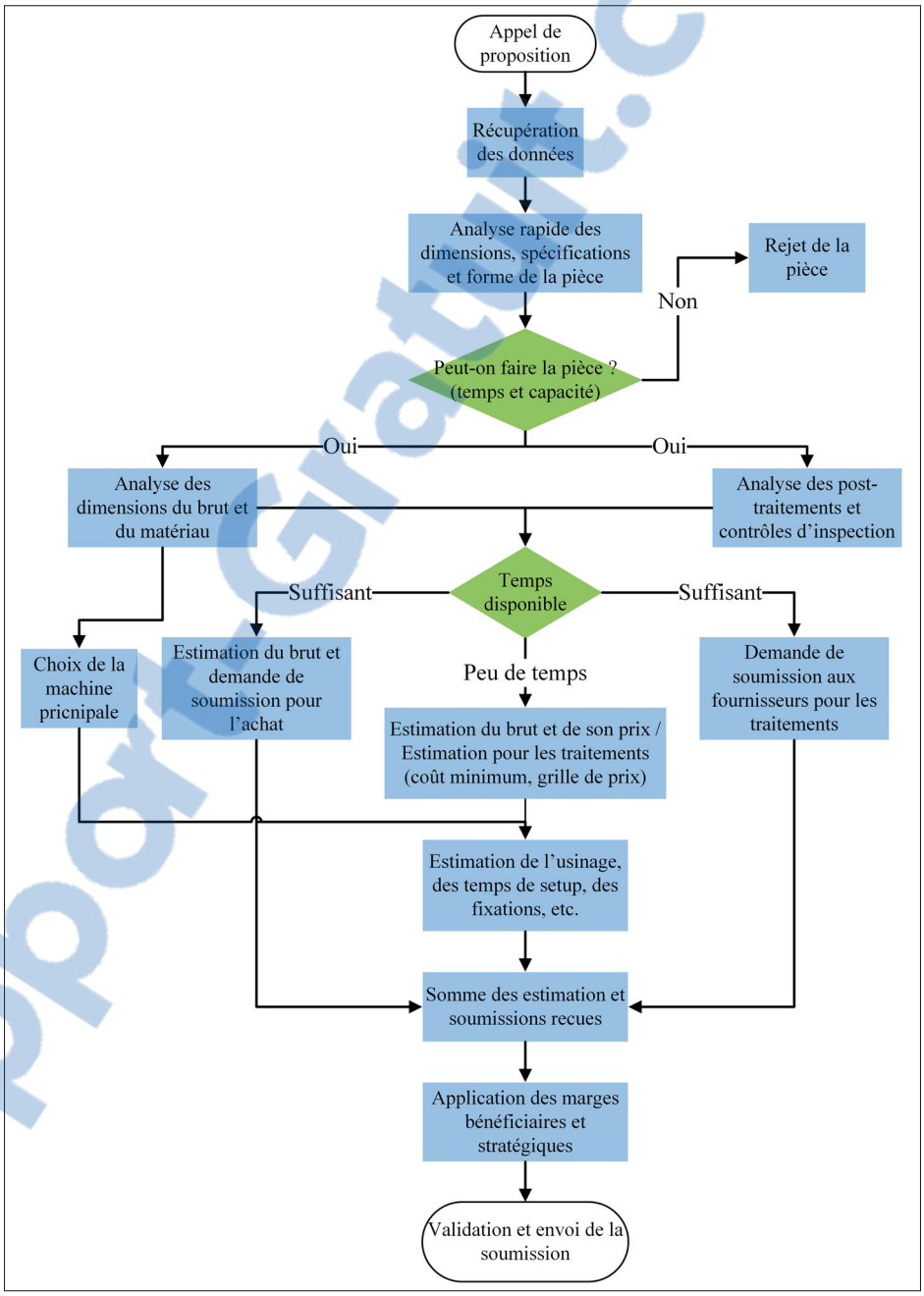

Figure 4.1 Procédure de chiffrage des partenaires industriels Arconic, Techniprodec et Conception Génik

Rapport-Gratuit.com

La Figure 4.2 résume le processus tel qu'il est effectué par Stelia. L'approche est différente puisqu'elle récupère une liste de soumissions et doit ensuite choisir un ou plusieurs clients pour les pièces à fabriquer. Ce choix est aiguillé par les prix proposés pour chacune des pièces, mais aussi par d'autres critères comme les délais de livraison, la renommée et le gage qualité du fabricant.

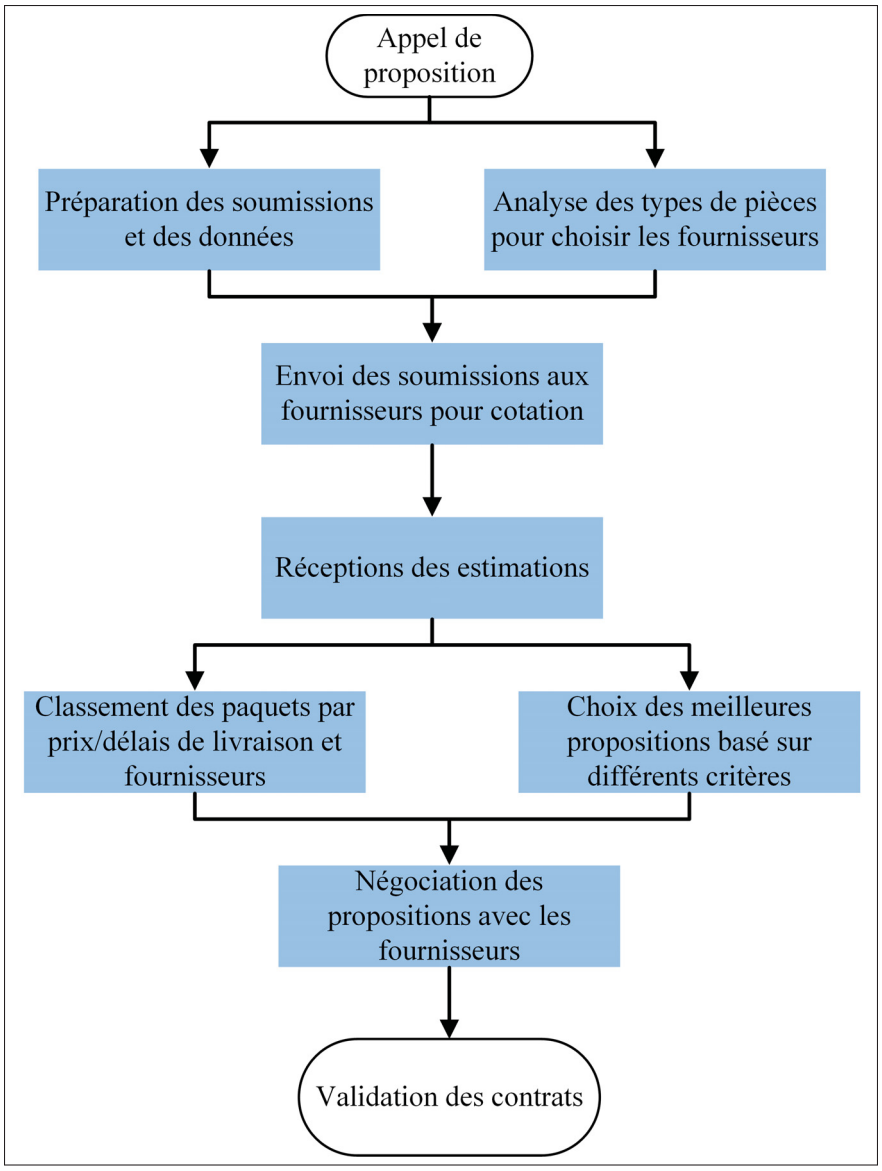

Figure 4.2 Procédure de chiffrage pour Stelia

À la suite à cette première étape, on remarque que le corps du processus change peu et que tous, excepté Stelia, adoptent le même cheminement pour le traitement des soumissions. À ce niveau, les principaux changements que nous avons pu observer concernaient généralement les décisions stratégiques et commerciales vis-à-vis des offres et le rôle de l'estimateur qui varie d'un partenaire à l'autre. Ce constat est tout à fait justifiable au regard des différentes philosophies et modes de fonctionnement parmi les partenaires. Le travail de l'expert n'a souvent pas le même impact et n'est pas traité de la même façon partout.

Ainsi même si le processus qu'ils appliquent en recevant une soumission est semblable, la gestion de l'estimation une fois terminée sera différente. Dans certains cas, l'expert laisse la main à ses supérieurs qui s'autorisent la révision et l'ajustement de son estimation en fonction de critères marketings et stratégiques. Dans d'autre cas, le travail de l'estimateur continue jusqu'à l'envoi de la soumission au client et les prises de décisions se font conjointement entre l'expert et le reste de son équipe. Ainsi, en fonction des partenaires, le rôle tenu par l'estimateur dans le processus global de chiffrage change et son intervention est plus ou moins marquée. Bien que le processus reste assez semblable, le flux d'informations, les intéractions et l'impact du travail de l'expert est lui amené à varier. Il est tout aussi nécessaire d'étudier ces aspects afin de comprendre le problème dans sa globalité et aider nos partenaires à améliorer leurs différents processus. C'est notamment autours de ces axes de recherche que se concentre le travail de nos collègues de l'université du Québec à Montréal.

De même, certains sont plus enclins à prendre des risques, alors que d'autres jouent la sécurité et choisissent avec parcimonie leurs soumissions ne gardant que les plus concluantes. Dans le même ordre d'idée, un des partenaires accepte les contrats seulement pour remplir l'occupation de ces machines, car la majorité de leur production vient de commandes internes. De ce fait, il aborde bien différemment ces prises de décision.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.2 Les modèles utilisés

Après avoir élicité les procédés d'estimations appliqués chez nos partenaires industriels, une deuxième série d'estimation est effectuée. Celle-ci où l'accent est mis sur les modèles et les paramètres pris en compte afin de calculer les coûts des pièces. Lors de ces rencontres, des produits usinés typiques à chaque partenaire sont étudiés. À travers cette démarche, nous cherchons également à transcrire une partie des connaissances tacites des experts en données explicites. Nous nous intéressons plus particulièrement aux connaissances procédurales qui vont nous permettre de créer des relations entre les divers paramètres. Si les données s'y prêtent, certaines de ces informations pourront être représentées sous une structure « cause-conséquence ». Les résultats de ce processus se trouvent aux sections 4.2.1 et 4.2.2.

4.2.1 Observations générales

De la même manière que la procédure d'estimation était partagée par les partenaires, les modèles de calcul et les paramètres examinés sont également très similaires et ce, quelque soit l'entreprise observée, pourvu que l'on reste sur de l'usinage CNC ou conventionnel. Par conséquent, après plusieurs visites et estimations de pièces, nos premières observations peuvent être expliquées. Une partie d'entre elles correspondent à ce qui a été lu lors de la revue scientifique, d'autres non. Voici une liste de ces constatations :

- il existe au moins deux méthodes pour faire la cotation. Le choix de la méthode dépend essentiellement du temps disponible, ainsi que d'autres facteurs, tels que la complexité de la pièce ou la valeur du contrat ;
- la méthode plus détaillée n'est utilisée que sur les pièces jugées risquées par l'estimateur ;
- la mesure de ce risque est purement subjective et se base en grande partie sur ses habitudes et son domaine d'expertise ;
- il y a toujours une proportion significative de connaissances tacites qui entre en compte ;
- l'approche par enlèvement de volume pour le calcul du temps d'usinage est la plus adoptée ;

- le temps d'usinage peut être divisé en temps par opération et temps d'installation correspondant, ou alors gardé global par machine ;
- les modèles ne sont pas détaillés au point de calculer les trajectoires d'outil ;
- dépendamment des entreprises, plus ou moins de coûts sont calculés.

D'après ce que nous remarquons, il existe tout de même de grandes disparités entre les modèles universitaires et ceux de l'industrie, ce qui confirme le besoin d'une approche novatrice qui permettrait d'allier la réalité des entreprises et l'approche académique. Comme mentionné par Molcho, Cristal & Shpitalni (2014), ces dernières n'emploient guère les méthodes et solutions disponibles en dépit de leur abondance. Cela vient principalement du fait que les efforts nécessaires pour garantir l'exactitude des résultats sont d'ordinaire considérés trop importants par rapport aux économies potentielles. De plus, les démarches de mise en place sont souvent perçues comme étant trop complexes et trop fastidieuses. En conséquence, les entreprises favorisent unanimement l'usage de recettes personnelles associées le plus souvent à un chiffrier.

Pour ce qui est des modèles, tous nos industriels divisent le coût en plusieurs catégories distinctes, trois ou quatre dans la plupart des cas : le coût du matériau brut, le coût de l'usinage, le coût des post-traitements et les coûts divers pouvant regrouper les outils, les fixations, le transport, la programmation, etc. L'équation (4.1) traduit ces divisions du coût. C'est une approche que Boothroyd & Reynolds (1989) soulèvent dans leurs études, ainsi que Jung (2002) qui analyse également la distribution de ces coûts. Nos observations, après plusieurs estimations, concordent avec cette répartition illustrée en Figure 4.3.

$$C_{piece} = C_{mat} + C_{usi} + C_{post} + C_{divers} \tag{4.1}$$

Les variations entre les modèles proviennent majoritairement de l'utilisation des paramètres entrants pour calculer les prix et des coûts sortants considérés. Toutefois, l'architecture reste similaire pour toutes les entreprises.

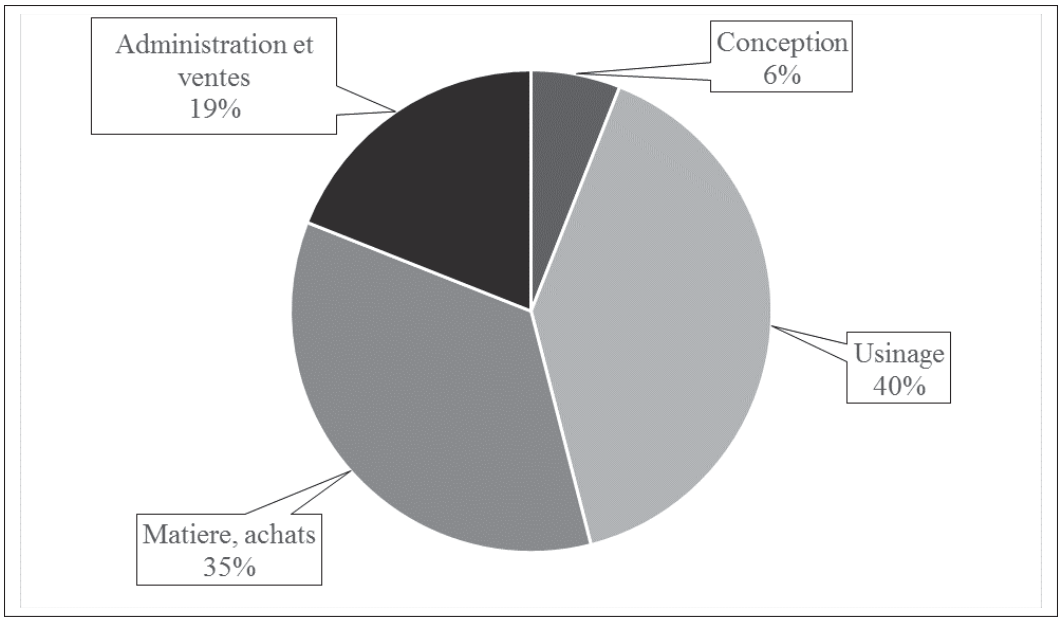

Figure 4.3 Distribution des coûts pour une pièce usinée

4.2.2 La diversité des modèles

Ces exercices de chiffrage nous permettent donc de rendre plus explicites les paramètres considérés lors des estimations chez les partenaires industriels. De même ceux-ci nous aident à bien mieux cerner la multitude de règles de décisions, d'interactions et de relations menant de ces entrants, à la décomposition et au calcul des coûts sortants. Les résultats de ces exercices s'articulent autour de trois points majeurs que nous allons détailler ci-dessous : les entrants, les coûts sortants et les interactions.

4.2.2.1 Les entrants

Premièrement, chacune des compagnies s'appuie sur une liste de paramètres entrants venant à la fois des pièces, mais aussi de l'entreprise. Ces entrants sont le point de départ de la réflexion des experts et contiennent les informations dont ils ont besoin pour mener à bien leurs calculs de coût. Notre analyse conclut qu'en ayant accès aux mêmes données, les industriels se basent tous sur une liste d'entrants semblable. Si les paramètres d'entrée sont identiques, l'influence et la portée de chacun d'entre eux diffèrent entre les compagnies. Le Tableau 4.1 présente

les principaux entrants considérés par les industriels. En nous tablant sur l'occurrence de ces facteurs dans les cotations et sur les discussions avec les experts, nous attribuons une note représentative de leur importance sur une échelle de 0 (peu utilisé) à 5 (toujours employé).

Tableau 4.1 Importance qualitative des différents entrants pour l'estimation des coûts

Paramètre	**Importance**			**Moyenne**	**Variance**
	Industriel 1	Industriel 2	Industriel 3		
Alliage	5,0	5,0	5,0	5,0	0,0
Traitement du brut	4,5	4,0	4,0	4,2	0,5
Format du brut	3,5	3,5	4,0	3,7	0,5
Géométrie de la pièce	5,0	5,0	5,0	5,0	0,0
Volume final	4,0	4,0	4,0	4,0	0,0
Dimensions de la BE	4,5	4,5	4,0	4,3	0,5
Tolérances	2,5	3,5	4,5	3,5	2,0
Annotations	3,0	4,0	4,0	3,7	1,0
Finitions de surface	3,5	4,0	3,0	3,5	1,0
Spécifications	2,5	2,5	0,5	1,8	2,0
Taille du lot	4,0	2,5	2,0	2,8	2,0
Outils disponibles	2,5	3,5	4,0	3,3	1,5
Machines disponibles	2,5	3,0	4,0	3,2	1,5

On remarque alors deux types de comportements pour ces entrants :

- entrant considéré avec une importante égale par tous ;
- entrant ayant une importance changeante d'un candidat à l'autre.

À titre d'exemple, l'alliage est un entrant crucial à l'unanimité, car il influe énormément sur le prix du brut, le type de machine à utiliser, l'usinabilité, etc. par contre, le rôle des spécifications ou de la taille du lot dépendra du contexte. L'entreprise 3 travaille généralement sur des pièces sans spécifications externes, il est donc normal que celles-ci ne soient que très peu prises en compte. L'entreprise 2, quant à elle, produit majoritairement des pièces aéronautiques où ces spécifications sont omniprésentes, ce qui explique leur plus grand degré d'intérêt dans ce cas. Les annotations, les tolérances ou encore les machines disponibles présentent des importances variables suivant l'entreprise où l'on se place et leur domaine d'activité. Les industries du

secteur aéronautique possèdent généralement de l'outillage de haute précision et accorde donc moins d'importance aux différentes tolérances des pièces car celles-ci restent souvent dans les standards aéronautiques et la capabilité de leurs machines. Pour une entreprise extérieure à ce milieu, comme l'industriel 3, il est tout à fait logique de constater qu'il accorde un plus grand intérêt aux annotations et aux tolérances.

On peut donc noter que les six premiers paramètres dominants sont les mêmes à travers les trois entreprises et sont tous directement reliés au brut ou à l'usinage. L'importance des autres entrants va dépendre plutôt du contexte et de l'environnement, ce qui tend à confirmer la troisième hypothèse faite au CHAPITRE 3.

4.2.2.2 Les coûts sortants

Deuxièmement, la granularité des coûts sortants change d'une compagnie à l'autre suivant son secteur spécifique d'usinage, sa gestion interne et sa stratégie commerciale. On distingue cette fois-ci un comportement ternaire différent pour chacun des coûts et des compagnies :

- coût toujours considéré (état 1) ;
- coût jamais pris en compte (état 0) ;
- coût dont la prise en compte dépend des facteurs entrants ou intermédiaires et des relations employées par les experts (état 2).

Le Tableau 4.2 présente les principaux coûts sortants des industriels accompagnés de leur considération par les entreprises pour chacun d'entre eux.

Tableau 4.2 Liste des coûts sortants pour les industriels avec leur considération associée

Coûts sortants	Industriel 1	Industriel 2	Industriel 3
Matière brute	1	1	1
Usinage	1	1	1
Setup outil	2	1	1
Setup machine	2	1	1
Ébavurage	1	1	2
Post-traitements	1	1	1
Inspection	2	1	2
Manutention	0	2	1
Gestion	2	1	0
Programmation	2	1	1
Achat outils	2	2	0
Achat fixations	2	2	2
Emballage	0	1	0

De la même manière que pour les entrants, les trois coûts principaux identifiés dans l'équation (4.1) sont toujours évalués par l'ensemble des partenaires (soit la matière brute, l'usinage et les traitements). Néanmoins, le reste des coûts change d'un industriel à l'autre. Dans le cas de l'entreprise 1 par exemple, les temps d'installation machine et outils sont inexistants si les pièces sont fabriquées sur un modèle de machine précis. L'entreprise 2 et 3, qui ne possèdent rien de tel, doivent, pour leur part, toujours comptabiliser ces temps. Sans surprise, l'industrie ayant la plus grosse structure est celle qui regroupe le minimum de coûts sortants de type 1 (toujours considérés) et le plus de coûts sortants de type 2 (dont l'importance varie). À l'inverse, l'entreprise la plus « petite » est celle qui prend en compte à chaque fois la quasi totalité des coûts indiqués. La taille de l'industriel 3 se trouvant juste entre les deux, celui-ci possède une structure de coût intermédiaire. Ce constat est un reflet direct de la gestion interne des estimations et plus généralement des finances de chaque partenaire. Cela contribue à renforcer la validation de nos hypothèses concernant la décomposition du coût et l'influence du contexte.

4.2.2.3 Les interactions et règles de décisions

Le dernier point concerne le cheminement parcouru par les experts pour évaluer les différents coûts sortants à partir d'entrants identiques. Chacun des estimateurs s'appuie donc sur ses propres méthodes pour y parvenir, utilisant parfois des paramètres intermédiaires, de simples calculs mathématiques, des règles de décision ou bien des relations plus complexes. Ainsi, dans le but d'estimer le temps d'usinage, un des experts combine explicitement le volume de matière enlevée par unité de temps avec le volume à retirer pour la pièce. Ce taux d'enlèvement de matière est un paramètre intermédiaire choisi tacitement par l'estimateur. Pour le déterminer, l'estimateur se base sur des facteurs tels que l'alliage, la géométrie ou encore la machine utilisée. Le temps d'usinage est donc obtenu globalement pour la pièce. Un autre estimateur associe implicitement un temps d'usinage pour chacune des faces du produit sans considérer d'intermédiaires. Le temps total résultant est alors la somme des temps d'usinage individuels pour chacune des faces.

Ce court exemple tente de familiariser le lecteur à la nature complexe des interactions entre les paramètres et sur les écarts entre les méthodes d'obtention possibles des coûts. La Figure 4.4 présente un bref aperçu visuel de ces différentes interactions que nous avons pu constater pour le coût d'usinage et le coût matière. Parallèlement, nous avons pu transformer certaines des connaissances tacites des experts en connaissances explicites concernant les choix effectués. Le plus souvent ces relations se traduisent sous la forme « cause-conséquence » (« SI [condition] ALORS [résultat] ») et peuvent donc être représentées par des règles de décision. Le Tableau 4.3 met en évidence de courts exemples appliquant certaines de ces règles et méthodes employées par les estimateurs.

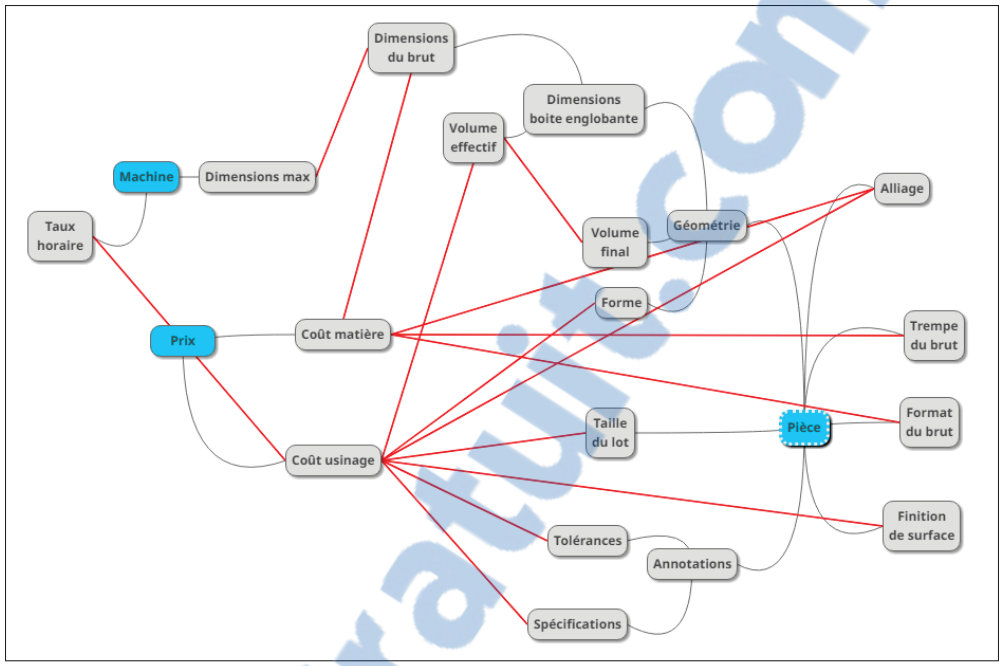

Figure 4.4 Carte des intéractions entre les paramètres pour les coûts matière et usinage

Tableau 4.3 Extraits et exemples des règles de décision et méthodes employées par les estimateurs

Paramètre	**Règles ou méthodes**
T_{prog}	• *SI* Taille de lot < 10 *ALORS* $T_{prog} \neq 0$ • Programmation fonction de la taille et géométrie
Machine	*SI* $L_{brut} > 37$ in *ET* Matière = Alu *ET* Fraisage *ALORS* Machine = MAG3
$Prix_{mat}$	*SI* alliage $= 6061$ *ALORS* $Prix_{mat} = 3,5$ \$/lb
Traitements	• *SI* Grenaillage *ALORS* Fournisseur = « Fournisseur1 » • *SI* Peinture *ALORS* Traitement interne • *SI* Anodize *ALORS* Coût minimum $= 200$\$
Transport	*SI* $W > 100$ lb *OU* $V_{final} > 3000$ in^3 *ALORS* transport $\neq 0$\$
T_{setup}	• *SI* Machine $\neq$ (MAG1 *OU* MAG3) *ALORS* $T_{Setup} \neq 0$ • Setup fonction des outils et de la géométrie
Tolérances	*SI* trous précis *ALORS* Ajout opération de « Honing »
Coût outils	• *SI* Matière = Titane *ALORS* Coût outils $\neq 0$\$ • *SI* $T_{usi} > 360$ min *OU* $V_{remove} > 4000$ in^3 *ALORS* Coût outils $\neq 0$\$ • *SI* lot > 100 *ALORS* Coût outils $\neq 0$\$

Rapport-Gratuit.com

4.3 Influence des connaissances tacites et de l'expertise

Les résultats des estimations des produits usinés par les experts au sein des différentes compagnies renferment une grande quantité d'informations déterminantes dans le développement de notre modèle comme nous avons pu le montrer précédemment. Ces différentes estimations peuvent également nous permettre de mesurer l'impact et l'influence des connaissances implicites et tacites considérées lors de ce processus. En effet, les choix des experts sont fortement influencés par leur environnement, leur expérience ou encore leur personnalité. Ainsi, au sein d'une même compagnie, deux personnes estimeraient la même pièce de deux façons différentes. Dans l'idéal, les interactions entre collègues lors de l'estimation permettent de converger vers le prix et la stratégie la plus rentable. Cependant, cela ne peut s'appliquer entre les différentes compagnies. Cette partie vise donc à apprécier l'étendue de cette influence tacite sur le procédé d'estimation.

4.3.1 Sélection des pièces

Dans un premier temps, une liste de 12 produits est sélectionnée chez les partenaires industriels (illustrés en Figure 4.5). Chacun doit fournir trois pièces qu'il a auparavant estimées et fabriquées, accompagnées des coûts réels qui serviront de références dans l'exercice de cette section. Les pièces se doivent de respecter certains critères :

- être en acier ou en aluminium,
- être des pièces de fraisage essentiellement,
- être représentatives de ce que l'entreprise traite habituellement.

Le Tableau 4.4 liste l'ensemble de ces pièces, leur description, leur entreprise de provenance, la ventilation de leur coût de référence ainsi que la quantité à produire. Comme on peut le constater, pour les produits 10, 11 et 12, seul le coût total est disponible. Ces pièces viennent en effet du dernier partenaire, Stelia, qui fait essentiellement fabriquer ces produits à l'extérieur limitant donc les informations qu'il peut nous fournir.

Tableau 4.4 Pièces sélectionnées pour l'exercice de cotation

Pièce	Provenance	Description	Ventilation des coûts	Taille lot
1	Entreprise 1	*Handle*	Détaillée	12
2	Entreprise 1	*Rib*	Détaillée	12
3	Entreprise 1	*Rib*	Détaillée	12
4	Entreprise 2	*Jack Pad*	Détaillée	15
5	Entreprise 2	*Bracket*	Détaillée	12
6	Entreprise 2	*Universal oleo*	Détaillée	15
7	Entreprise 3	*Sliding support*	Détaillée	2
8	Entreprise 3	*Rotation head*	Détaillée	2
9	Entreprise 3	*Tooling*	Détaillée	1
10	Entreprise 4	*Frame*	Coût global	50
11	Entreprise 4	*Ram door*	Coût global	50
12	Entreprise 4	*Bottom panel door*	Coût global	200

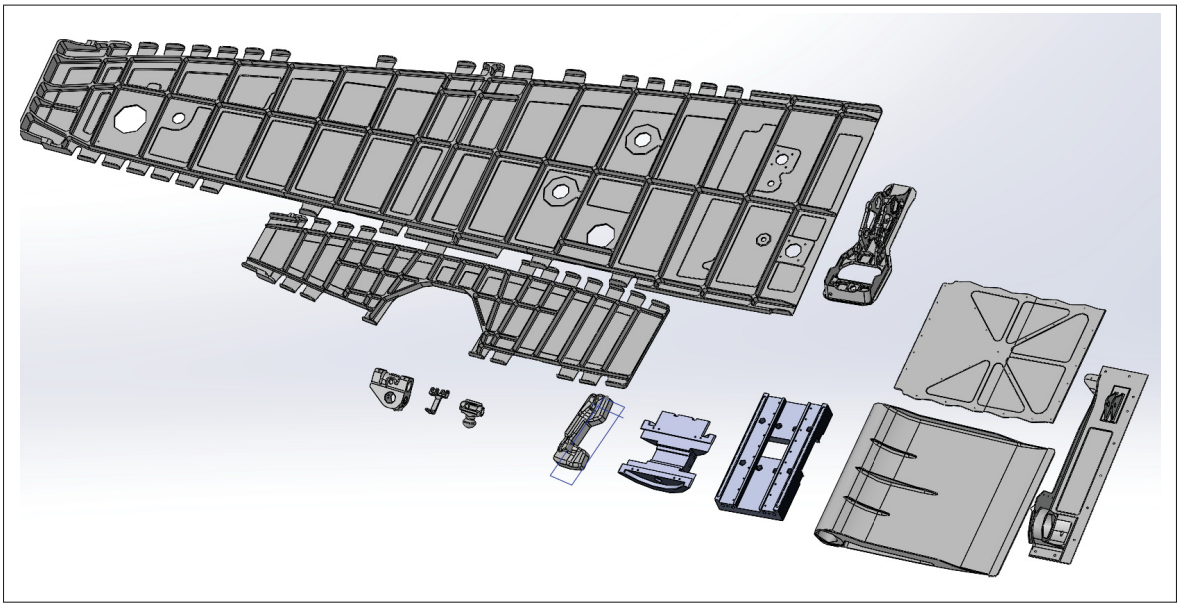

Figure 4.5 Sélection des pièces pour l'exercice de cotation

Dans un second temps, 28 pièces sont sélectionnées dans une des entreprises (illustrées en Figure 4.6). Toutes sont accompagnées de leur modèle 3D, enrichi ou non, ainsi que d'une ventilation de leur coût. Ces 28 pièces serviront dans les chapitres 6 et 7 pour montrer un exemple d'adaptation et valider notre modèle dans un cas réel d'usinage. De façon analogue, au

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

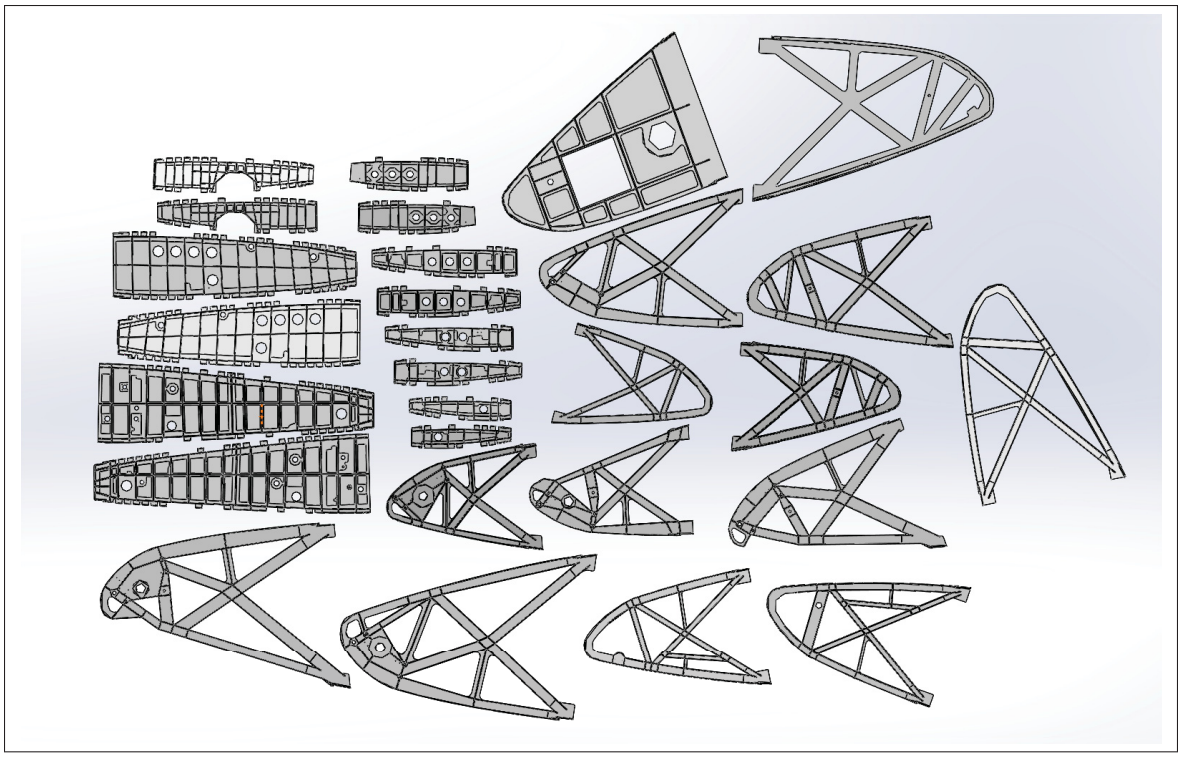

Figure 4.6 Sélection des 28 pièces pour le modèle

tableau précèdent, le Tableau 4.5 présente l'ensemble de ces 28 pièces, les points symbolisant les documents que nous avons à notre disposition.

Tableau 4.5 Pièces sélectionnées pour la mise en place du modèle et sa validation

Pièce	Description	Modèle 3D enrichi	Modèle 3D	PDF	Taille lot
1	*Rib*	•		•	1
2	*Rib*	•		•	1
3	*Rib detail WS*	•		•	1
4	*Rib detail WS*	•		•	1
5	*Rib detail WS*	•		•	1
6	*Rib detail WS*	•		•	1
7	*Rib detail WS*	•		•	1
8	*Rib detail WS*	•		•	1
9	*Rib detail WS*	•		•	1
10	*Rib detail WS*	•		•	1
11	*Rib detail WS*	•		•	1
12	*Rib detail WS*	•		•	1
13	*Rib detail WS*	•		•	1
14	*Rib main track*		•	•	1
15	*Rib main track*		•	•	1
16	*Rib shared*		•	•	1
17	*Rib main track*		•	•	1
18	*Rib shared*		•	•	1
19	*Rib main track*		•	•	1
20	*Rib shared*		•	•	1
21	*Aux track rib*		•	•	1
22	*Aux track rib*		•	•	1
23	*Aux track rib*		•	•	1
24	*Airload rib*		•	•	1
25	*Airload rib*		•	•	1
26	*Airload rib*		•	•	1
27	*Airload rib*		•	•	1
28	*Airload rib*		•	•	1

4.3.2 Le processus de cotation

Les 12 pièces sont ensuite apportées en main propre dans les trois premières entreprises afin que les experts les estiment en se basant sur les mêmes informations de départ. Celles-ci se résument aux dessins techniques, aux notes et au modèle 3D de la pièce. Les partenaires doivent chiffrer chaque pièce comme s'il s'agissait d'une soumission réelle et nous transmettre la ven-

tilation des coûts résultante, idéalement sous la forme d'un chiffrier Excel. Un seul des partenaires ne put participer à cet exercice de par sa position stratégique et son manque d'expertise dans le domaine d'estimation. De même, certaines des pièces n'ont pas été estimées par tout le monde, conséquence d'un manque de connaissances des spécifications aéronautiques. Néanmoins, les 12 produits ont reçu au moins 66 % d'évaluation (2 répondants sur 3) ce qui nous permet de nous assurer de la validité des informations recueillies.

Dans l'optique de pouvoir les comparer, ces résultats sont uniformisés et affranchis de certains paramètres propres aux entreprises comme les taux horaires. Pour suivre la même intention d'uniformisation, ils sont groupés sous différentes catégories et seuls sont conservés les coûts sortants quasiment communs à tous. Les temps de setup et de programmation sont généralement estimés par lot entier. Nous les divisons donc par la quantité de pièces à produire afin d'avoir une représentation plus fidèle du temps passé. Voici la liste des variables retenues :

- temps passé à estimer la pièce,
- volume de matière brute et son coût,
- temps d'usinage de la pièce,
- temps de setup (ramené par pièce unitaire),
- temps de programmation (ramené par pièce unitaire),
- temps d'ébavurage de la pièce,
- temps d'inspection de la pièce,
- coûts des traitements par pièce,
- prix total sans les marges par pièce.

Le Tableau 4.6 présente les résultats pour les pièces 1, 2 et 3 qui ont été estimées par l'entreprise 1 et l'entreprise 2. Le Tableau 4.7 présentent ceux des pièces 4 à 9 qui ont été traitées par les trois industriels. Finalement le Tableau 4.8 donne le coût total des pièces 10, 11 et 12. C'est la seule donnée que nous avons de l'entreprise 4, et l'entreprise 3 n'a pas mis de prix sur ces pièces mais seulement des temps. Les valeurs de référence pour chacun des produits sont

indiquées en gras et soulignées. Les valeurs non renseignées proviennent de paramètres non évalués pour certains produits, car jugés non pertinents par l'entreprise.

Tableau 4.6 Résultats des différents coûts pour les pièces 1, 2 et 3

Paramètre	**Pièce** / **Entreprise**	**1**	**2**	**3**
$T_{estimation}$ [min]	1	**<u>60</u>**	**<u>35</u>**	**<u>35</u>**
	2	70	60	30
V_{Brut} [in^3]	1	**<u>599</u>**	**<u>8224</u>**	**<u>1266</u>**
	2	551	7 875	1 260
C_{mat} [$]	1	**<u>227</u>**	**<u>3115</u>**	**<u>480</u>**
	2	450	4 016	643
T_{usi} [min]	1	**<u>845</u>**	**<u>370</u>**	**<u>119</u>**
	2	335	2 145	1 270
T_{setup} [min]	1	**<u>30</u>**		
	2	53	120	88
C_{post} [$]	1	**<u>67</u>**	**<u>798</u>**	**<u>230</u>**
	2	122	1 650	200
T_{prog} [min]	1			
	2	100	120	60
$T_{inspection}$ [min]	1			
	2	60	120	45
T_{eba} [min]	1	**<u>30</u>**	**<u>180</u>**	**<u>30</u>**
	2	60	300	150
Prix Total ($)	1	**<u>1643</u>**	**<u>5132</u>**	**<u>962</u>**
	2	1680	9200	2790

Tableau 4.7 Résultats des différents coûts pour les pièces 4 à 9

Paramètre	**Pièce** / **Entreprise**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
$T_{estimation}$ [min]	1	30	35	45	50	20	20
	2	**45**	**40**	**40**	45	35	30
	3	70	65	30	**60**	**50**	**35**
V_{brut} [in^3]	1	23	12	51	309	254	
	2	**38**	**13**	**52**	278	241	95
	3	32	12	49	**240**	**219**	**86**
C_{mat} [$]	1	10	6	23	176	144	
	2	**29**	**15**	**31**	356	308	122
	3	19	13	21	**116**	**103**	**166**
T_{usi} [min]	1	35	40	90	250	390	120
	2	**86**	**58**	**108**	209	285	523
	3	208	136	300	**270**	**315**	**405**
T_{setup} [min]	1	12	5	6	120	300	120
	2	**40**	**19**	**10**	150	225	150
	3	16	18	14	**105**	**120**	**45**
C_{post} [$]	1	22	25	39			
	2	**147**	**33**	**60**	356	307	370
	3				**106**	**103**	**430**
T_{prog} [min]	1				120	135	180
	2	**12**	**15**	**12**	180	180	240
	3	40	25	32	**75**	**150**	**120**
$T_{inspection}$ [min]	1	5	5	5	10	20	10
	2	**10**	**10**	**15**	25	45	30
	3						
T_{eba} [min]	1	5	5	5	10	15	5
	2	**15**	**15**	**20**	75	90	45
	3						
Prix Total ($)	1	112	116	233	866	1604	454
	2	**380**	**189**	**304**	1797	1776	2089
	3	368	217	425	**1043**	**1555**	**1488**

Tableau 4.8 Résultats du coût total pour les pièces 10, 11 et 13

Pièce	**Coût total ($)**		
	Entreprise 1	Entreprise 2	Entreprise 4
10	685	878	**737**
11	1626	1733	**1854**
12	91	270	**122**

4.3.3 Analyses et discussions

Notre première analyse se concentre sur l'estimation des différents paramètres par chacune des entreprises indépendamment des pièces. On s'intéresse dans ce cas au comportement des estimateurs pour chacune des variables prise en considération. Le Tableau 4.9 qui donne la moyenne et la variance des écarts en pourcentage entre les valeurs de référence et les valeurs estimées, permet de faire une première série d'observations. Nous faisons remarquer au lecteur que les moyennes n'incluent pas les coûts totaux qui sont déjà une sorte de compilation des autres écarts.

Il est également important de remarquer que face au nombre d'échantillons très limités de cet exercice, la variance calculée se révèle peu significative et est à prendre avec du recul. Dans notre cas, nous l'utilisons principalement pour montrer les tendances comportementales dans nos estimations, et avoir une idée générale des différentes variations et de l'impact du tacite. Il serait par ailleurs intéressant de conduire ce même exercice avec un nombre suffisant d'échantillons permettant d'effectuer des analyses statistiques quantitatives.

Dans un premier temps, il est important de remarquer que les écarts des temps d'estimation suivent presque la même variation et sont très peu dispersés (les variances restent inférieures à 24%). On peut supposer que si les trois estimateurs prenaient tous plusieurs heures pour effectuer les chiffrages, les écarts se réduiraient et ils convergeraient un peu plus vers les valeurs de référence. L'estimateur 3 est celui qui a pris le plus de temps pour effectuer ses chiffrages. Il se retrouve également plus près des valeurs références, alors que l'estimateur de l'entreprise

2, dont les temps de cotation coïncide avec les références, donne des valeurs bien plus hautes pour le reste. La seule anomalie qui contredit notre supposition vient de l'estimateur 1, qui en chiffrant plus rapidement, affiche presque toujours des écarts inférieurs aux deux autres experts et des valeurs plus compétitives. Cette contradiction montre que d'autres facteurs importants rentrent en jeu et qu'en accordant le même temps et les mêmes informations à tous, les résultats divergent nécessairement à cause de ces autres facteurs qui sont issus de l'entreprise et de ses procédés, de ses machines, mais aussi de l'estimateur et de ses connaissances.

Tableau 4.9 Moyenne et variance des différences en pourcentage par paramètre et par entreprise

	Moyenne [%]			**Variance [%]**		
Paramètre	Entreprise 1	Entreprise 2	Entreprise 3	Entreprise 1	Entreprise 2	Entreprise 3
Coût total [$]	-29	59	17	7	41	5
$T_{estimation}$ [min]	-25	1	31	6	15	24
V_{brut} [in^3]	-1	4	-10	7	1	0
C_{mat} [$]	-13	90	-27	31	92	1
T_{usi} [min]	-27	231	151	12	1703	6
T_{setup} [min]	24	110	-9	119	99	25
C_{post} [$]	-48	99		10	108	
T_{prog} [min]	33	87	156	14	37	70
$T_{inspection}$ [min]	-56			1		
T_{eba} [min]	-69	189		0	337	
Moyenne [%]	-20	101	48	22	299	21

L'entreprise 1 étant très compétitive et possédant des machines très performantes se situe la majorité du temps en dessous de la référence. À l'inverse l'entreprise 2 vient se positionner toujours au dessus de ces valeurs prenant une large marge de sécurité sur l'ensemble des paramètres. Son parc machine est en effet moins bien fourni et cette entreprise fabrique généralement des pièces plus standards que la première compagnie. L'entreprise 3 quant à elle, vient encore une fois de plus se placer entre les deux, estimant certains paramètres à la hausse et d'autres plutôt à la baisse.

D'après nos observations, l'expérience joue un rôle primordial dans le processus de cotation car c'est elle qui va diriger la réflexion des experts. Ainsi plus celui-ci aura de connaissances et de pratique dans le domaine plus il sera apte à prendre de bonnes décisions rapidement et à être compétitif quand de nouvelles pièces lui sont soumises. Même si ces pièces sortent de ces habitudes d'usinage, il dispose de suffisamment d'expertise et de recul pour réussir à les estimer correctement. L'estimateur 1 est celui qui avait le plus d'années de travail dans le domaine ce qui se ressent sur les valeurs. Les résultats de l'entreprise 3 sont intéressants car ils démontrent qu'une partie du manque de connaissances dans le domaine peut se rattraper avec le temps d'estimation. En accordant plus de temps au chiffrage et en multipliant les interactions entre collègues, on compense en partie ces manques. L'estimateur 3 ne traitant aucune pièce aéronautique pris le temps de se renseigner sur les spécifications du domaine et de demander des avis externes, entrainant des écarts plus faibles pour ces cotations. Il est certain que l'expérience agit directement sur la confiance en son travail et le comportement face à l'inconnu de chaque personne. On peut alors se demander pourquoi l'entreprise 2 affiche des écarts aussi importants alors qu'elle est issue du secteur exigeant de l'aéronautique et que son estimateur dispose de bonnes connaissances en usinage.

Un autre facteur joue sur la prise décision et est très bien illustré par ces résultats : la personnalité même de l'estimateur influe sur les valeurs proposées. En effet d'un point de vue subjectif, certains experts sont plus à l'aise de sortir de leur zone de confort et estiment avec la même confiance les pièces inconnues sans forcément prendre plus de temps. Alors que d'autres vont se montrer plus prudent, plus méthodique, sans prendre de risques, de peur de manquer une information ou de faire une erreur. Cela se traduit dans la plupart des cas par des prix plus élevés car ils ont gardé une bonne marge de sécurité, ou alors un temps d'estimation plus long. Ainsi chaque personne n'adoptera pas la même attitude vis-a-vis des nouvelles estimations et ce même s'ils ont suffisamment de connaissances pour les faire. Le second estimateur apparaissait plus conservateur et préférait sur-estimer plutôt que de sous-estimer quelque soit la pièce par exemple alors que l'estimateur 1 avait une personnalité plus assurée et ne prenait pas de marge de sécurité.

Rapport-Gratuit.com

Un autre constat porte sur l'importance de l'environnement et du domaine spécifique de l'entreprise. En effet, lorsque des produits plus simples et plus petits sont soumis au premier expert il se montre alors bien en deçà des références. Son expertise se concentre sur des pièces à la fois plus complexes et plus imposantes. De la même façon, le parc machine limitera certaines possibilités d'usinage, obligeant les compagnies à employer des stratégies plus longues et plus couteuses. C'est par exemple le cas des entreprises 2 et 3 qui ne possèdent pas de machine à échangeur de palette permettant de supprimer le temps T_{setup}. Cela se traduit donc par des temps d'installation souvent vus à la hausse. De la même façon, les performances ou encore le nombre d'axes des dites machines agissent également sur les estimations des experts. Chacun des estimateurs a conscience des capacités de son outillage et choisit les temps d'usinage en conséquence, ce qui explique en parti les écarts de T_{usi} pour chaque compagnie. C'est par exemple une des raisons pour lesquelles l'entreprise 2 affiche un temps de 1270 minutes contre 119 minutes pour l'usinage de la pièce 2, entraînant une variance de plus de 1500 %. Elle ne possède pas nécessairement les machines appropriées pour faire ce type de produit.

Le Tableau 4.10 appuie notre propos en montrant l'influence du secteur industriel des pièces couplé au comportement de chaque estimateur. Il présente les moyennes des écarts par entreprise et par groupe de pièces. Ces moyennes ne tiennent pas compte des temps d'estimation ni des coûts totaux sauf pour les pièces de l'entreprise 4.

Tableau 4.10 Moyenne des différences en pourcentage par groupe de pièces et par entreprise

Provenance des pièces	**Moyenne [%]**		
	Entreprise 1	Entreprise 2	Entreprise 3
Pièces de l'entreprise 1		141	
Pièces de l'entreprise 2	-48		46
Pièces de l'entreprise 3	27	75	
Pièces de l'entreprise 4	-15	45	

On remarque que les produits appartenant au même milieu industriel ont tendance à être estimés de la même façon. Ainsi, les chiffrages de l'estimateur 1 présentent des écarts de -48% et -15% pour les pièces venant des entreprise 2 et 4 faisant partie du domaine aéronautique. Le secteur industriel de l'entreprise 3 est celui de l'automatisation et de la robotique, ce même estimateur indique alors des valeurs plus hautes (un écart de +46% en moyenne) quant à l'estimation de leur pièces. Ces produits s'éloignent de son rayon de connaissance et d'expertise ce qui explique ce changement de comportement au niveau des cotations. On retrouve légèrement cette tendance pour l'entreprise 2. L'écart est plus faible sur les pièces aéronautiques issues de l'entreprise 4 que sur les produits de l'entreprise 3. L'irrégularité dans cette conduite pour le premier groupe de pièces s'explique par les énormes différences de temps d'usinage, d'installation et d'ébavurage mis en avant dans le Tableau 4.6. Tel que mentionné précédemment, l'entreprise 2 ne dispose pas des machines adéquates pour fabriquer les pièces de l'entreprise 1, ce qui se traduit par cet écart de 141%. Enfin, ces grands écarts montrent que, même si le secteur est identique, chaque entreprise est spécialisé dans un type précis de produits et de pièces. Cette expertise se traduit notamment par des machines et des procédés optimisés pour leur usinage, ainsi que de plus grandes connaissances sur leur fabrication en général.

Ces deux premiers tableaux nous ont permis de mettre en avant l'influence du contexte et de l'expérience des experts sur les cotations. Cependant nous supposons que ces facteurs n'agissent pas à des échelles similaires sur tous les paramètres pris en compte. Certains sont plus touchés par ces connaissances tacites comme les variances du Tableau 4.9 le prouvent. Afin de s'affranchir du contexte lié aux entreprises, nous calculons cette variance pour chacun des paramètres indépendamment des compagnies. Les résultats de cette analyse sont affichés dans le Tableau 4.11.

Le constat est assez évident, les paramètres variant le plus sont ceux directement liés à la fabrication des produits, à savoir T_{usi}, T_{setup} et T_{eba}. Ce sont ces paramètres qui affichent les plus grands d'écarts et les plus grandes disparités de ces écarts. Le temps de programmation est également un facteur très variable puisqu'il dépend des ressources de chaque compagnie. Inversement, le coût des post-traitements et le volume de matière brute présentent des écarts et

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 4.11 Moyenne et variance des différences en pourcentage par paramètre

Paramètre	**Moyenne [%]**	**Variance [%]**
$T_{estimation}$ [min]	-4	16
V_{brut} [in^3]	-1	3
C_{mat} [$]	28	76
T_{usi} [min]	112	760
T_{setup} [min]	43	103
C_{post} [$]	50	125
T_{prog} [min]	92	59
$T_{inspection}$ [min]	-56	1
T_{eba} [min]	60	335
Prix Total ($)	15,4	37

des variances très faibles. En effet le volume de matière brute est un des paramètres les plus stables à travers toutes les entreprises. Cela signifie que quelque soit l'expert, son domaine ou son expérience, le choix restera identique. Les connaissances tacites rentrent peu en compte pour cette décision. Le coût des traitements quant à lui est majoritairement lié aux prix proposés par les fournisseurs externes. La dispersion résulte donc des variations de ces prix entre les différents sous-traitants employés par les entreprises. En suivant un raisonnement similaire, le coût de matière brute présente une moyenne et une variance des écart plus importantes que le volume V_{brut} en raison des variations entre les prix des fournisseurs de matière pour chacun d'entre eux.

Le dernier point que nous souhaitons mettre en avant concerne l'importance des tailles de lot. En effet la même pièce produite en différentes quantités ne coûtera pas la même chose. Le prix d'un produit fabriqué initialement à l'unité peut varier considérablement lorsqu'on le produit en plus grande série. Cela s'explique par le fait que certains des temps et coûts s'appliquent au lot entier et non à chaque pièce individuellement. Plus grand est le nombre de pièces, plus ceux-ci seront amortis et plus le coût unitaire de chaque produira diminuera. On parle ici des temps de préparation machine, de programmation, ou encore des coûts de transports, d'achat de fixation par exemple. Le nombre de pièce à produire est donc un facteur non négligeable en usinage et nous avons pu l'observer à petite échelle lors de notre étude. Comme le montre le

Tableau 4.12, la part des temps de programmation et de préparation double (on passe d'environ 4-10% à plus de 20%) lorsque le nombre de pièces diminue. Bien que le temps d'usinage reste la contribution majoritaire sur le temps global, cela montre l'impact de la quantité. Produire des petits lots entraine des coûts non-récurrents plus importants, il faut donc être plus compétitifs sur son usinage par exemple.

Tableau 4.12 Taille moyenne des lots par entreprise et contribution de chacun des temps sur le temps global

Conribution des paramètres	**Entreprise et taille moyenne de lot [Pièces]**		
	Entreprise 1 : 12 pièces	Entreprise 2 : 14 pièces	Entreprise 3 : 2 pièces
T_{usi} [%]	75	70	42
T_{setup} [%]	4	11	21
T_{prog} [%]	4	7	22
$T_{eba+inspection}$ [%]	17	11	6

Cette analyse nous permet donc de mettre en avant l'étendue de l'influence des connaissances tacites et les endroits précis où celles-ci sont mises à profit. Malgré le faible nombre d'échantillons, ces premières observations valident notre troisième hypothèse formulée au CHAPITRE 3. On retient que le tacite intervient en grande partie pour les étapes d'usinage et de fabrication. C'est donc sur ces variables que nous devrons concentrer notre travail et tenter de maximiser la réutilisation des connaissances et de l'historique.

4.4 Ouverture sur l'intérêt d'une nouvelle approche

Cette étude en industrie a permis plusieurs observations très intéressantes pour le développement d'une aide à l'estimation et pour la compréhension générale du problème de chiffrage.

Les entreprises cherchent à maximiser leur productivité, en estimant le plus rapidement possible, afin de traiter un maximum de soumissions. L'objectif est pour eux de fusionner vitesse, précision et fidélité lors de ces estimations. En outre, le temps accordé pour ces cotations dé-

pend grandement de leur importance. Un produit ou un contrat de faible valeur n'aura pas la même attention qu'un contrat bien plus risqué ou plus payant. Selon des critères stratégiques, les experts disposent d'un temps variable pour effectuer leur estimations et utilisent donc une méthode adaptée afin de respecter ces délais.

En pratique, les entreprises réduisent les délais au maximum. Il est donc difficile d'accorder le temps nécessaire pour chiffrer les pièces complexes ou nouvelles. Dans ces cas-ci, les erreurs sont plus souvent présentes. Conjointement plus les délais sont courts, plus les connaissances tacites sont impliquées et plus l'estimation va dépendre de l'expert qui l'a faite. Par conséquent, un modèle adéquat devrait être à la fois assez simple, rapide et tout en mettant l'accent sur la réutilisation des connaissances et la fiabilité du coût. Un des objectifs serait donc de réduire l'erreur potentielle tout en accélérant grandement le processus de cotation. Le modèle devrait permettre de mieux comprendre d'où vient le prix et comment il a été obtenu en offrant un niveau de granularité qui conviendrait à l'utilisateur. la Figure 4.7 illustre l'objectif que nous voulons atteindre avec notre outil d'aide.

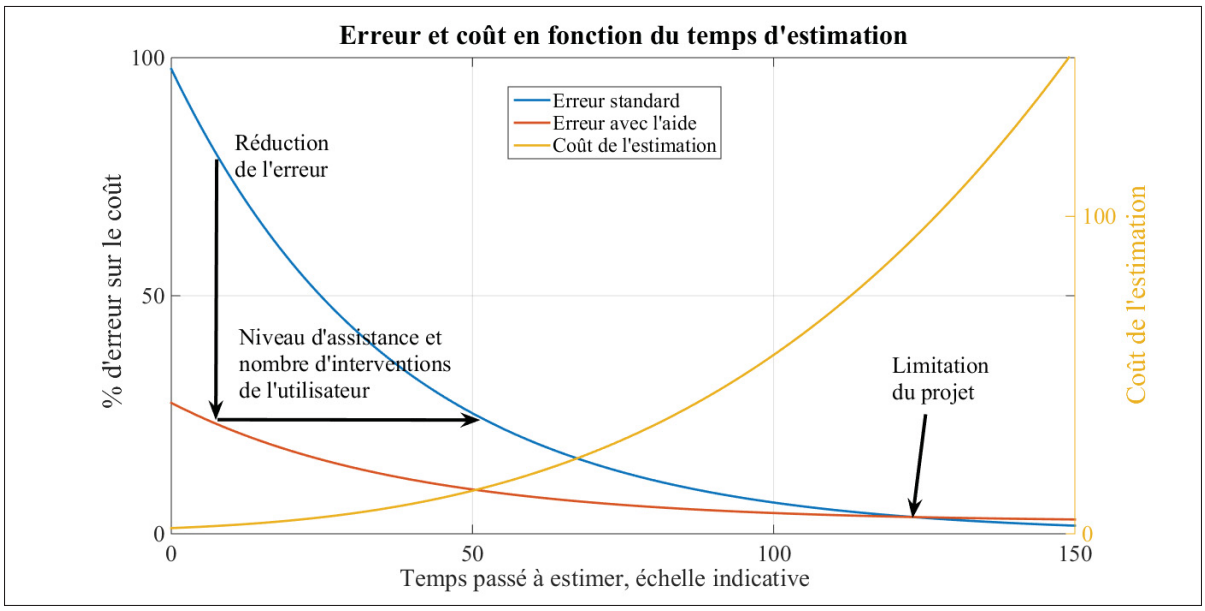

Figure 4.7 Objectif de l'outil d'aide à l'estimation

Une remarque importante est que l'estimation la plus rapide de notre exercice demanda au minimum 20 minutes pour être réalisée et la plus longue jusqu'à 70 minutes pour une pièce plus complexe que l'expert ne connaissait pas du tout. Nous pouvons donc conclure que même face à des pièces simples ou habituelles, le processus de cotation est généralement long et pourrait tirer bénéfice d'une aide informatique rapide. Cela permettrait d'éviter certaines erreurs et de donner plus de temps à l'expert pour sa réflexion en lui préparant le terrain.

Nous remarquons également que l'environnement est un facteur determinant pour les prises de décision et qu'il est donc primordial que notre modèle soit versatile et personnalisable pour chacune des compagnies. De la même façon, l'importance des connaissances tacites mises en avant à la section 4.3 confirme le besoin d'utiliser la similarité géométrique afin de pouvoir correctement aider l'expert. Le chapitre suivant décrit donc le modèle généralisé que nous proposons pour répondre à ces problématiques.

CHAPITRE 5

DESCRIPTION DU MODÈLE GÉNÉRALISÉ

Nous rappelons que le but de ce travail de recherche est le développement d'une aide à l'estimation. Cela passe par la conception d'un modèle généralisé sur lequel cette aide s'appuiera. Ce chapitre présente donc les concepts et notions qui interviennent dans ce modèle et qui le différencient de ces prédécesseurs.

5.1 Contexte

Selon nos observations, toutes les entreprises chiffrent les pièces de façons différentes, mais les pratiques et les modèles employés se recoupent dans l'ensemble. Ainsi comme nous avons pu le remarquer, certains paramètres vont être communs entre les industries, d'autres non. L'importance de ces paramètres peut également varier. La première étape consiste donc à séparer le problème en deux entités bien distinctes :

1) un objet P : dans notre cas, représenté par la pièce, le produit ;
2) son environnement E : illustré par l'entreprise.

5.2 Les paramètres et les relations

Chacune des deux entités définies ci-dessus est représentée par un nombre de paramètres x_i. À ces paramètres sont également attribué un ensemble de relations les liant entre eux. Ainsi, l'objet P et l'entreprise E sont définis par l'équation (5.1).

$$\begin{cases} P &= (x_i) \text{ avec } i \in 1,..,n \\ E &= (x_j) \text{ avec } j \in n,..,m \end{cases} \tag{5.1}$$

Les paramètres et les relations utilisés pour calculer les coûts peuvent être de la même manière classés en deux catégories dépendamment de ce qu'ils définissent, comme le montre le Tableau 5.1. Un paramètre peut définir une des deux entités, la pièce ou l'entreprise. Une relation peut, quant à elle soit être partagé par tout le monde, autrement dit universelle, soit propre à son environnement, autrement dit variable. Il faut donc comprendre qu'un paramètre associé à une pièce pourra changer suivant la compagnie où il est appliqué si la façon de l'obtenir n'est pas une relation universelle. Par exemple, le poids du produit final sera toujours le même ainsi que la façon de le calculer, et ce, même si la pièce est étudiée dans plusieurs entreprises. En revanche, le volume du brut ne sera pas le même chez tout le monde, et son calcul pourrait être bien différent d'un endroit à l'autre. Il en va de pair pour le taux horaire qui lui est un paramètre exclusivement attaché à l'environnement.

Tableau 5.1 Classement des relations et des paramètres

	Type	**Exemple**
Paramètre	Lié à la pièce	Une longueur, un volume brut
	Lié à l'environnement	Le taux horaire changera suivant l'entreprise
Relation	Universelle	$V_{BE} = L_{BE} \cdot l_{BE} \cdot h_{BE}$
	Spécifique	$C_{usi} = T_{usi} \cdot TH_{usi}$

Les relations présentent une légère subtilité et requièrent une seconde classification. En effet le rôle de ces relations est d'interconnecter les différents paramètres entre eux et de définir les méthodes permettant leur acquisition. Chaque paramètre est donc accompagné d'une ou plusieurs relations. En effet, un des avantages de notre modèle est la faculté d'accéder à une valeur de plusieurs façons différentes qui seront précisées dans la section 5.3.1. Ces différentes relations peuvent être classées comme le suggère le Tableau 5.2.

Chaque paramètre peut donc présenter une ou plusieurs relations l'associant à d'autres facteurs à la manière de l'équation (5.2) :

Tableau 5.2 Les types de relations

Type de relation	Exemples
Récupération dans une BDD	Prix du matériau, taux horaire machine directement pris dans une base de données (BDD)
Calcul mathématique	• $V_{BE} = L_{BE} \cdot l_{BE} \cdot h_{BE}$ • $C_{usi} = C_{operation_1} + C_{operation_2}$ • $C_{prog} = T_{prog} \cdot TH_{prog}$
Relation de similarité	• Interpolation ou extrapolation entre V_{BE} et V_{brut} • Régression linéaire entre le poids d'une pièce et le prix d'un post-traitement spécifique • Règles de décision comme définies en section 4.2.2.3 : *SI* Matériau (Nouvelle Pièce) = Matériau (Pièces similaires) *ALORS* Machine (Nouvelle pièce) = Machine (Pièces similaires)

$$x_i = \begin{cases} \text{Relation}_1(f(x_j, x_v)) \\ \text{Relation}_2(\text{Similaire}(x_a, x_b, x_c)) \\ \text{Relation}_3(BDD) \end{cases} \tag{5.2}$$

5.3 La notion d'origine et la décomposition

5.3.1 L'origine

Tel que discuté dans la section précédente, il existe plusieurs moyens d'obtenir la valeur d'un paramètre. L'utilisation d'un calcul mathématique direct n'est pas la seule option possible. Par conséquent, il est supposé que la provenance d'un paramètre est presque tout aussi importante que sa valeur. Les cinq origines que nous avons identifiées sont détaillées dans le Tableau 5.3 indiquant également les types de relation dont elles peuvent découler.

Rapport-Gratuit.com

Tableau 5.3 Les origines possibles des paramètres

Origine	Description	Relations possibles
Tacite	Valeur implantée par l'utilisateur venant de ses connaissances	Aucune : intervention de l'utilisateur
Consultée	Provient d'une base de données, mais la valeur peut fluctuer dans le temps (comme un prix de matière)	Base de données
Extraite	Pris à partir du modèle 3D, d'un PDF ou d'une base de données. La valeur ne change pas avec le temps. Une densité ou une aire prise du modèle 3D sont des exemples d'orgine extraite.	Aucune : vient de l'extraction des données contenues dans les fichiers
Décomposée	Un paramètre x_i peut être divisé en x_v et x_w par exemple	Calcul mathématique
Similaire	Obtenu par analogie avec d'autres pièces similaires en utilisant une régression linéaire, une interpolation, une règle de décision	Relation de similarité

5.3.2 La décomposition

En se référant au Tableau 5.1, on constate que la relation de type « calcul mathématique » est appliquée dans le but de diviser un paramètre (qui aura donc une origine « décomposée ») en d'autres paramètres plus détaillés. Chaque entité est donc décomposable en plusieurs paramètres ayant chacun des relations distinctes. Le nombre de paramètres et leur type seront déterminés par les niveaux de décomposition nécessaires afin d'obtenir un résultat satisfaisant pour l'estimation et par les procédés de l'entreprise. Plus le nombre d'éléments est élevé, plus le raffinement sera précis, mais plus les entrants des calculs seront difficiles d'accès. Il ne faut pas omettre que tous les paramètres ne sont pas facilement accessibles. De plus, il est impossible d'avoir une relation de type « calcul mathématique » pour chacun d'entre eux. Par exemple, extraire la longueur totale des arêtes extérieures coupantes depuis le modèle 3D s'avère être une opération très complexe et pas forcément nécessaire. Par conséquent, il est primordial de trouver un compromis entre le niveau de décomposition souhaité, sa faisabilité et son intérêt pour la confiance et la precision de l'estimation.

Le modèle se présente donc comme un arbre à K_i–couches de décomposition. Chaque paramètre ayant un nombre de couches spécifiques. En effet la division s'arrête quand le paramètre ne peut plus être scindé. La Figure 5.1 fournit un exemple de cet arbre dans le cas du calcul du poids de la boîte englobante d'une pièce usinée.

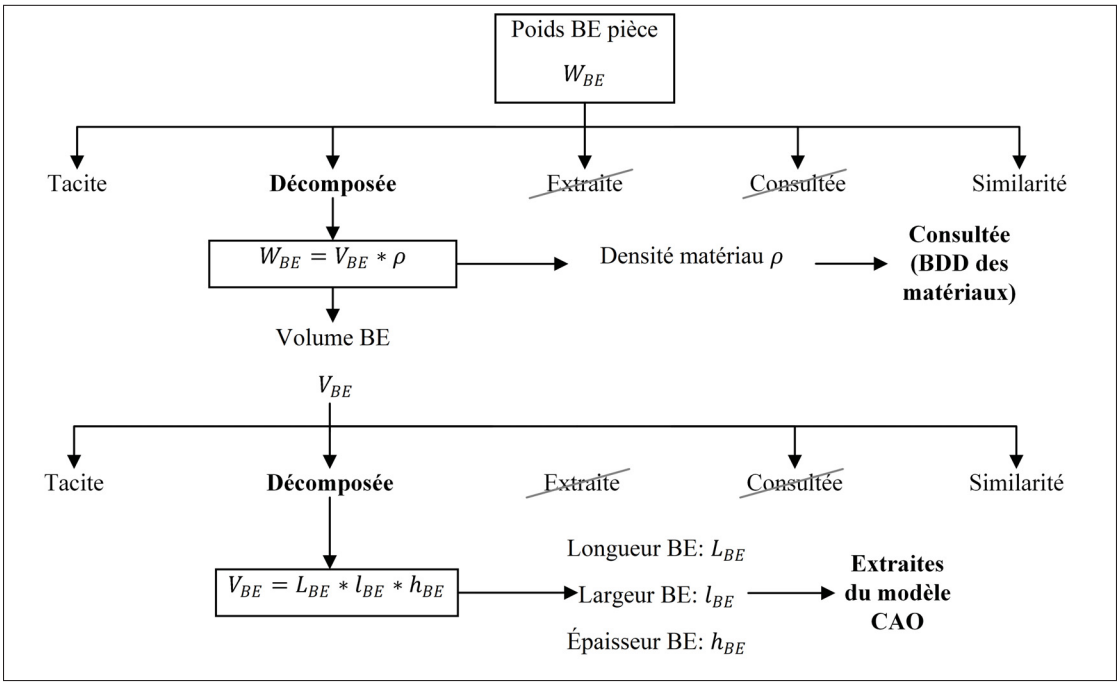

Figure 5.1 Exemple de décomposition pour le poids de la boîte englobante W_{BE}

5.4 La similarité

5.4.1 Généralités

Une des contributions principales et des forces de ce modèle est la possibilité d'utiliser la similarité entre les pièces comme méthode alternative et complémentaire pour l'acquisition de certains paramètres. Ainsi, on s'en servira par exemple pour obtenir une valeur jugée trop complexe à décomposer, ou pour filtrer en amont les résultats sur lesquels un calcul s'exécutera. Cela permet également de transposer une partie de la base de connaissances tacites qu'uti-

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

lise inconsciemment les experts industriels et qui se retrouve encapsulée dans les estimations passées. Ce qui par la suite favorise et simplifie sa réutilisation.

La nouveauté repose sur l'utilisation de la similarité géométrique rendue possible grâce aux outils informatiques développés par 3DSemantix. Nous savons que des pièces géométriquement similaires partagent plusieurs caractéristiques évidentes telles qu'un volume, des dimensions maximales ou encore une aire semblables. Cependant, nous supposons que ces caractéristiques partagées en dissimulent d'autres. En effet, la géométrie est corrélée plus ou moins directement à plusieurs autres aspects des pièces, ce qui nous portent à croire qu'une telle similarité se répercute ailleurs dans une certaine mesure. Ainsi, des pièces voisines auront probablement la même utilisation entraînant des annotations et des spécifications similaires, parfois le même matériau, ou encore le même prix. Le modèle repose sur cette assomption nous autorisant à déterminer analogiquement certaines variables et coûts qui sont ardus ou impossibles à calculer avec une technique standard.

Néanmoins, l'emploi de la similarité ne se résume pas à la géométrie et la forme. Toute ressemblance peut être envisagée et exploitée dans le but de proposer un meilleur résultat. Voici une liste non exhaustive des paramètres pouvant faire l'objet de recherche de similitude :

- la forme (géométrie de la pièce),
- l'alliage du matériau,
- la machine employée,
- les post-traitements,
- les tolérances.

De cette manière différents aspects similaires des pièces peuvent être combinés si nécessaire dépendamment du paramètre à estimer et de l'approche favorisée. Le choix de la machine utilisera par exemple un filtre sur l'alliage et les dimensions maximales de la pièce, alors que l'estimation du temps d'usinage tirera pleinement profit de la similarité de forme et d'alliage. La Figure 5.2 donne une représentation visuelle d'un exemple de résultats possibles pour une

requête avec l'outil de 3DSemantix. La pièce jaune représente notre référence, et les pièces grises la sélection renvoyée.

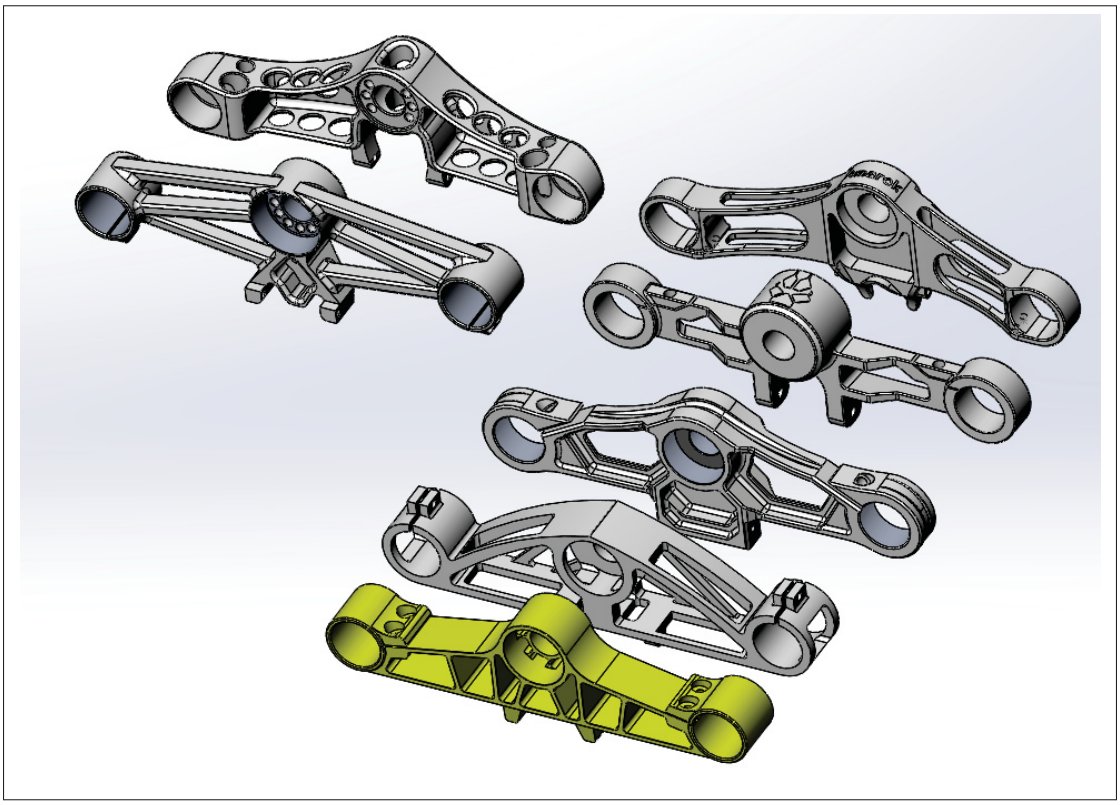

Figure 5.2 Exemple de résultats suite à une recherche géométrique

5.4.2 Index de similarité

La recherche de pièces similaires d'un point de vue géométrique se traduit par un résultat représentant une distance d entre chaque pièce testée et la pièce de référence. Dans ce contexte, une pièce identique retournera donc une distance nulle. Afin de pouvoir utiliser cette information de distance géométrique dans les différentes relations, une fonction de transfert détaillée par l'équation (5.3) est mise en place. Celle-ci permet d'attribuer un score décroissant de 1 à 0, inversement proportionnel à cette distance, qui constitue le composant de similarité géométrique CS_{geo}.

$$\text{Coefficient de similarité géometrique} = CS_{geo} = f(d) = \frac{1}{1+d} \tag{5.3}$$

Pour chaque aspect similaire pris en compte dans une recherche un composant associé peut être défini pour le représenter. Dans le cas d'une recherche sur la forme et l'alliage, on retrouvera le composant de similarité géométrique défini précédemment et le composant de similarité matériau qui sera dans son cas binaire : 1 si l'alliage est le même, 0 sinon. De la même manière que l'on combine les recherches, on combinera ces composants comme le montre l'équation (5.4), pour obtenir l'index de similarité résultant de chaque pièce retournée. Dans notre cas, la différence entre les tailles de lot, ou les indices d'usinage sont deux des possibilités envisageables qui seront explorées lors de l'application du modèle dans le CHAPITRE 6.

$$\text{Index de similarité} = IS = \prod_{i=1}^{n} CS_i \tag{5.4}$$

Cet index de similarité a pour but de pondérer l'influence de chaque pièce dans l'obtention des paramètres de la nouvelle pièce, mais aussi de pouvoir attribuer un indice de confiance à la valeur trouvée grâce à cette analogie.

5.5 Indice de confiance

Un autre point important de notre modèle concerne la précision et la confiance reliée à l'estimation. Pour répondre à ce problème, nous proposons d'attribuer un indice de confiance sur une échelle allant de 0 à 1 à chaque paramètre en fonction de son origine et de sa relation d'acquisition. Cet indice se veut une représentation de l'exactitude du résultat obtenu, car il caractérise la probabilité que notre estimé soit valide par rapport aux données prises en entrée.

Dans notre cas, il est impossible de quantifier la justesse de nos valeurs obtenues, car on ne peut les comparer avec les valeurs prises comme modèle et les coûts réels ne sont pas disponibles avant la production. Chacune des pièces est unique et a, par conséquent, des coûts singuliers.

Cependant, dans le CHAPITRE 7, connaissant les valeurs réelles de la pièce à estimer, la justesse sera employée pour juger de l'exactitude de notre modèle.

S'il était possible d'employer les outils statistiques sur nos pièces, cet indice serait remplacé par l'intervalle de confiance. Cependant, en se basant sur les résultats de recherches similaires, le nombre de pièces est dans la plupart des cas bien trop faible pour autoriser l'application des différentes lois de probabilités sur ces données. Par exemple, si le filtre ne s'applique que sur les matériaux, il est alors envisageable de se servir d'analyses statistiques sur l'échantillon obtenu pour prédire le choix de la machine, car cet échantillon sera suffisamment peuplé. Toutefois, plus on combine les similarités, plus les probabilités de succès diminuent rendant l'usage de ces lois hasardeux sur une vingtaine de pièces. C'est pourquoi cette possibilité est exclue et qu'un indice de confiance est proposé comme alternative.

Cet indice dépend de l'origine de chaque paramètre et des relations utilisées. Dans le cas de l'utilisation de relations de similarité, les indices des paramètres d'entrés sont modulés par leur index de similarité tel que détaillé dans l'équation (5.5). C'est ensuite à partir de cette nouvelle valeur que sera obtenu l'indice de confiance du résultat de l'analogie. Un indice de confiance de 1 dans le poids d'une pièce couplé à un index de similarité de 0,9 donnera un indice de confiance de 0,9 sur le poids de notre pièce de référence, ce qui est logique.

$$\text{IC d'un paramètre similaire} = IC_{sim} = IC_{initial}\, IS \tag{5.5}$$

En fonction des relations d'obtention, les indices de confiance se calculent différemment, comme présentés dans la Figure 5.3 et détaillés dans la liste suivante :

- multiplication : Comportement équivalent à des probabilités indépendantes,
- somme : Moyenne pondérée des indices de confiance,
- règle de décision : Probabilité de succès,
- régression linéaire : Utilisation de la formule de composition de Wang et Stanley expliquée par Widhiarso & Ravand (2014, page 114) et les équations (5.6), (5.7) et (5.8) où w_j repré-

sente le poids de chaque dimension, r_j son indice de confiance et r_{ij} la corrélation entre les deux dimensions.

$$IC_{reg,j} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_j^2 r_j + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j(\neq i)=1}^{n} w_i w_j r_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} w_j^2 + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j(\neq i)=1}^{2} w_j w_i r_{ij}} \tag{5.6}$$

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} IC_{sim,i}^{j}}{n} \tag{5.7}$$

$$r_{ij} = R\,(\text{coefficient de corrélation}) \tag{5.8}$$

Dans notre cas, nous considérerons le poids des paramètres égal à 1, r_{ij} sera le coefficient de corrélation linéaire R entre le paramètre i et le paramètre j. L'indice de confiance r_j de chaque variable sera quant à lui la moyenne des n indices de confiance des données utilisées pour construire la courbe de régression. Chaque indice est pondéré par l'index de similarité selon l'équation (5.5). Il est possible que l'indice donné par la composition de Wang et Stanley ne reflète pas suffisamment la confiance sur nos résultats pour notre étude de cas. Ce scénario envisageable peut se corriger en adaptant légèrement la formule utilisée ou en trouvant une meilleure façon de faire pour cet indice. Si nous pensons que cette méthode n'est pas assez représentative de la confiance, des pistes de recherche seront données dans la section « Recommandations ».

De manière arbitraire, les origines « extraite » et « consultée » se voient attribuer respectivement un indice de 1 et de 0,95, car elles représentent selon nous les sources les plus fiables pour l'information.

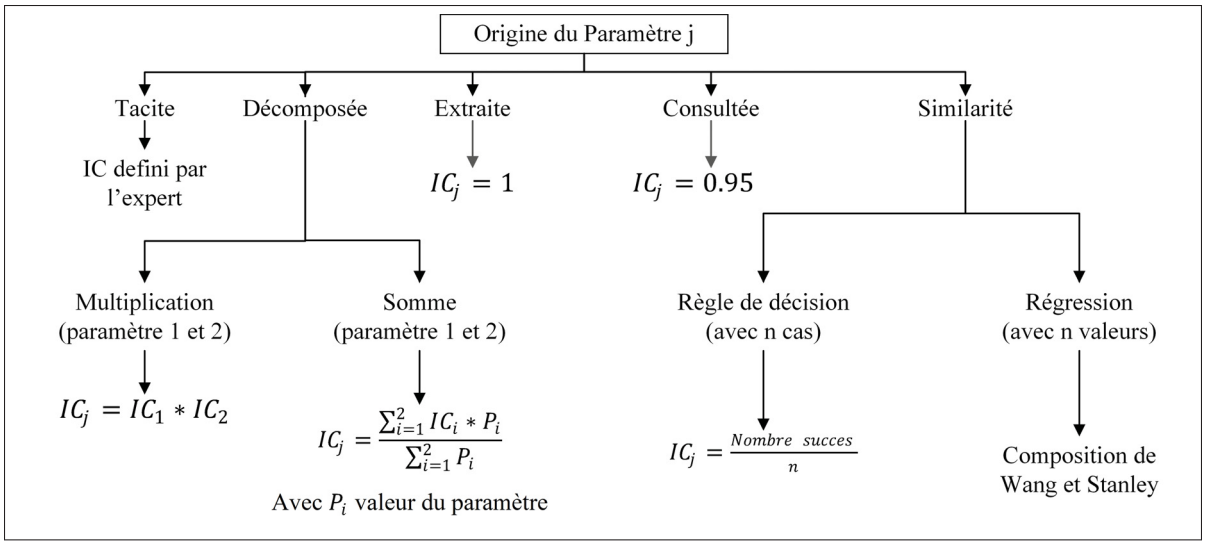

Figure 5.3 Indice de confiance en fonction de l'origine

5.6 La notion de priorité et les niveaux d'assistance

5.6.1 Les priorités

La combinaison de l'origine des paramètres et de l'indice de confiance correspondant permet de mettre l'accent sur certaines méthodes d'obtention. Ainsi, les origines offrant le plus haut degré de confiance sont priorisées si possible. Cela assure qu'un paramètre disposant de plusieurs relations d'acquisition bénéficie de la meilleure estimation, si les entrants nécessaires sont accessibles. Dans le cas contraire, la relation suivante est appliquée jusqu'à obtention de la valeur ou l'épuisement des relations associées au paramètre recherché. En dernier recours, une interaction de l'utilisateur est demandée pour renseigner la valeur manquante afin de poursuivre le calcul. Quel que soit le scénario, l'expert a toujours le dernier mot quant à l'estimation. Il peut choisir de changer n'importe lequel des paramètres qui deviendra alors tacite. Ces priorités sont illustrées dans la Figure 5.4.

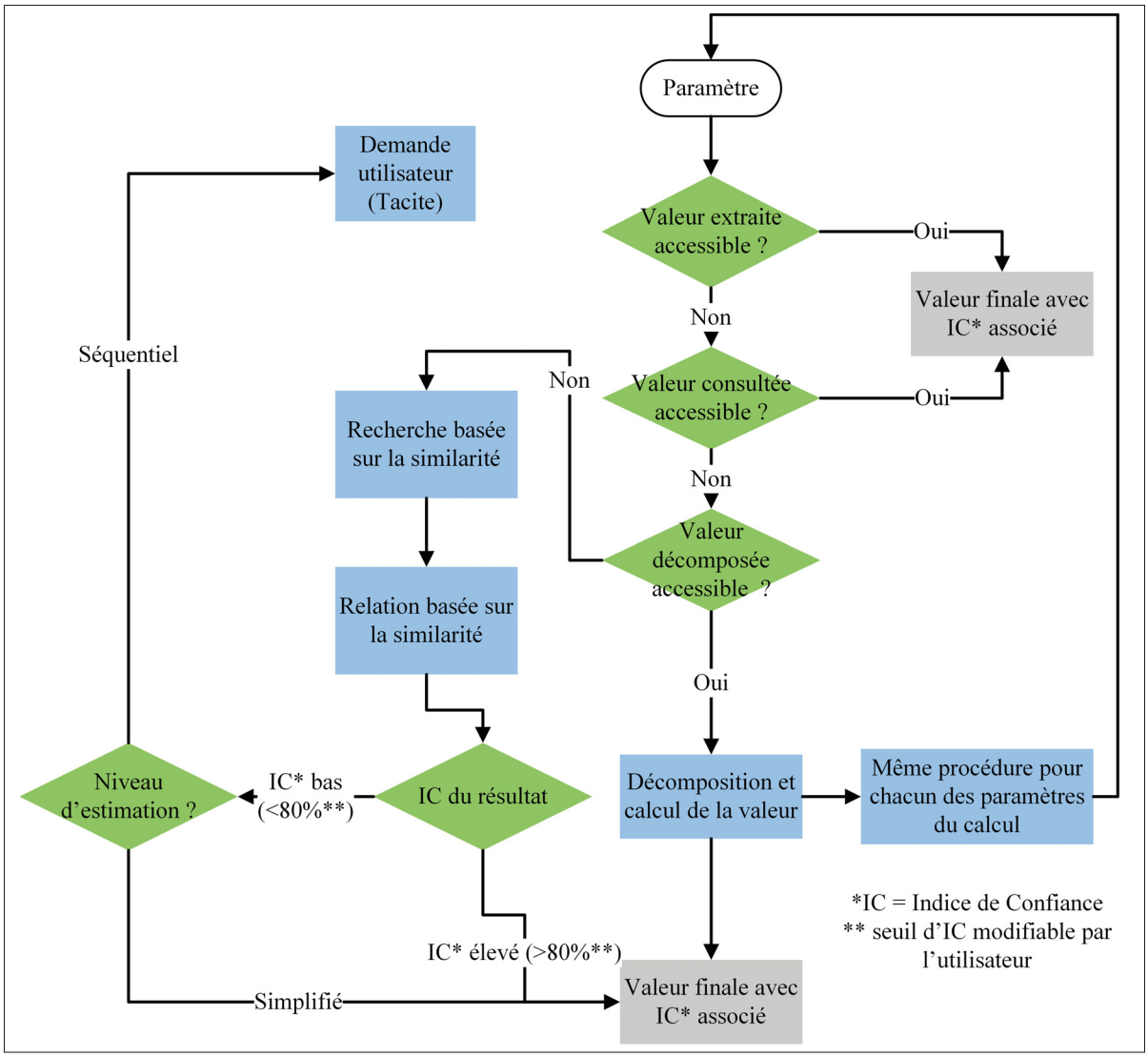

Figure 5.4 Les priorités d'obtention des valeurs

5.6.2 Les niveaux d'assistance

Les différentes notions introduites précédemment permettent de définir plusieurs niveaux d'assistance et de fonctionnement de l'outil en fonction du souhait de l'utilisateur. Dans notre cas, le choix de deux niveaux semble approprié : un niveau autonome et un niveau plus séquentiel. Le modèle autonome est introduit dans le but d'éviter les interventions de l'estimateur durant la cotation. Il favorise grandement l'analogie et la similarité plutôt que le calcul et la décomposition des paramètres. Le mode séquentiel, quant à lui, correspond à une méthode pas à pas

d'estimation des différents coûts. Ce niveau n'hésite pas à faire intervenir l'expert lorsque cela est nécessaire. Le CHAPITRE 6 propose un exemple du niveau simplifié de notre modèle.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 6

ADAPTATION À L'ESTIMATION DES COÛTS EN USINAGE AÉRONAUTIQUE

Ce chapitre constitue une mise en place du modèle généralisé dans un cas précis du projet Lean 702 où les 28 pièces sélectionnées précédemment sont mises à profit. La section présente donc l'architecture des informations nécessaires et les méthodes de calcul employées pour les différents composants du coût. Une étude de corrélation entre les paramètres et les coûts est également menée. La dernière partie de ce chapitre se concentre sur l'influence de la similarité sur ces corrélations. En raison du manque de données et de temps, une adaptation complète du modèle n'est pas envisageable. Pour cette raison, seulement une prise de décision initiale ainsi que trois des coûts seront illustrés :

1) le choix de la machine,
2) le coût matière C_{mat},
3) le coût d'usinage C_{usi},
4) le coût d'ébavurage C_{eba}.

Il est important de noter que le système d'unités est en impérial et que pour des raisons de praticité et de confidentialité, les différents prix et taux horaires sont fictifs. Les données primordiales, comme les temps ou les volumes par exemple, sont quant à elles exactes.

6.1 Mise en place

Cette première étape présente le stockage des informations auxquelles nous avons accès pour la démonstration. Ces données peuvent venir des modèles 3D des pièces, des fichiers fournis par les entreprises ou encore de sources externes.

6.1.1 Architecture des données

Chaque paramètre P se définit grâce à un quadruplet d'informations mis en évidence par l'équation (6.1). Les données peuvent donc être structurées en plusieurs tables selon leur catégorie.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Nous adoptons donc un schéma de base de données relationnelle classique car c'est celui qui nous semble le plus adapté pour stocker et accéder facilement à ces informations. Nous créons plusieurs tables, respectivement pour les informations des pièces, les temps et coûts associés, les matériaux et enfin les taux horaires.

$$P_j = \{Valeur\,;\, Origine\,;\, IC\,;\, Relations\} \tag{6.1}$$

La Figure 6.1 donne une représentation visuelle de cette base de données et la Figure 6.2 détaille la gestion du quadruplet de données pour chaque paramètre. Chacune des variables est répartie à travers quatre tables différentes dans la base de données : une pour chaque information du quadruplet.

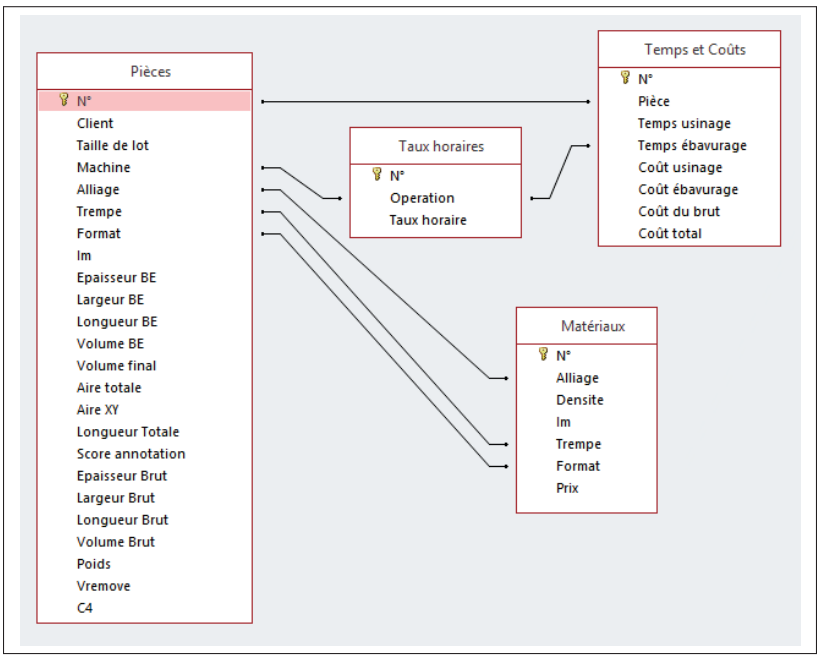

Figure 6.1 Architecture sommaire de de la base de donnnées

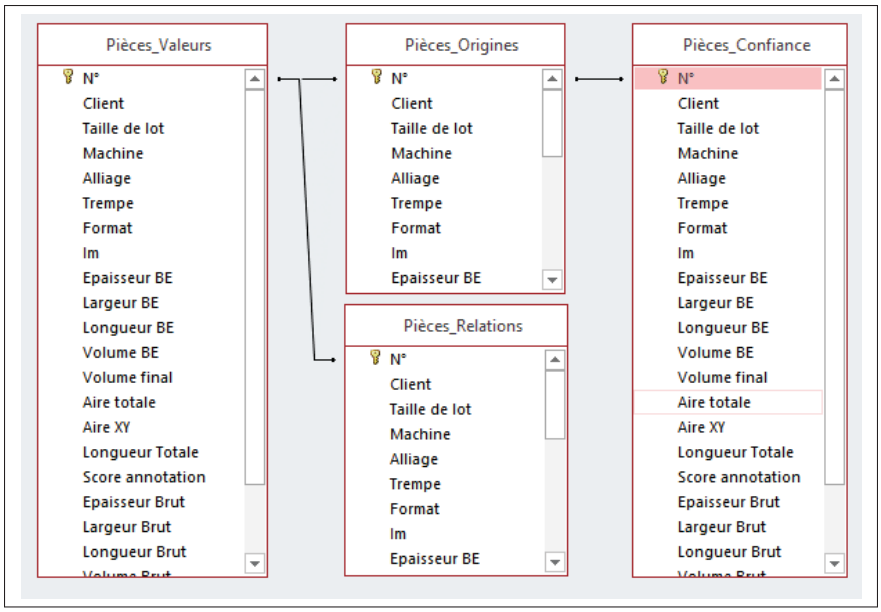

Figure 6.2 Gestion des origines, des indices de confiance et des relations dans la base de donnnées

6.2 Le choix de la machine

Une des premières prises de décision d'un estimateur lors de l'arrivée d'une nouvelle pièce concerne la capacité de l'entreprise à la fabriquer. Ce qui est directement suivit par le choix de la machine la plus appropriée pour ce travail.

Ce choix repose essentiellement sur deux critères qui sont le matériau et les dimensions de la pièce. La Figure 6.3 présente donc l'algorithme de décision qui est employé pour mener à ce choix et obtenir l'indice de confiance correspondant. Le matériau, le volume et l'épaisseur de la pièce sont extraits directement depuis le modèle 3D du produit final.

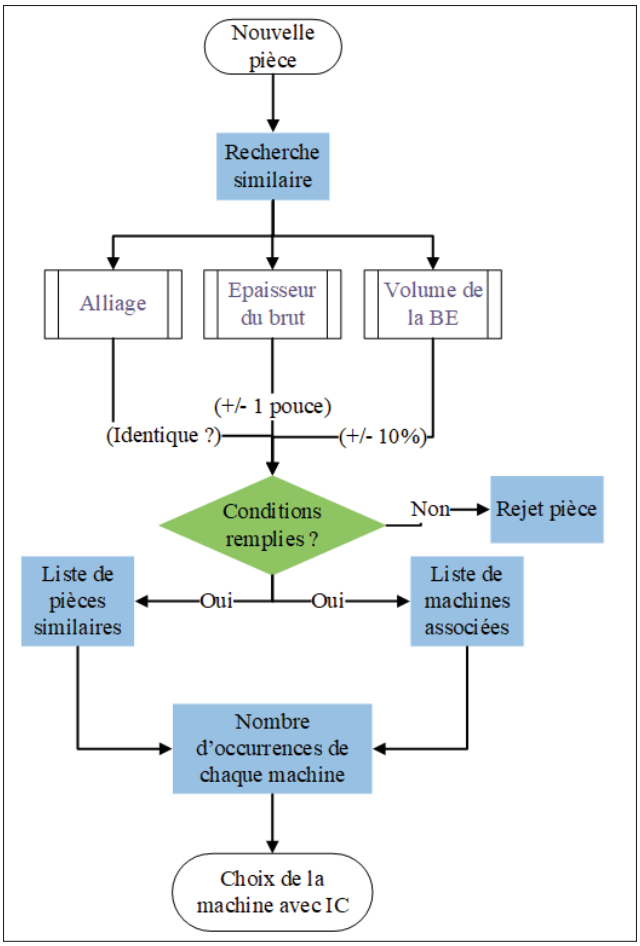

Figure 6.3 Algorithme de choix de la machine

6.3 Le coût matière

Le premier coût est celui du matériau brut qui sera acheté en vue de la fabrication. La Figure 6.4 présente la décomposition proposée pour ce coût. À chacun des paramètres est associé son origine et la relation utilisée dans notre étude de cas.

Comme indiqué ci-dessous, le prix massique de la matière et la densité proviennent directement des tables correspondantes de la base de données. laissant pour unique inconnue, le volume du brut.

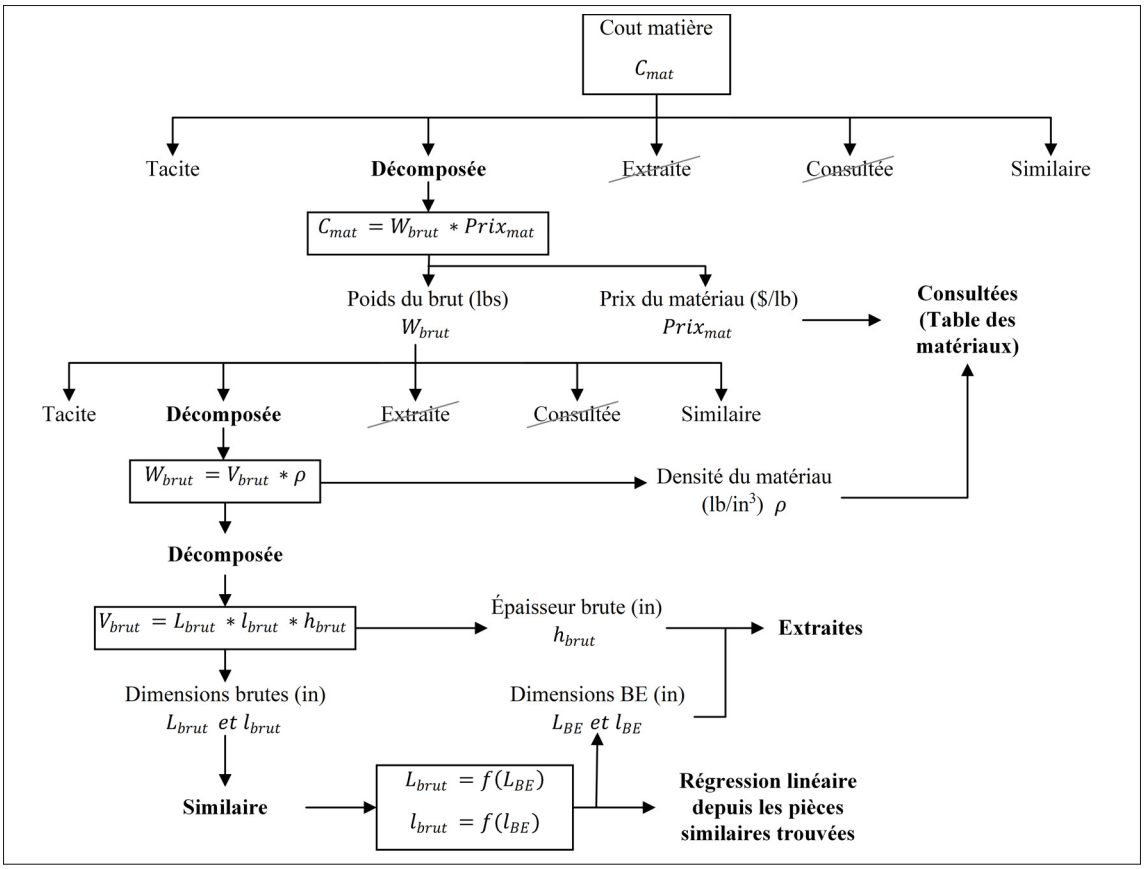

Figure 6.4 Décomposition du coût de la matière

6.3.1 Le volume de matière brute

Le cœur de l'estimation du coût matière résulte d'une décision satisfaisante sur le volume de matière nécessaire. Une bonne détermination des dimensions de la plaque brute qui servira lors de l'usinage est donc primordiale. Le volume du brut se calcule simplement par l'équation (6.2) avec L la longueur, l la largeur et h l'épaisseur.

$$V_{brut} = L_{brut}\, l_{brut}\, h_{brut} \tag{6.2}$$

Dans notre cas, l'épaisseur brute est obtenue directement depuis les annotations et spécifications contenues dans le modèle 3D ou depuis les notes accompagnant la pièce. En effet, il

est très commun en aéronautique que le client indique une épaisseur recommandée pour le matériau brut. Cette derniere est respectée dans la majorité des cas.

Nous supposons ensuite que les deux autres dimensions, la longueur et la largeur du brut, sont corrélées aux dimensions de la boite englobante de la pièce. Elles peuvent donc être obtenues à l'aide d'une relation linéaire telle que suggérée par l'équation (6.3). Les inconnues de cette équation pourront être obtenues par analyse de régression linéaire des moindres carrées à partir de pièces géométriquement similaires.

$$\begin{cases} L_{brut,reg} &= \beta_0 + \beta_1 L_{BE} + \varepsilon \\ l_{brut,reg} &= \beta_0 + \beta_1 l_{BE} + \varepsilon \end{cases} \tag{6.3}$$

De plus, les fournisseurs de matière première travaillent au ¼ de pouce. Il faut donc arrondir ces deux valeurs trouvées au ¼ de pouce supérieur afin de respecter ces contraintes. Cela peut être fait après coup comme suggéré par l'équation (6.4).

$$\begin{cases} L_{brut} &= \dfrac{\lceil 4\, \hat{L_{brut,reg}} \rceil}{4} \\ l_{brut} &= \dfrac{\lceil 4\, \hat{l_{brut,reg}} \rceil}{4} \end{cases} \tag{6.4}$$

6.4 Le coût d'usinage

Le coût le plus important et le plus complexe à chiffrer concerne l'usinage. C'est souvent sur ce point que l'expérience et les connaissances tacites de l'expert interviennent le plus, car il anticipe le travail du machiniste et la stratégie de fabrication du produit. Une estimation correcte de ce temps d'usinage est essentielle. La Figure 6.5 présente la décomposition du coût d'usinage ainsi que l'origine des paramètres dans notre cas d'application. Le taux horaire pour

l'usinage est directement obtenu de la base de données à partir de la machine sélectionnée en amont.

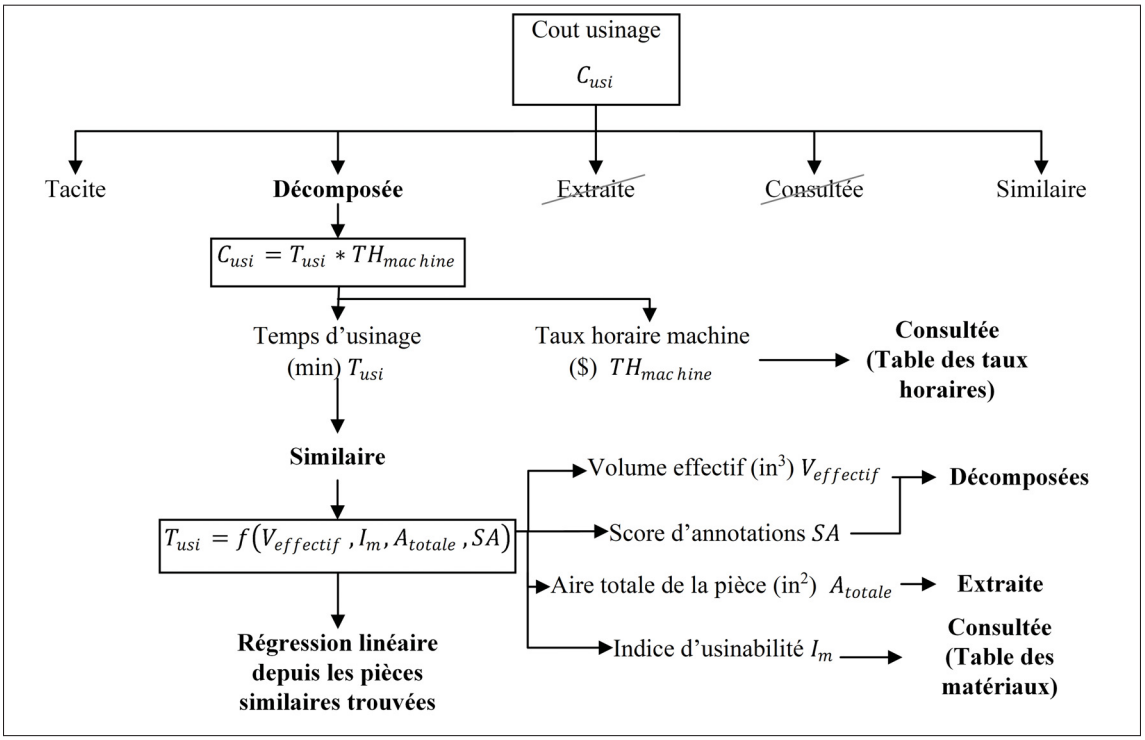

Figure 6.5 Décomposition du coût d'usinage

6.4.1 Calcul du temps d'usinage

L'usinage est un procédé qui se décline généralement en deux étapes : l'ébauche et la finition. Malheureusement, nous n'avons pas accès aux temps distincts de ces deux phases mais seulement au temps total d'usinage. Néanmoins, nous croyons que la durée de ces deux étapes ne dépend pas exactement des mêmes paramètres et qu'on retrouvera, par hérédité, une combinaison de ces dépendances sur le temps global. Premièrement, nous supposons que le temps d'ébauche résulte essentiellement du volume à usiner et de l'usinabilité du matériau. C'est en effet lors de cette période que l'on enlève le plus gros volume de matière. Deuxièmement, nous supposons que le temps de finition dépendra lui plus de la surface totale à usiner et des anno-

tations géométriques à respecter. Afin de refléter ce concept, le temps d'usinage présente alors trois composants tel que le montre l'équation (6.5) avec :

- C_1 : le volume effectif à usiner et l'usinabilité,
- C_2 : la surface totale à usiner,
- C_3 : le score d'annotation.

$$T_{usi} = f(C_1, C_2, C_3) \tag{6.5}$$

6.4.1.1 Le temps d'usinage en fonction du volume à usiner

Le premier composant est le volume à usiner V_{remove} qui représente la différence entre le volume effectif du brut et le volume final de la pièce. Celui-ci est donné par l'équation (6.6).

$$V_{remove} = V_{effectif} - V_{final} \tag{6.6}$$

Le volume effectif se veut une représentation du vrai volume de matière brute qui doit être retirer. En effet, dans certains cas, la différence entre le volume brut total et le volume final de la pièce inclut une grande quantité de matière qui ne sera pas retirée lors de la fabrication. Cela correspond par exemple aux endroits servant au maintien du bloc et à la mise en place des fixations, ou encore les parties étant contournées comme les poches traversantes et le pourtour des pièces. Ainsi, le volume effectif se veut être une représentation plus fidèle du volume réel du brut qui est à enlever. Il est obtenu à partir du logiciel de CAO et de l'aire projetée de la pièce suivant ces deux plus grandes dimensions. Cette aire est ensuite augmentée de 10% afin de prendre en compte le passage de l'outil de coupe. Ce coefficient est choisi arbitrairement avec les estimateurs, mais pourrait faire l'objet d'une étude future quand à la meilleure valeur à adopter. Des pistes de recherche concernant ce problème sont introduites dans la section

« Recommendations ». La Figure 6.6 présente cette aire projetée et l'équation (6.7) précise le calcul du volume effectif.

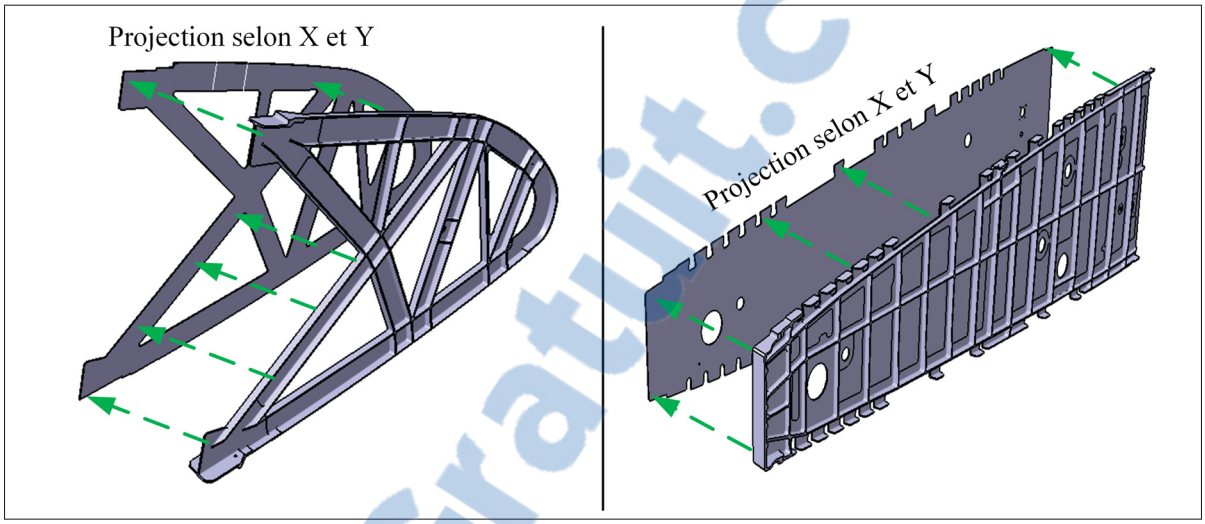

Figure 6.6 Représentation de l'aire projetée selon les deux plus grandes dimensions

$$V_{effectif} = \lambda\, A_{XY}\, h_{brut} \;\text{ avec }\; \lambda = 1,1 \tag{6.7}$$

Le composant C_1, prenant en compte l'indice d'usinabilité du matériau, se calcule comme indiqué par l'équation (6.8). Cet indice est obtenu depuis la table des matériaux de la base de données.

$$C_1 = V_{remove}\, I_m \tag{6.8}$$

6.4.1.2 Le temps d'usinage en fonction de la surface totale

Dans le contexte aéronautique, la plupart des spécifications d'usinage stipulent que toutes les surfaces d'un produit de fabrication doivent être usinées dans le but d'éliminer les fissures et les imperfections qui peuvent être présentes sur le brut. C'est en partant de ce constat que nous

Rapport-Gratuit.com

supposons que le temps d'usinage dépend également de l'aire totale de la pièce. Cette aire est extraite directement à partir de l'API et des données Brep. Le composant C_2 est tel que précisé par l'équation (6.9).

$$C_2 = A_{totale} \tag{6.9}$$

6.4.1.3 Le temps d'usinage en fonction des annotations

Il est évident que le temps d'usinage varie en fonction des annotations et des tolérances géométriques de chaque pièce. Cependant, leurs impacts sont grandement assujettis à l'expérience de l'estimateur, et ce, même si certaines spécifications dictent l'interprétation de ces tolérances dans le milieu aéronautique. Ainsi, un expert analysera les annotations en tenant compte des capacités de son parc machine et de la stratégie d'usinage qu'il envisage sans forcément prendre en compte les liens sémantiques entre elles. Dans le but d'avoir une représentation objective de la difficulté des annotations, nous utiliserons comme troisième composant un score tiré du travail de Proteau (2016). Ce score « 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. » (Proteau, 2016, p. 63).

Les annotations et les informations nécessaires concernant les éléments topologiques rattachés sémantiquement à ces dernières sont extraites à partir du logiciel de CAO. Le calcul utilise plusieurs paramètres listés ci-dessous :

- la distance euclidienne entre les centres de gravités de l'élément annoté et celui de référence, notée d_j ;
- l'aire des surfaces de référence S_j^d ;
- l'aire des surfaces annotées S_j^a ;
- la valeur nominale de la tolérance dimensionnelle λ_j ;

- l'intervalle de tolérance supérieure ou inférieure i associé à l'annotation j de la tolérance T, T_{ji} ;
- la longueur d'un élément cylindrique L_j.

Le score d'annotation C_3 est obtenu à partir des équations (6.10) et (6.11) telles que définies par Proteau (2016, pages 65 à 69).

$$v_j = \begin{cases} \dfrac{S_j^a}{T_{ji}^2} & \text{pour } d_j = 0 \wedge S_j^D = 0 \\ \dfrac{S_j^a \dfrac{d_j}{\sqrt{S_j^D}}}{T_{ji}^2} & \text{pour } d_j > 0 \wedge S_j^D > 0 \\ \dfrac{\lambda_j \sqrt{S_j^a}}{T_{ji}^2} & \text{pour } \lambda_j > 0 \\ \dfrac{\dfrac{L_j}{\lambda_j} S_j^a}{T_{ji}^2} & \text{pour } \lambda_j > 0 \wedge L_j > 0 \end{cases} \tag{6.10}$$

$$C_3 = \text{Score d'annotation} = \log_{10}(\sum_{j=1}^{m} v_j) \tag{6.11}$$

6.5 Le coût d'ébavurage

Le dernier coût est celui de l'ébavurage. Cette opération est, dans la majorité des cas pour nos partenaires industriels, effectuée à la main par un opérateur après l'usinage du produit. La Figure 6.7 présente la décomposition de ce coût. Le taux horaire du technicien est directement pris dans la table correspondante de la base de données.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

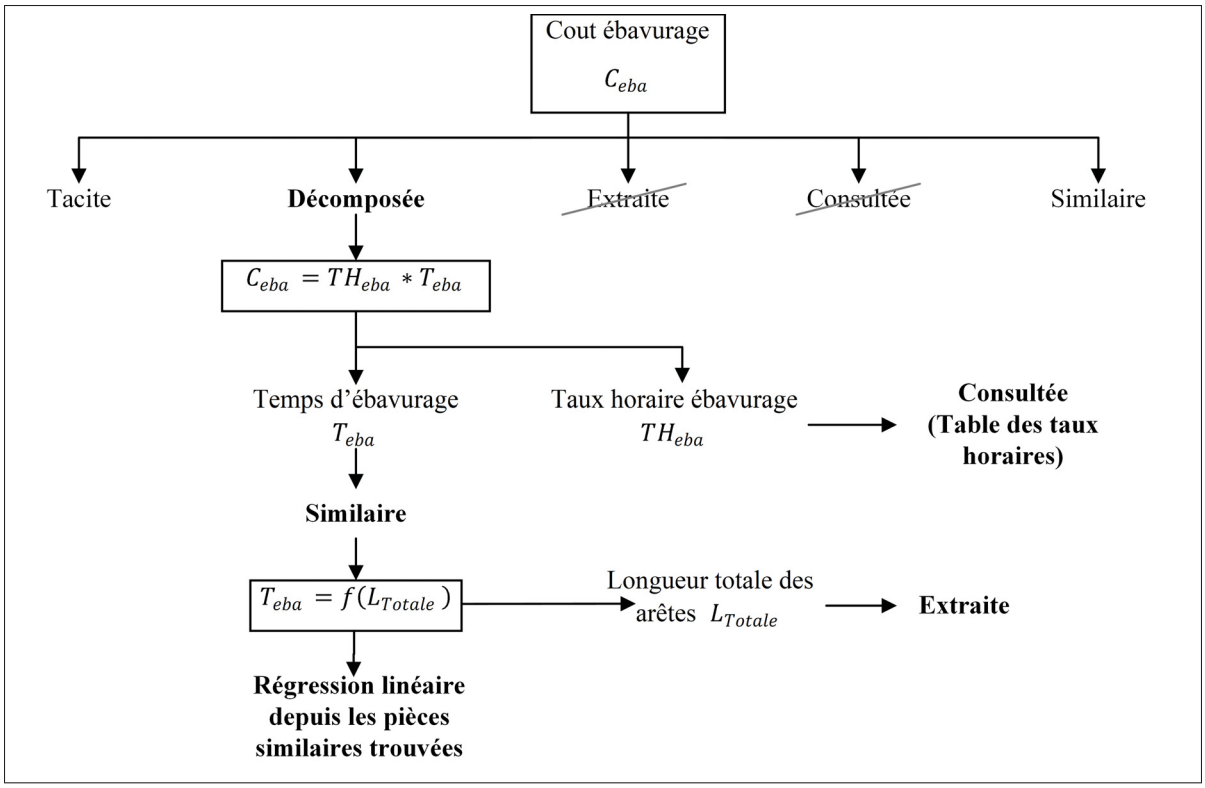

Figure 6.7 Décomposition du coût d'ébavurage

6.5.1 Calcul du temps d'ébavurage

De façon très analogique au coût d'usinage, un bon chiffrage de cette opération repose sur une estimation satisfaisante du temps nécessaire à l'ébavurage du produit. Celui-ci sera approximé en se basant sur les temps d'ébavurage de pièces similaires et la longueur totale des arêtes de ces pièces. Cette longueur totale L_{totale} est prise directement depuis le modèle 3D en utilisant une API d'analyse et d'extraction de la géométrie Brep. Nous supposons donc que le temps d'ébavurage est corrélé à cette longueur et qu'il est possible d'en tirer une relation linéaire comme le montre l'équation (6.12).

$$T_{eba} = \beta_0 + \beta_1 L_{Totale} + \varepsilon \tag{6.12}$$

6.6 Analyse de corrélation et de régression linéaire

6.6.1 Analyse primaire

Dans un premier temps afin de déterminer si les liens et relations évoqués précédemment existent bel et bien, plusieurs analyses de corrélation linéaire, dite de Pearson vont être menées. Voici la liste des corrélations que nous allons évaluer :

- la longueur et la largeur du brut en fonction de la longueur et la largeur de la boite englobante ;
- le temps d'usinage en fonction des composants C_1, C_2 et C_3 (soit le volume à enlever couplé à l'usinabilité, la surface totale et le score d'annotation) ;
- le temps d'ébavurage en fonction de la longueur totale des arêtes.

Cette partie présente, dans les Tableaux 6.1 et 6.2, les données nécessaires aux calculs des composants du temps d'usinage et aux analyses de corrélation.

Tableau 6.1 Informations géométriques pour le brut et l'ébavurage

Pièce	l_{BE} **[in]**	L_{BE} **[in]**	l_{brut} **[in]**	L_{brut} **[in]**	L_{Totale} **[in]**	T_{eba} **[min]**
1	28,62	99,60	32,25	104,25	393700,8	175
2	28,62	99,60	32,25	104,25	393700,8	180
3	24,52	88,07	31,125	93	78740,2	90
4	24,52	88,07	31,125	93	78740,2	85
5	12,83	57,52	16,5	61,5	75450	45
6	12,83	57,52	16,5	61,5	75450	46
7	12,28	42,64	16,5	48	39370,1	23
8	12,28	42,64	16,5	48	39370,1	24
9	11,61	52,40	16,5	57	275590,5	100
10	11,61	52,40	16,5	57	275590,5	105
11	9,90	46,14	14,25	50,25	78740,2	34
12	9,90	46,14	14,25	50,25	78740,2	31
13	8,66	37,09	12	41,25	39370,1	22
14	8,66	37,09	12	41,25	39370,1	22
15	38,75	56,80	39,25	57,5	3564,3	19
16	38,75	58,76	39,25	59,25	3579,8	21
17	48,38	76,65	52,5	77,25	4206,9	28
18	47,64	74,20	52,5	75	3826,9	22
19	58,50	96,20	61,5	97,5	5154,8	35
20	58,00	94,50	60,5	96	4647,1	31
21	39,25	59,10	43,5	61,5	3374,4	20
22	47,10	71,20	52,5	72,75	3923,1	25
23	58,60	85,60	59,25	94,5	5347,4	40
24	36,75	54,90	37,75	55,75	2712,3	18
25	41,93	63,90	45,75	66	4194,2	32
26	44,70	68,10	46,25	70,5	3952,1	30
27	53,10	77,60	54,75	81,75	4453,2	29
28	56,60	82,10	57	90,75	4350,2	34

Tableau 6.2 Informations géométriques pour l'usinage

Pièce	Alliage	IM [%]	V_{final} [in^3]	A_{XY} [in^2]	$V_{effectif}$ [in^3]	V_{remove} [in^3]	A_{totale} [in^2]	C_3	T_{usi} [min]
1	7475	110	339	2103	6310	5970,3	5547,2	7,37	416,4
2	7475	110	339	2103	6310	5970,6	5550,2	7,37	415,2
3	7475	110	224	1664	4992,8	4768,4	4528,2	6,78	285,7
4	7475	110	224	1664	4992,8	4768,4	4528,2	6,78	288
5	7475	110	57	488	879,2	822,3	1474,9	6,73	133
6	7475	110	57	488,4	879,2	822,3	1474,9	6,73	126
7	7475	110	49,9	424	763,3	713,4	1100,6	6,09	131,3
8	7475	110	49,9	424	763,3	713,4	1100,6	6,09	127,2
9	7475	110	49,7	426,5	767,7	717,9	1199,4	6,21	126
10	7475	110	49,7	426,5	767,7	717,9	1199,4	6,21	121,2
11	7475	110	39,2	312,5	562,5	523,2	913	6,71	92,4
12	7475	110	39,2	312,5	562,5	523,2	913	6,71	90,6
13	7475	110	28,2	222,8	401,1	372,9	684,5	6,49	90
14	7475	110	28,2	222,8	401,1	372,9	684,5	6,49	82,2
15	7075	120	187,1	773,6	5337,6	5150,5	2497,6		322,2
16	7075	120	166,9	786,7	4248	4081	2509,6		284,4
17	7075	120	214	1066,7	6080	5866	3375,2		320,5
18	7075	120	225,2	1115,5	5688,8	5463,6	3247,2		335,7
19	7075	120	260,5	1519,1	9570,6	9310	4259,2		432
20	7075	120	279	1532,7	8276,4	7997,4	4350,4		375,8
21	7075	120	178	790,3	4267,6	4089,6	2720,4		220,2
22	7075	120	205,7	995,7	5376,8	5171	3287,7		276
23	7075	120	270,1	1361,8	7353,6	7083,5	4388,3		357
24	7075	120	103	1548,3	4644,8	4541,8	1718,3		168,6
25	7075	120	163,8	692	2906,3	2742,5	2674,4		246,4
26	7075	120	162,2	744,3	2679,4	2517,2	2736,1		202,8
27	7075	120	188,2	854,3	3588,2	3400	3182,4		252,6
28	7075	120	361,4	2725,6	7359	6997,6	6384,2		327,6

À l'aide d'un logiciel statistique, nous procédons aux différentes analyses de corrélation entre nos paramètres. Le Tableau 6.3 indique les résultats obtenus. Les distributions graphiques concernant chaque composant sont illustrées dans les Figure 6.8 à Figure 6.13.

Tableau 6.3 Coefficient de corrélation de Pearson entres les paramètres

Paramètres observés	**Coefficient de Pearson**	**Valeur P**
T_{usi} et C_1	0,929	<0,0001
T_{usi} et C_2	0,900	<0,0001
T_{usi} et C_3	0,773	0,003
L_{brut} et L_{BE}	0,996	<0,0001
l_{brut} et l_{BE}	0,994	<0,0001
T_{eba} et L_{Totale}	0,941	<0,0001

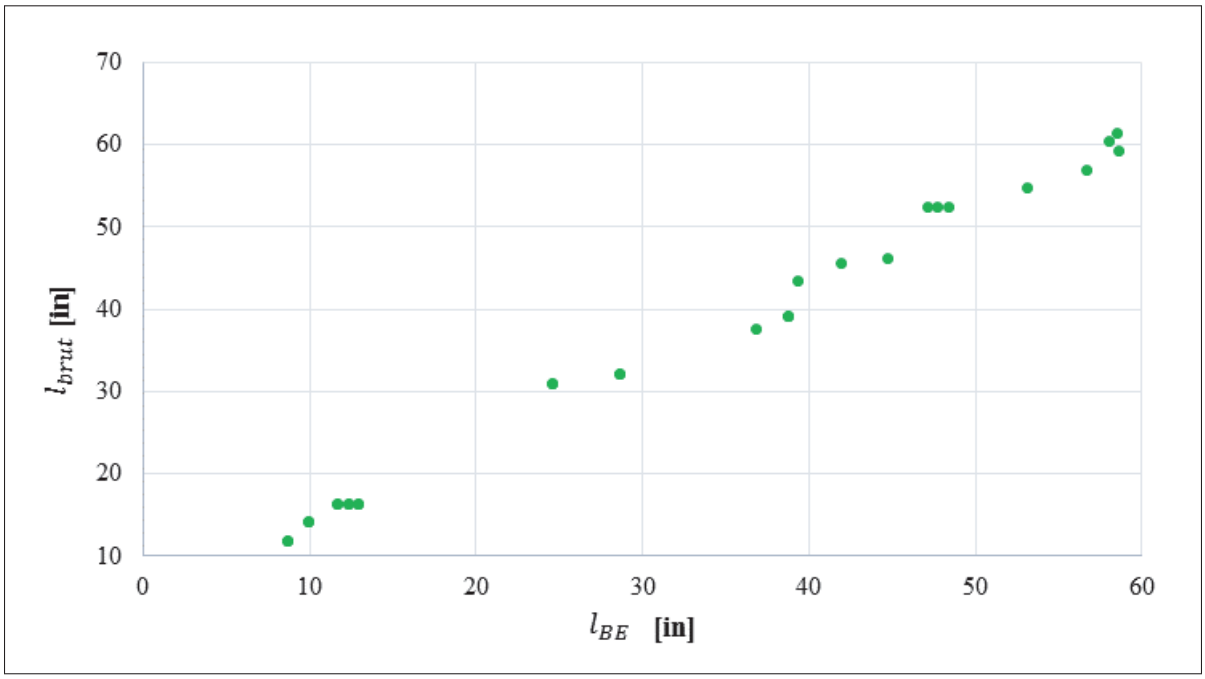

Figure 6.8 Distribution entre l_{BE} et l_{brut}

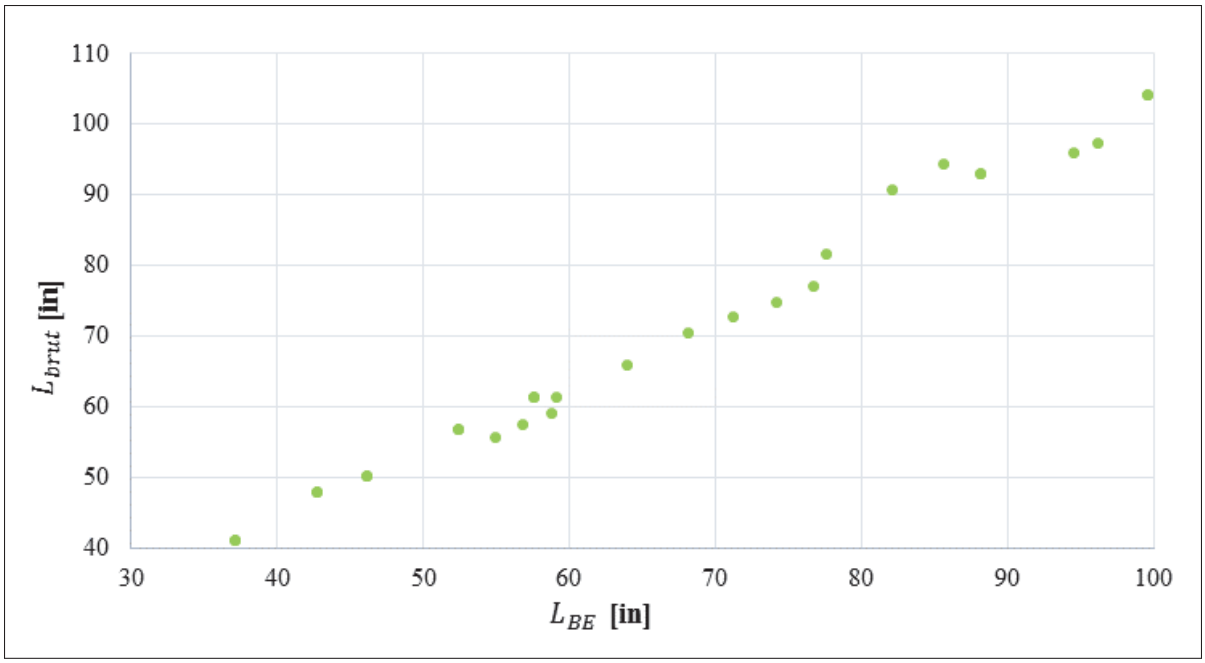

Figure 6.9 Distribution entre L_{BE} et L_{brut}

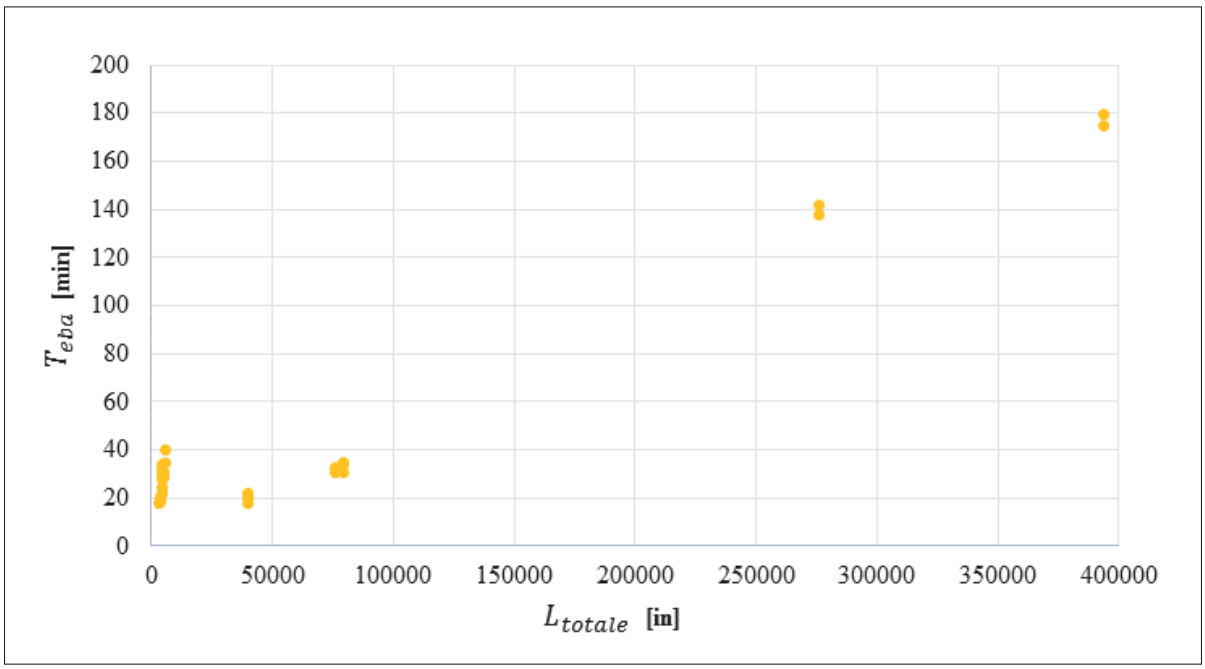

Figure 6.10 Distribution entre L_{Totale} et T_{eba}

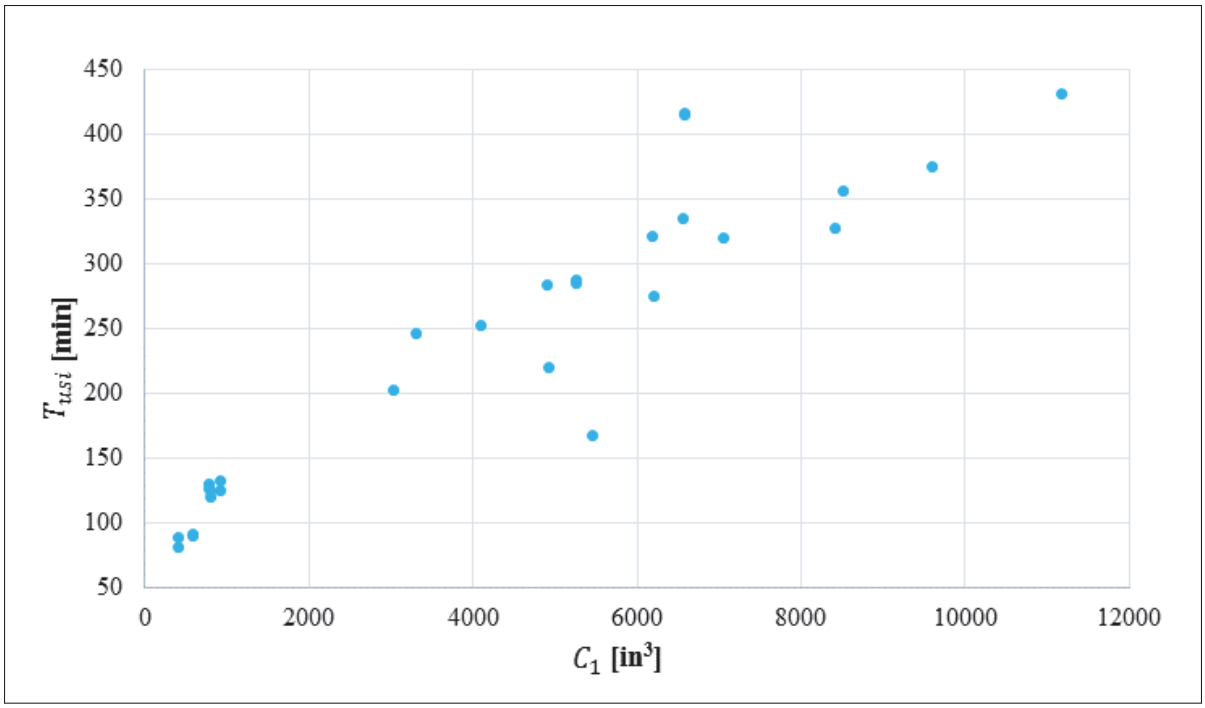

Figure 6.11 Distribution entre C_1 et T_{usi}

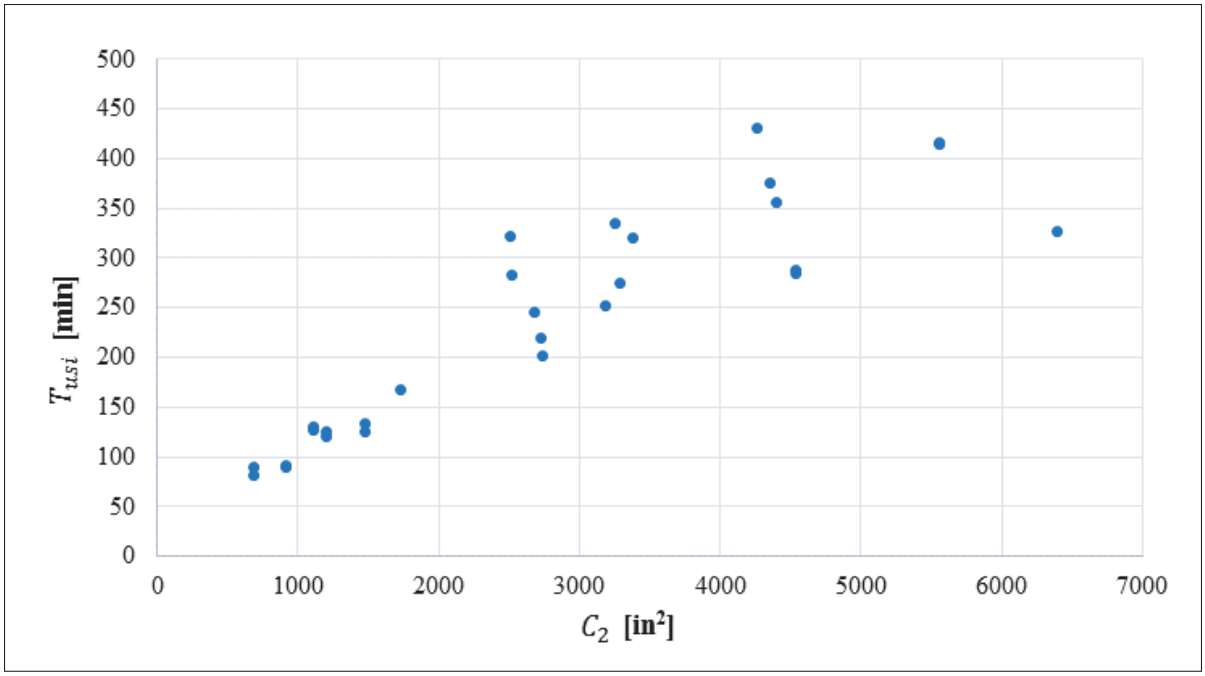

Figure 6.12 Distribution entre C_2 et T_{usi}

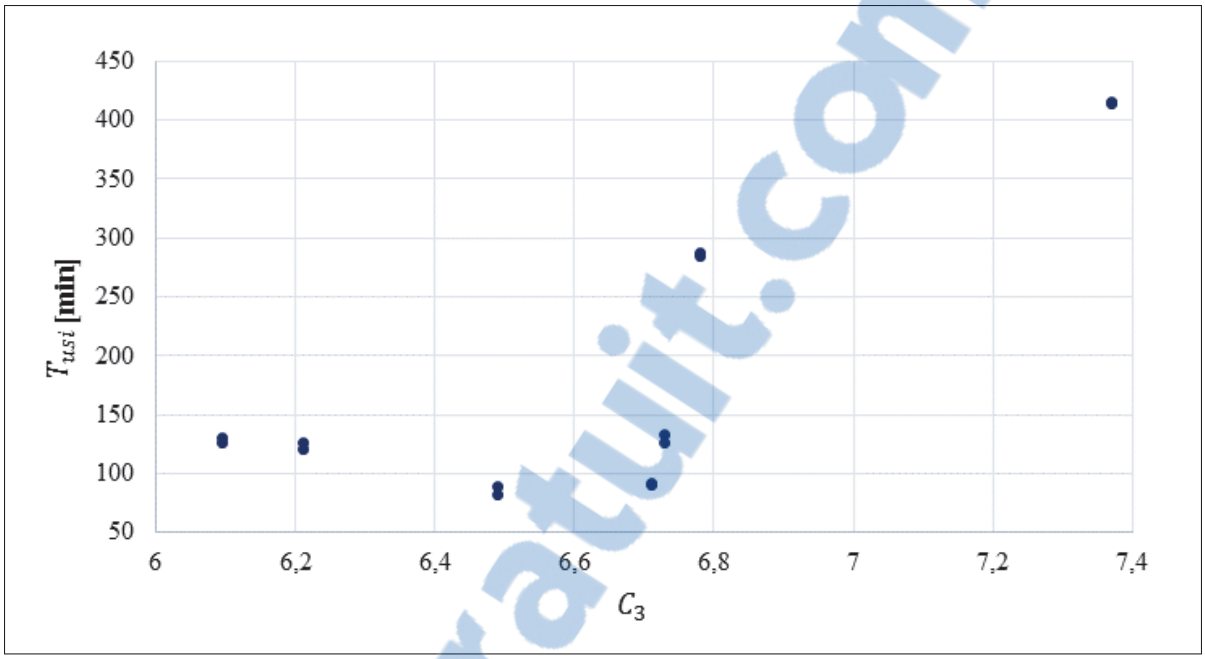

Figure 6.13 Distribution entre C_3 et T_{usi}

Pour commencer, nous observons dans le Tableau 6.2 que les pièces 15 à 28 ne disposent pas de score d'annotation C_3. En effet, les modèles 3D de ces produits n'étaient pas enrichis et ne contenaient que leur représentation géométrique. Par conséquent, il nous est impossible de calculer un score d'annotation pour ces pièces. Cependant nous ne les écartons pas pour autant de nos analyses. Elles ne seront tout simplement pas utilisées pour juger le composant C_3 lié aux annotations.

Ensuite, la distribution de (l_{BE},l_{brut}) présentée en Figure 6.8 révèle une tendance intéressante. Plusieurs valeurs de largeur de boîte englobante se voient attribuer la même largeur de brut. Ce phénomène énoncé en section 6.3.1 vient des contraintes des fournisseurs de matière première qui travaillent par intervalle de ¼ de pouce. En traçant cette distribution pour un plus grand nombre de pièces, celle-ci formerait un escalier où chaque palier correspondrait à une largeur standard du fournisseur au ¼ de pouce. Sur la distribution de (l_{BE},l_{brut}), cet effet est légèrement visible. On devrait également l'observer sur la distribution de (L_{BE},L_{brut}) mais notre étude manque de produits pour que la tendance apparaisse.

Rapport-Gratuit.com

Par ailleurs, sur la distribution de la Figure 6.10 nous pouvons déjà distinguer deux catégories de pièces. La première catégorie correspond aux pièces 15 à 28 dont la longueur totale des arêtes n'excède pas 5155 pouces. La seconde catégorie regroupe les pièces 1 à 14 plus imposantes et ayant une longueur totale bien supérieure. Cette distinction se remarque clairement sur la distribution correspondante. Elle apparaît également sur la Figure 6.11 de la distribution entre C_1 et T_{usi} et sur la Figure 6.12 de la distribution entre C_2 et T_{usi} mais de manière plus subtile.

De manière générale, les différentes distributions coïncident avec nos hypothèses et peu de points semblent anormaux ou s'écartent de la tendance générale. Seulement deux points de la Figure 6.11 affichant des temps d'usinage de 416 et 415 minutes semblent s'éloigner du reste de la répartition. Ceux-ci correspondent respectivement aux pièces 1 et 2 qui présentent les annotations les plus complexes avec un score de 7,37. On peut donc supposer que ces annotations ont eu une grande influence sur le temps d'usinage. Cela expliquerait l'écart de temps avec les pièces ayant un volume à enlever, C_1, similaire mais un score d'annotation inférieur.

D'autre part, les résultats de nos analyses de corrélation linéaire sont très concluants. Il est évident que les dimensions de la boîte englobante et les dimensions du brut sont liées par une relation linéaire. Il en va de même pour le temps d'ébavurage et la longueur totale des arêtes qui affiche un coefficient de Pearson de 0,941. De plus, nous pouvons également soutenir que les composant C_1, C_2 et C_3 que nous avons définis sont effectivement reliés au temps d'usinage T_{usi}. Il est toutefois important de remarquer que le volume à usiner et la surface de la pièce semble plus corrélés à ce temps que le score d'annotation dont le coefficient de Pearson n'est que de 0,773. Dans tous les cas, l'indice de signification, représenté par la valeur P, reste inférieur au seuil de signification de 0,05. Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse nulle qui affirme une absence d'effets et de relations entre les variables indépendantes étudiées.

6.6.2 Combinaison des composants du temps d'usinage

Nous allons ici proposer une combinaison mathématique des trois composants du temps d'usinage évoqués précédemment. Les analyses effectuées ont mis en évidence les fortes corrélations entre T_{usi} et C_1, C_2. Le score d'annotation, bien que moins influant, n'est toutefois pas négligeable et il convient de le prendre en compte dans cette combinaison. Ces résultats se recoupent avec ceux de Proteau (2016) concernant l'estimation de la complexité d'une pièce usinée. De la même manière, les annotations viennent pondérer notre temps d'usinage qui sera déterminé en majeur partie par le volume et la surface à usiner. L'équation (6.14) propose donc la construction de ce nouveau composant C_4 qui se rapproche étroitement du modèle de Proteau (2016).

C_1, C_2 et C_3 opèrent à des échelles bien différentes et doivent être standardisés en amont de cette combinaison afin d'égaliser leur impact sur le coefficient résultant C_4. On leur affecte par conséquent une valeur allant de 1 à 10 grâce à l'équation (6.13) pour obtenir les nouveaux composants standardisés $\hat{C}_1$, $\hat{C}_2$ et $\hat{C}_3$.

$$\begin{cases} x_{new} &= \dfrac{max_{new} - min_{new}}{max_{old} - min_{old}} \left(x - max_{old}\right) + max_{new} \\ max_{new} &= 10 \\ min_{new} &= 1 \end{cases} \tag{6.13}$$

$$C_4 = \begin{cases} \sqrt{\hat{C}_1 \hat{C}_2} \dfrac{\hat{C}_3}{10} & \text{si } C_3 \text{ existe} \\ \sqrt{\hat{C}_1 \hat{C}_2} & \text{sinon} \end{cases} \tag{6.14}$$

Dans le but de déterminer si un lien significatif existe toujours entre le temps d'usinage et notre nouveau composant C_4, une analyse de corrélation linéaire est conduite. Le Tableau 6.4 présente les données sortantes de l'équation (6.13) et de l'équation (6.14). Le Tableau 6.5 donne

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

les résultats de l'analyse de corrélation et finalement la Figure 6.14 illustre graphiquement la distribution entre T_{usi} et C_4.

Le coefficient de corrélation linéaire observé dans le Tableau 6.5 nous permet d'affirmer que notre modèle est très concluant pour expliquer le temps d'usinage. Sa valeur de 0,941 signifie que la majeure partie de ce temps peut être décrit à l'aide de nos trois composants. Cette observation vient valider notre seconde hypothèse concernant les relations sur le temps d'usinage et sa composition. De plus, la combinaison de nos composants offre un coefficient de Pearson supérieur à celui de chaque composant séparément, ce qui justifie notre choix et l'utilisation de ce nouveau composant C_4. Par ailleurs, la valeur P, environ égale à 0,000, nous indique que nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle pour cette corrélation.

Aucun écart notable n'est observé dans la distribution de la Figure 6.14 et on remarque que cette dernière suit une tendance assez linéaire. On y retrouve également les deux catégories de pièces distinctes.

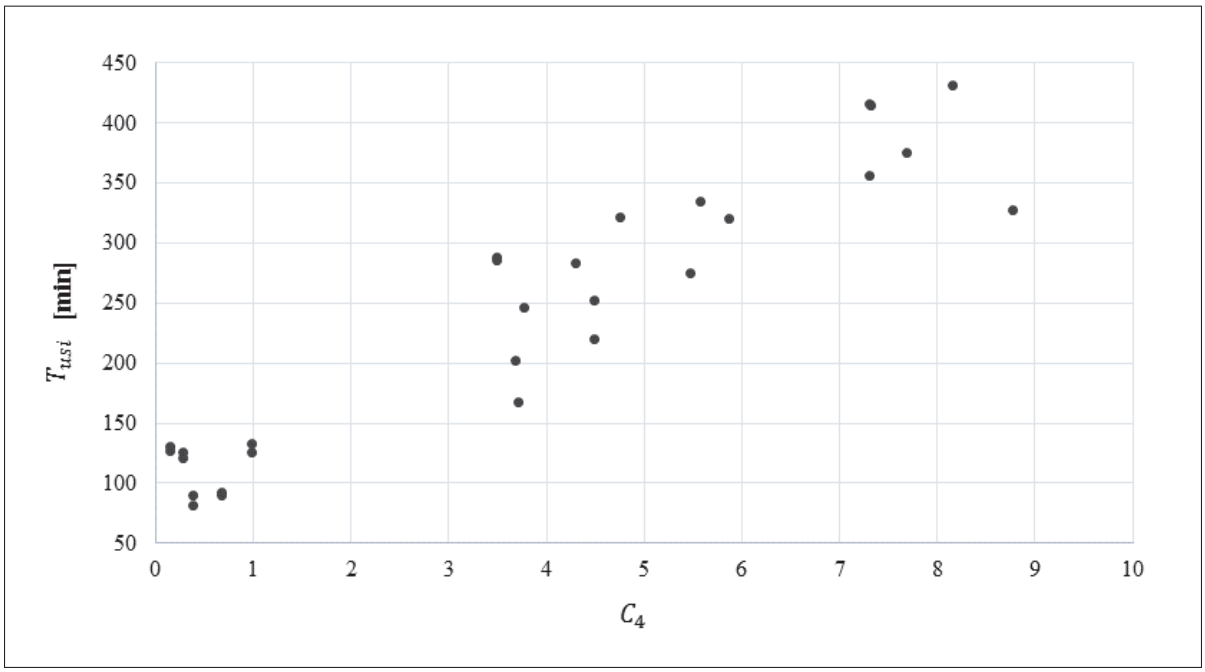

Figure 6.14 Distribution entre C_4 et T_{usi}

Tableau 6.4 Valeurs des composants standardisés

Pièce	$\hat{C}_1$	$\hat{C}_2$	$\hat{C}_3$	C_4
1	6,149	8,678	10,000	7,305
2	6,149	8,683	10,000	7,307
3	5,043	7,069	5,832	3,482
4	5,043	7,069	5,832	3,482
5	1,413	2,248	5,472	0,975
6	1,413	2,248	5,472	0,975
7	1,313	1,657	1,000	0,148
8	1,313	1,657	1,000	0,148
9	1,317	1,813	1,825	0,282
10	1,317	1,813	1,825	0,282
11	1,138	1,361	5,345	0,665
12	1,138	1,361	5,345	0,665
13	1,000	1,000	3,793	0,379
14	1,000	1,000	3,793	0,379
15	5,826	3,863		4,744
16	4,752	3,882		4,295
17	6,544	5,249		5,861
18	6,140	5,047		5,566
19	10,000	6,645		8,151
20	8,683	6,789		7,677
21	4,761	4,215		4,480
22	5,846	5,110		5,466
23	7,765	6,848		7,293
24	5,215	2,632		3,705
25	3,409	4,142		3,758
26	3,183	4,240		3,674
27	4,069	4,944		4,485
28	7,679	10,000		8,763

Tableau 6.5 Coefficient de corrélation entre C_4 et T_{usi}

Paramètres observés	Coefficient de Pearson	Valeur P
T_{usi} et C_4	0,941	<0,0001

Les résultats de nos analyses de corrélation linéaires nous permettent de supposer que nos relations sont d'excellentes candidates pour trouver les différents paramètres inconnus de notre modèle de coût. Cependant, ces corrélations seules sont insuffisantes pour affirmer que les coûts

des pièces peuvent être correctement prédits avec notre modèle. Des analyses de régression linéaires sont obligatoires dans le but d'évaluer ces prédictions et la validité de notre approche.

6.6.3 Analyse de régression linéaire

La corrélation n'impliquant pas la causalité, il est nécessaire d'évaluer la mise en application des différentes relations et de juger leur exactitude. Nous effectuons donc des analyses de régression linéaires utilisant la méthode des moindres carrés pour chacune des corrélations évoquées plus tôt. Dans le but de quantifier la qualité de ces régressions et des prédictions qui en découlent, nous employons plusieurs mesures et tests :

- le WMAPE (ou *Weighted Mean Absolute Percentage Error*) défini par l'équation (6.15) avec w_i le poids de chaque valeur dans la régression. Si la similarité n'est pas prise en compte, ce poids vaut 1 ;
- le RMSE (ou *Root Mean Square Error*) défini par l'équation (6.16) ;
- le coefficient de détermination ajusté R^2_{ajus} qui est le rapport de la variabilité expliquée par la régression sur la variabilité totale prenant en compte le nombre de termes du modèle ;
- le test de Durbin-Watson qui permet de juger du phénomène d'autocorrélation au sein des résidus (pour écarter ce phénomène le résultat du test doit être environ égal ou supérieur à 2,0).

$$\text{WMAPE} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \sum_{i=1}^{n} w_i \left| \frac{(\hat{y}_i - y_i)}{y_i} \right| \tag{6.15}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \tag{6.16}$$

Le Tableau 6.6 présente les résultats des différents tests et mesures et la Figure 6.15 donne un aperçu de la régression obtenue entre le temps d'usinage et le composant C_4 avec les limites de prédiction ($\alpha = 0.1$).

Tableau 6.6 Résultats des mesures et tests des régressions linéaires

Relations observés	R^2_{ajus}	WMAPE [%]	RMSE	Durbin-Watson
$L_{brut} = f(L_{BE})$	0,987	2,54	2,24	1,22
$l_{brut} = f(l_{BE})$	0,992	3,62	1,57	1,26
$T_{eba} = f(L_{Totale})$	0,880	29,24	15,22	0,61
$T_{usi} = f(C_4)$	0,881	15,56	38,87	0,92

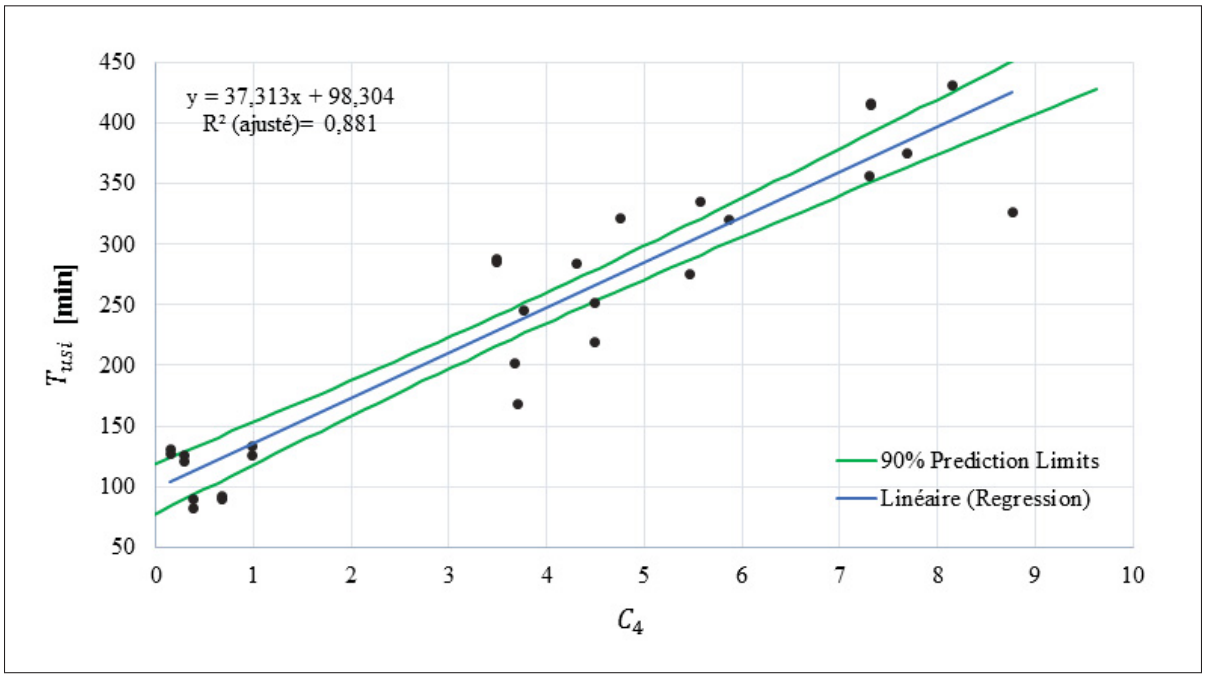

Figure 6.15 Droite de régression entre C_4 et T_{usi}

De manière générale, nous constatons que les régressions linéaires affichent des coefficient de détermination assez « forts » dans la majorité des cas. Notre approche explique presque totalement les variations concernant les longueurs et les largeurs de brut ($R^2_{ajus} > 98\%$ dans les deux cas). Par contre, notre méthode s'avère moins efficace pour les temps d'ébvurage et d'usinage où seulement 88% des variations sont expliquées par le modèle. On peut voir sur la Figure 6.15 que plus de la moitié des données sortent de l'intervalle de prédiction du modèle entre (C_4 et T_{usi}). Cette constatation peut également être faite pour la régression entre (L_{Totale} et T_{eba}) bien que non illustrée ici.

L'analyse des mesures d'erreurs RMSE et WMAPE conduit à des observations identiques. Les prédictions sont proches des valeurs réelles données par les experts pour les dimensions brutes mais s'en écartent grandement pour les deux autres variables. Les pourcentages d'erreur pour la longueur et la largeur du brut sont respectivement 2,5% et 3,6% ce qui est excellent. Cependant, ces erreurs montent respectivement à 16% et 30% pour les temps d'usinage et d'ébavurage. Bien que cette erreur puisse être jugée comme acceptable pour le temps d'usinage, ce n'est pas le cas pour l'erreur sur l'ébavurage qui est bien trop élevée. Il semble donc que notre approche basée sur la longueur totale des arêtes ne soient pas totalement justifiée et ne permette pas d'expliquer suffisamment le phénomène. Notre supposition se révèle à première vue partiellement fausse.

Malgré tout, nous effectuons les tests de Durbin-Watson afin de savoir si les résidus de nos modèles présentent des phénomènes d'autocorrélation. Malencontreusement, l'ensemble de ces tests échoue et nous indique que les résidus de tous nos modèles sont sujets à ce phénomène. Une fois de plus, les deux variables les plus touchées sont les temps d'usinage et d'ébavurage avec des résultats de 0,922 et 0,610. Force est de constater la même tendance que pour les erreurs concernant ces tests de Durbin-Watson. Visuellement, avec la Figure 6.16 à Figure 6.18, nous remarquons que des tendances existent pour tous nos résidus. Cela est encore plus visible sur la Figure 6.17 présentant les résidus pour les prédictions de T_{eba}.

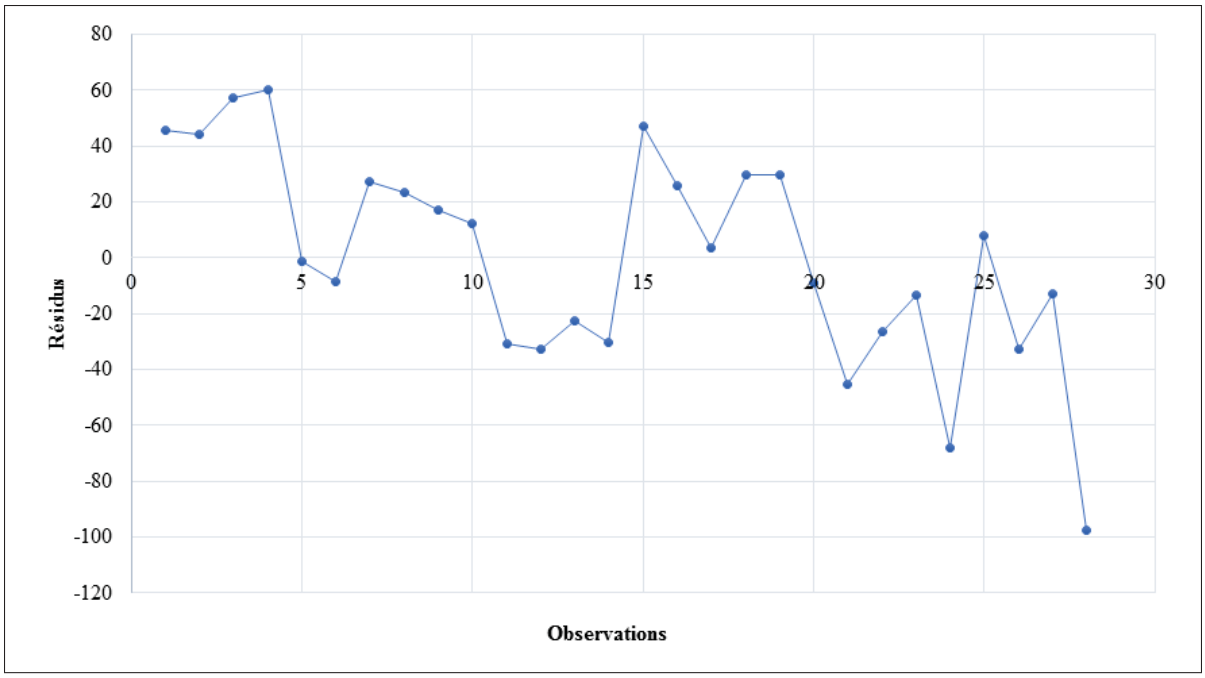

Figure 6.16 Distribution des résidus pour T_{usi}

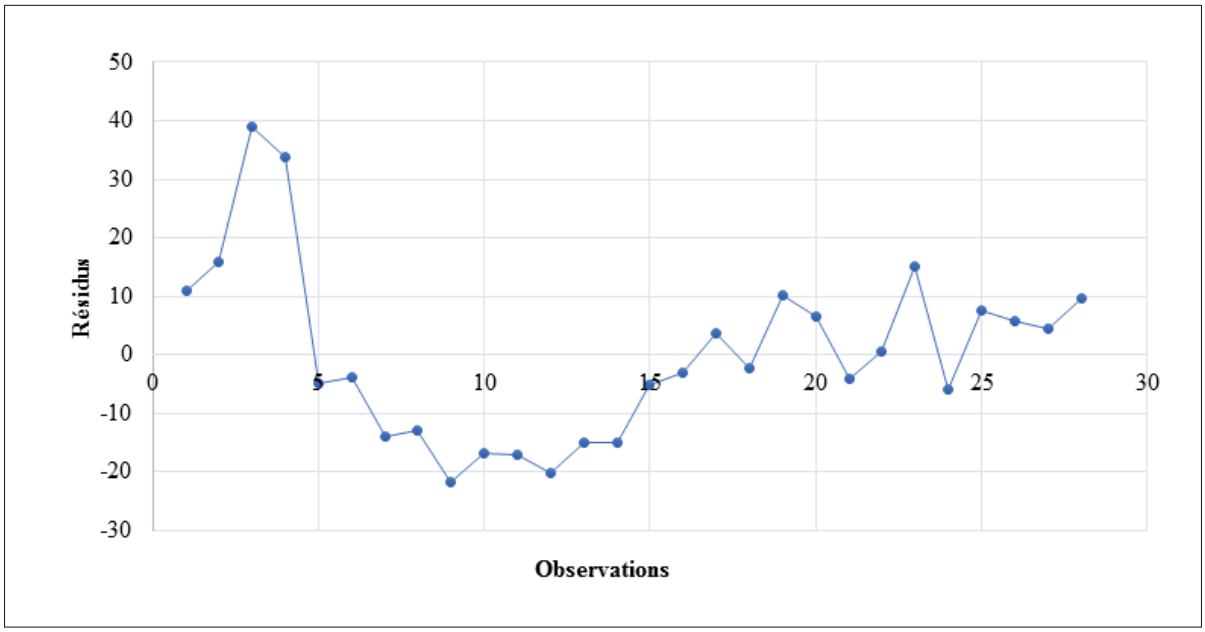

Figure 6.17 Distribution des résidus pour T_{eba}

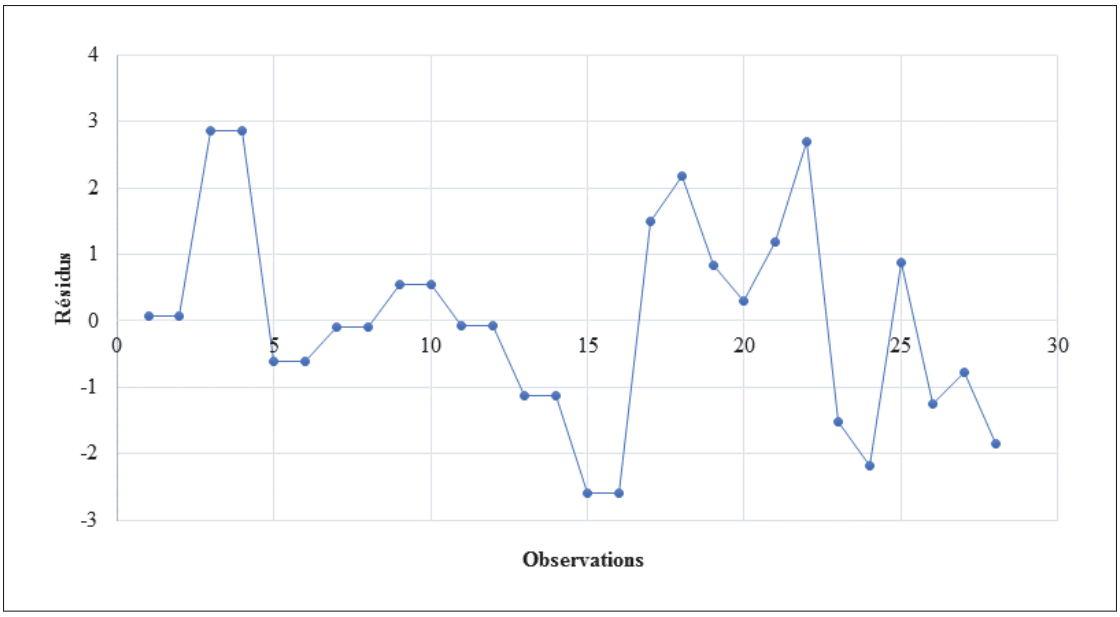

Figure 6.18 Distribution des résidus pour L_{brut}

Au vue de ces résultats, nous pouvons fortement supposer que des phénomènes non-linéaires que nous ne prenons pas en compte influencent nos variables. Nous avons pu constater dans l'étude en industrie qu'un grand nombre d'éléments influençaient les décisions des estimateurs pour le choix des dimensions brutes et des différents temps. Notre première approche tente d'expliquer ces phénomènes complexes et multidimensionnels à l'aide de relations simples et d'une poignée de paramètres. Il est évident que d'autres éléments entrent en ligne de compte laissant entrevoir de possibles opportunités d'améliorations.

Toutefois, malgré des erreurs de prédiction parfois élevées et l'échec de nos modèles face au test de Durbin-Watson, notre approche ne peut être écartée pour l'instant. En effet, bien que nos modèles présentent des résultats assez , les coefficients de détermination des différentes régressions restent significatifs. Ceux-ci démontrent que nos modèles sont effectivement liés aux paramètres observés. De plus, une question majeure reste en suspens : comment ces modèles se comportent-ils si nous prenons en compte l'index de similarité des pièces ? Avant de pouvoir affirmer si oui ou non notre approche est effectivement capable d'estimer les coûts de façon exacte, nous devons explorer cette question et en fournir une réponse.

6.7 Influence de la similarité sur les corrélations et la régression

L'ensemble des analyses a été effectué sur la totalité des 28 pièces dont nous disposons. Bien que toutes ces pièces soient des plaques d'aluminium destinées à être usinées en fraisage, elles présentent une bonne variété de forme et de taille. On pourrait certes les classer en deux familles différentes, mais le principal aspect de notre modèle n'a pas encore été mis à profit. Dans cette partie, nous allons utiliser l'index de similarité dans le but de présélectionner les pièces et de leur attribuer un poids pour ensuite effectuer les mêmes analyses que précédemment. Pour chaque référence on choisira donc une liste de pièces similaires à employer pour les calculs.

La première étape consiste donc à prendre deux produits qui seront utilisés comme référence pour les recherches de similarité géométrique parmi les 28 disponibles. Le choix se portent sur les pièces #11 et #18 qui seront également employées dans le dernier chapitre pour l'étape de validation de notre modèle d'estimation.

6.7.1 Calcul de l'index de similarité

La requête pour des pièces géométriquement similaires se fait grâce à l'API de 3DPartFinder. Celle-ci renvoie une liste de produits similaires à chaque pièce de référence choisie accompagné des distances correspondantes (voir Figure 6.19). La seconde étape consiste à calculer l'index de similarité de chacune des pièces renvoyées. Pour ce faire, nous utilisons la distance donnée par l'API et la différence de certains paramètres avec les références comme la taille de lot, la date de fabrication ou encore l'indice d'usinabilité. La composition de notre index suit l'équation (5.4) définie précédemment. Le calcul des composants se base sur des fonctions décroissantes données par l'équation (6.17) et les coefficients A_i correspondants du Tableau 6.7. Ces fonctions ont été définies arbitrairement dans le but de correspondre à nos attentes. Une pièce ayant un matériau différent, beaucoup plus vieille, ou produite en bien plus petite quantité devrait moins intervenir dans les prédictions qu'une pièce récente, dans le même alliage par exemple.

Rapport-Gratuit.com

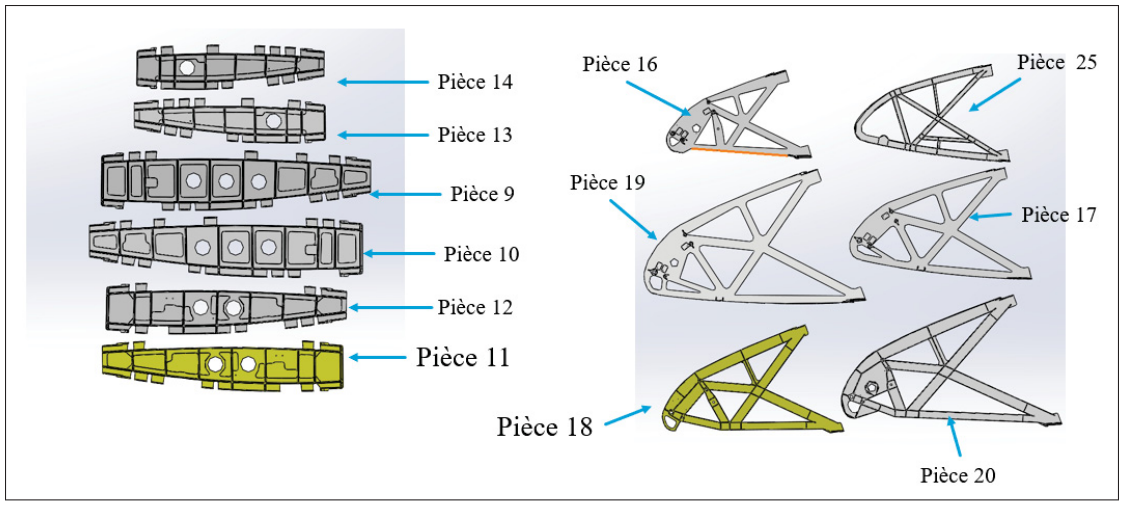

Figure 6.19 Résultats des recherches similaires pour les pièces 11 et 18

Tableau 6.7 Liste des coefficients pour les fonctions décroissantes de similarité

Coefficient	$CS_{date} : f(\Delta_{date})$ **[mois]**	$CS_{lot} : f(\Delta_{lot})$	$CS_{IM} : f(\Delta_{IM})$ **[%]**
A_0	0,002	0,05	0,05
A_1	0,005	2	2
A_2	-0,5	0,1	0,1
A_3	2	2	1.25
A_4	0,5	0,5	0,2

$$CS_i = f(x) = \frac{A_0 x + 1}{A_1 x(x - A_2) + A_3} + A_4 \tag{6.17}$$

Finalement, le Tableau 6.8 donne les index de similarité obtenus pour les pièces retenues en fonction de la référence choisie et le Tableau 6.9 présente les données nécessaires pour les analyses de corrélation et de régression. Nous faisons remarquer au lecteur que les pièces de référence #11 et #18 apparaissent dans le second tableau, car les valeurs de leurs composants C_i sont nécessaires dans le CHAPITRE 7. De même, nous avons standardisé à nouveau les composants en amont de ces analyses, mais cela ne change en rien leur comportement.

Tableau 6.8 Index de similarité *IS* des pièces sélectionnées pour chacune des références

	Référence #11					
Pièces sélectionnées	Distance	CS_{geo}	CS_{lot}	CS_{date}	CS_{IM}	IS
9	8,525E-02	0,921	1	1	1	0,921
10	8,525E-02	0,921	1	1	1	0,921
12	6,077E-03	0,994	1	1	1	0,994
13	8,904E-02	0,918	1	1	1	0,918
14	8,904E-02	0,918	1	1	1	0,918
	Référence #18					
16	1,624E-01	0,860	1	1	1	0,860
17	1,045E-01	0,905	1	1	1	0,905
19	9,484E-02	0,913	1	1	1	0,913
20	5,815E-02	0,945	1	1	1	0,945
25	2,005E-01	0,833	1	1	1	0,833

Tableau 6.9 Valeurs des composants standardisés pour les pièces sélectionnées

	Référence #11				
Pièces	T_{usi} [min]	$\hat{C}_1$	$\hat{C}_2$	$\hat{C}_3$	C_4
9	126	10,000	10,000	10,000	10,000
10	121,2	10,000	10,000	10,000	10,000
11	92,4	4,921	4,995	5,154	2,555
12	90,6	4,921	4,995	5,154	2,555
13	90	1,000	1,000	1,000	0,100
14	82,2	1,000	1,000	1,000	0,100
	Référence #18				
16	284,4	2,834	1,000		1,684
17	320	5,280	5,232		5,256
18	335	4,729	4,606		4,667
19	432	10,000	9,554		9,774
20	375	8,201	10,000		9,056
25	246	1,000	1,806		1,344

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

6.7.2 Résultats et discussions

Les résultats des analyses de corrélation se trouvent dans le Tableau 6.10 et ceux des analyses de régression linéaire dans le Tableau 6.11 et le Tableau 6.12.

Tableau 6.10 Coefficient de Pearson avec la similarité

Paramètres observés	**Coefficient de Pearson**			**Variation [%]**	
	Sans *IS*	Réf #11	Réf #18	Réf #11	Réf #18
L_{brut} et L_{BE}	0,996	1,000	0,999	0,37	0,34
l_{brut} et l_{BE}	0,994	0,997	0,990	0,32	-0,41
T_{eba} et L_{Totale}	0,941	0,998	0,909	6,08	-3,37
T_{usi} et C_4	0,941	0,981	0,961	4,28	2,10

Un premier regard sur ces résultats nous permet d'affirmer que dans la plupart des cas l'utilisation de la similarité améliore nos corrélations. En effet, seulement deux coefficients de Pearson voient leur valeur diminuer, et ce, pour la même pièce de référence. Pour la pièce #18, la corrélation entre la longueur totale et le temps d'ébavurage passe de 0,941 à 0,909 et celle entre la largeur de la boîte englobante et la largeur du brut diminue très légèrement de 0,007. Néanmoins, ces analyses révèlent des corrélations positives et suffisamment « fortes » entre nos variables. De plus, les valeurs P non indiquées ici nous permettent de rejeter l'hypothèse nulle pour la totalité de ces corrélations.

Dans l'ensemble, la pièce #18 tire moins profit de ces analogies que la pièce 11 dont l'intégralité des coefficient de Pearson augmente. Cela peut s'expliquer par le fait que les pièces sélectionnées pour la référence #18 possèdent des indices de similarité globalement plus faibles. Les produits choisis pour la pièce #11 affichaient tous au minimum un composant de similarité géométrique de 91,8% alors que ce composant CS_{geo} baisse à 83,3% au minimum pour les produits correspondants à la pièce #18. On peut donc conclure que notre sélection pour le produit #18 est plus loin géométriquement de notre référence que celle faite pour le produit #11. Cela se traduit notamment par des améliorations moins notables sur les corrélations voire

des diminutions. Il nous reste à voir si ce phénomène se reproduit également sur les analyses suivantes.

Tableau 6.11 Coefficient de détermination R^2_{ajus} et résultats des tests de Durbin-Watson avec la similarité

Relations observées	R^2_{ajus}			**Durbin-Watson**		
	Sans *IS*	Réf #11	Réf #18	Sans *IS*	Réf #11	Réf #18
$L_{brut} = f(L_{BE})$	0,987	1,000	0,998	1,22	2,47	0,63
$l_{brut} = f(l_{BE})$	0,992	0,992	0,972	1,26	2,48	2,25
$T_{eba} = f(L_{Totale})$	0,880	0,996	0,756	0,61	3,02	1,23
$T_{usi} = f(C_4)$	0,881	0,948	0,892	0.92	2,8	2,38

Sans grande surprise, au regard du Tableau 6.11, le même constat peut être tiré concernant les coefficients de détermination ajustés des régressions linéaires. L'apport de la similarité est notable pour la plupart des relations et, comme on peut le voir sur l'exemple de la Figure 6.20, la quasi-totalité de nos données se retrouvent dans l'intervalle de prédiction du modèle correspondant. Cette tendance s'observe également pour les autres régressions exceptée celle du temps d'ébavurage pour la référence #18. Pour cause, le coefficient de détermination associé chute de 88% à 75,6%. Ainsi, seulement 75% des variations peuvent être expliquées par le modèle dans ce cas précis. Une nouvelle fois, cette observation nous montre que l'approche choisie pour le temps d'ébavurage n'est pas forcement idéale pour tous les types de pièces ou que les critères de sélection des pièces similaires doivent être revus.

Ceci dit, les erreurs des prédictions pour le temps d'ébavurage ont grandement baissées. Tel que mentionné dans le Tableau 6.12, le WMAPE passe de 29% sans similarité à 5,8% et 5,2% pour les pièces #11 et #18 respectivement. L'erreur moyenne pondérée du temps d'usinage diminue également de plus de 10% pour nos deux études de cas. Quel que soit le modèle observé, la similarité nous a permis de réduire remarquablement les erreurs de prédiction. Cela nous encourage dans notre démarche et contribue à renforcer notre dernière hypothèse faite au CHAPITRE 3.

Tableau 6.12 Mesures des erreurs des régressions avec la similarité

Relations observées	**WMAPE [%]**			**RMSE**		
	Sans *IS*	Réf #11	Réf #18	Sans *IS*	Réf #11	Réf #18
$L_{brut} = f(L_{BE})$	2,54	0,21	0,66	2,24	0,17	0,76
$l_{brut} = f(l_{BE})$	3,62	0,88	2,27	1,57	0,12	1,62
$T_{eba} = f(L_{Totale})$	29,24	5,80	5,15	15,22	3,11	2,62
$T_{usi} = f(C_4)$	15,56	3,34	5,11	38,87	4,56	24,32

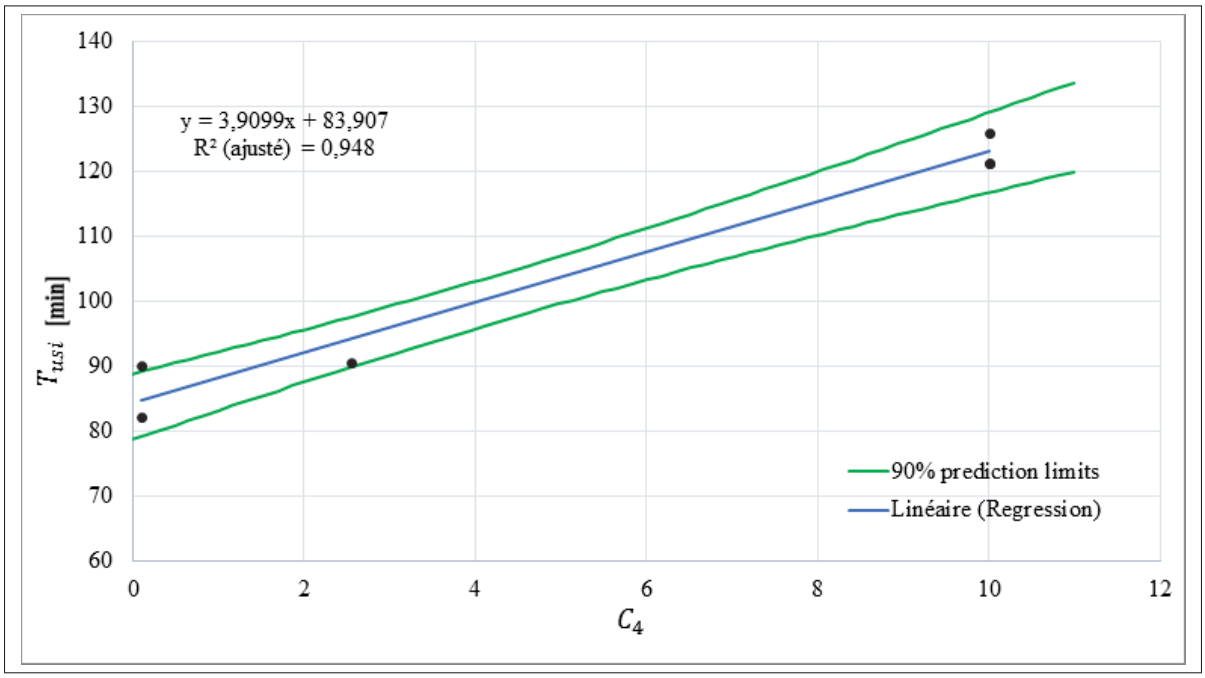

Figure 6.20 Résultats graphiques de la droite de régression pour (C_4 et T_{usi}) avec la pièce #11

De manière générale, une vérification visuelle des résidus obtenus pour les différents modèles nous autorise à conclure que la similarité influe grandement sur leur erreur potentielle. Ainsi, comme le montrent la Figure 6.21 et la Figure 6.22, ces erreurs sont fortement atténuées par l'utilisation de pièces géométriquement similaires.

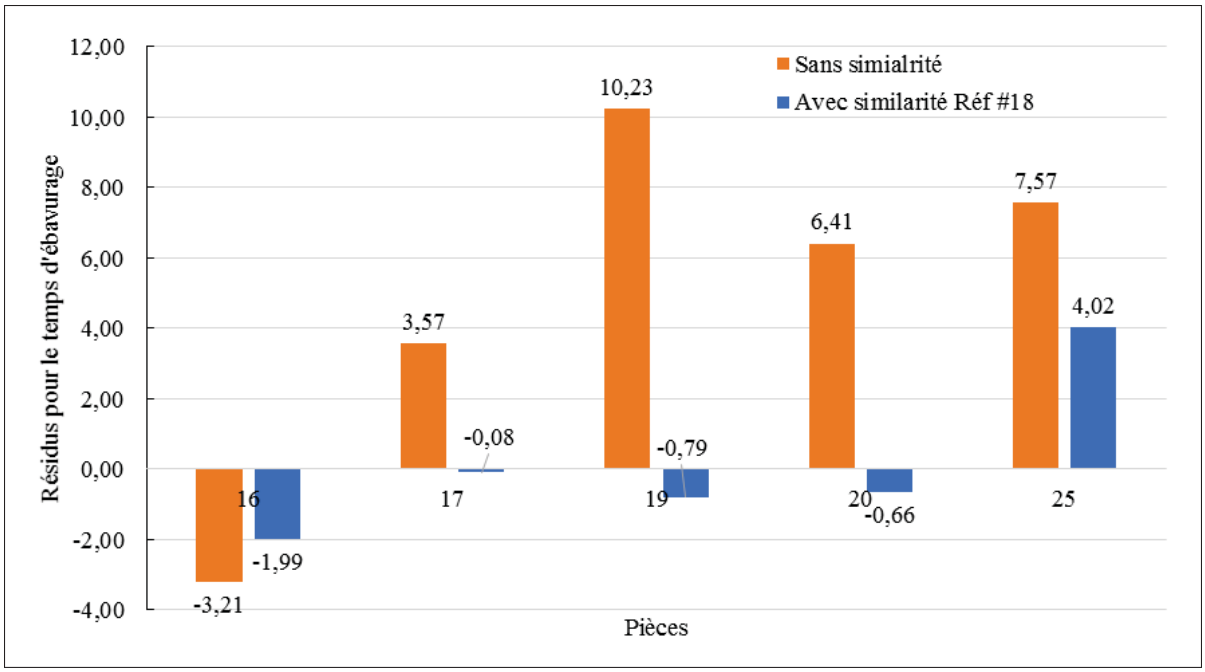

Figure 6.21 Influence de la similarité sur les résidus du temps d'ébavurage pour la pièce #18

Concernant la prédiction du temps d'ébavurage associée à la référence #18, on peut voir sur la Figure 6.22 que la pièce #25 présente un résidu bien supérieur au reste des produits. C'est également la pièce qui possède le plus faible indice de similarité avec son produit de référence, la pièce #18. En effet, le coefficient de similarité pour cette pièce n'est que de 83,3%. Il aurait donc été plus raisonnable de l'écarter de la sélection et de nos analyses pour ne pas introduire d'anomalies ou d'erreurs. Une seconde analyse de régression linéaire entre (L_{Totale} et T_{eba}) excluant la pièce #25 confirme notre supposition. En effet, le coefficient de détermination passe alors de 0,756 à 0,954 et l'erreur moyenne pondérée diminue également de 5,2% à 2,5%. Il est donc évident que cette pièce posait problème dans la construction de notre modèle et aurait du être retirée manuellement de la sélection. Cette anomalie montre que notre approche, bien que très prometteuse, nécessite toujours l'avis et la validation d'un expert afin de corriger ces déviations possibles. Cependant, par soucis d'uniformité, nous décidons de conserver cette pièce dans notre sélection pour l'étape de validation du CHAPITRE 7.

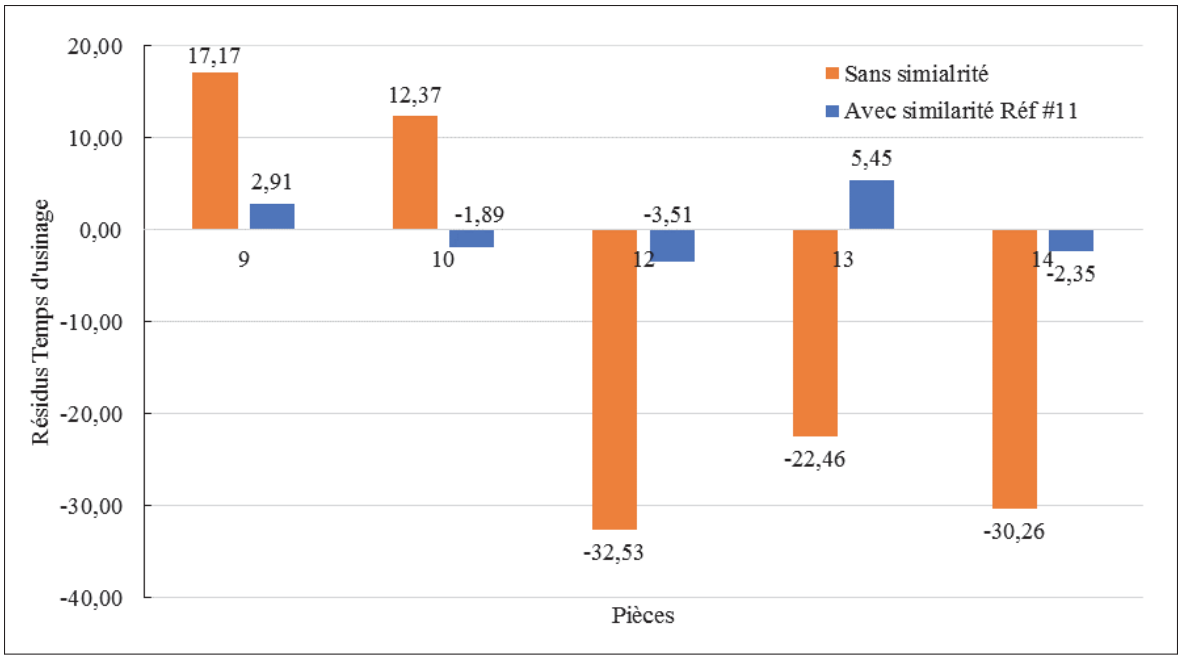

Figure 6.22 Influence de la similarité sur les résidus du temps d'usinage pour la pièce #11

Finalement, aucun de nos modèles ne parvenait à répondre au critère de Durbin-Watson avec l'ensemble des données. Nous allons reconduire ce test dans le but d'observer si ce comportement se répète après l'utilisation de la similarité. Nous rappelons qu'une valeur supérieure ou environ égale à 2,0 permet d'écarter le phénomène d'autocorrélation dans les résidus. Les résultats du Tableau 6.11 ainsi qu'une inspection visuelle des données telles qu'illustrées par la Figure 6.23, nous montrent que les phénomènes d'autocorrélation ont presque tous disparus. Cela va a l'encontre de notre précédente conclusion obtenue avec l'ensemble des pièces. L'exception se situe encore sur le temps d'ébavurage et la longueur brute pour la référence #18 et est certainement dûe à la prise en compte de la pièce #25. Néanmoins, ces résultats permettent d'affirmer que plusieurs autres aspects non pris en compte dans nos modèles influençaient fortement sur les paramètres sortants. Puisque l'utilisation de la similarité entraine quasi-automatiquement le succès de ces tests de Durbin-Watson, nous pouvons conclure que ces éléments sont en grande partie liés aux formes géométriques des produits. Cela signifie aussi que les décisions des experts se basent grandement sur la géométrie de façon implicite.

C'est un excellent exemple qui démontre que l'utilisation de la similarité géométrique est une alternative efficace à certains problèmes complexes.

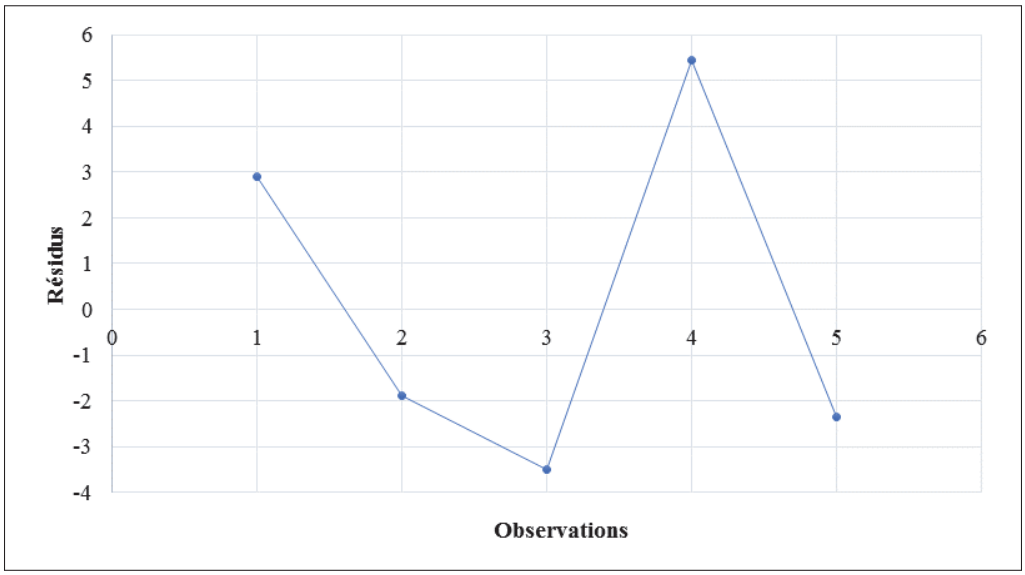

Figure 6.23 Résidus des prédictions du temps d'usinage pour la pièce #11

Cette section nous a démontré que grâce à l'utilisation de la similarité, nos modèles permettent en moyenne d'expliquer plus de 94% des variations de nos différents paramètres tout en gardant un erreur très faible. Nous pouvons à présent nous interroger sur sa capacité à prédire le coût d'une nouvelle pièce. Sera-t-il suffisamment précis et viable ? Peut-on avoir confiance dans les résultats qu'il donne ?

CHAPITRE 7

VALIDATION DU MODÈLE L'ESTIMATION DES COÛTS

7.1 Validation empirique

Le but de cette section est de vérifier si l'adaptation de notre modèle mis en place au chapitre précédent permet d'estimer correctement les coûts d'une pièce. Nous allons donc appliquer la démarche du CHAPITRE 6 sur les pièces #11 et #18 afin de choisir la machine adéquate et d'estimer le coût de matière brute, d'usinage et d'ébavurage. Les valeurs estimées seront comparées aux valeurs réelles que nous possédons pour ces pièces. Les taux horaires appliqués sont fictifs de même que les prix des matières. Le reste des informations provient soit du modèle 3D, soit de bases de données.

Les indices de confiance sont obtenus grâce à la démarche expliquée à la Section 5.5. Par mesure de précaution et en raison de l'augmentation arbitraire de 10% de l'aire projetée, le coefficient correspondant λ se voit attribuer un indice de confiance 0,95, ce qui se répercute sur la confiance du volume $V_{effectif}$ et donc des composants C_1 et C_4. De la même façon, les indices de confiance $IC_{initial}$ des dimensions brutes, du temps d'usinage et du temps d'ébavurage servant à la construction des droites de régression sont fixés à 0,95 par mesure de sécurité. Cela fait varier le coefficient correspondant r_j dans l'équation (5.6).

Les Tableau 7.1 à Tableau 7.4 résument l'ensemble des données nécessaires pour notre approche et les résultats obtenus pour chacun des différents coûts. On y retrouve également l'origine et l'indice de confiance associés aux différents paramètres. De plus, il est important de quantifier l'erreur de prédiction des valeurs que nous estimons. Pour cela, nous utilisons le pourcentage d'erreur absolue, défini par l'équation (7.1), entre les valeurs réelles d'estimations et les prédictions de notre modèle.

$$\text{APE} = \frac{|\hat{y} - y|}{y} \cdot 100 \tag{7.1}$$

Rapport-Gratuit.com

Tableau 7.1 Résultats de la règle de décision pour le choix de la machine

Paramètre	**Pièce #11**				
	Valeur	Origine	IC [%]	Valeur réelle	Observations
Choix machine	MAG3	Règle de décision	100	MAG3	Aucune
Pièce #18					
Choix machine	MAG3	Règle de décision	100	MAG3	Aucune

Tableau 7.2 Résultats pour le calcul du coût de la matière

Paramètre	**Pièce #11**				
	Valeur	Origine	IC [%]	Valeur réelle	Erreur [%]
h_{brut} [in]	1,50	Extraite	100,0		
ρ [lb/in^3]	0,102	Extraite	100,0		
$Prix_{mat}$ [$/lb]	4,0	Consultée	95,0		
$L_{brut,reg}$ [in]	50,49	Similaire	98,4		
L_{brut} [in]	50,5	Décomposée	98,4	50,25	0,5
$l_{brut,reg}$ [in]	13,97	Similaire	98,4		
l_{brut} [in]	14,0	Décomposée	98,4	14,25	1,8
W [lb]	108,2	Décomposée	96,8	109,6	1,3
C_{mat} [$]	427	Décomposée	91,9	432	1,3
Pièce #18					
h_{brut} [in]	4,25	Extraite	100,0		
ρ [lb/in^3]	0,102	Extraite	100,0		
$Prix_{mat}$ [$/lb]	3,8	Consultée	95,0		
$L_{brut,reg}$ [in]	75,35	Similaire	97,3		
L_{brut} [in]	75,5	Décomposée	97,3	75,00	0,7
$l_{brut,reg}$ [in]	50,35	Similaire	97,3		
l_{brut} [in]	50,5	Décomposée	97,3	52,50	3,8
W [lb]	1652,8	Décomposée	94,6	1706,9	3,2
C_{mat} [$]	6280	Décomposée	89,9	6486	3,2

Tableau 7.3 Résultats pour le calcul du coût d'usinage

Paramètre	Pièce #11				
	Valeur	Origine	IC [%]	Valeur réelle	Erreur [%]
$V_{effectif}$ [in^3]	562,5	Décomposée	95,0		
V_{final} [in^3]	39,3	Extraite	100,0		
V_{remove} [in^3]	523,2	Décomposée	95,3		
I_m [%]	110	Extraite	100,0		
$\hat{C}_1$	4,92	Décomposée	95,3		
$\hat{C}_2$	4,99	Extraite	100,0		
$\hat{C}_3$	5,15	Extraite	100,0		
C_4	2,55	Décomposée	95,3		
TH_{usi} [$/min]	125,0	Consultée	95,0		
T_{usi} [min]	94,1	Similaire	94,6	92,4	1,9
C_{usi} [$]	196	Décomposée	89,9	193	1,9
Pièce #18					
$V_{effectif}$ [in^3]	5688,8	Décomposée	95,0		
V_{final} [in^3]	225,2	Extraite	100,0		
V_{remove} [in^3]	5463,6	Décomposée	95,2		
I_m [%]	120	Extraite	100,0		
$\hat{C}_1$	4,73	Décomposée	95,2		
$\hat{C}_2$	4,61	Extraite	100,0		
C_4	4,67	Décomposée	95,2		
TH_{usi} [$/min]	125,0	Consultée	95,0		
T_{usi} [min]	317,8	Similaire	92,9	335,0	5,1
C_{usi} [$]	662	Décomposée	88,3	698	5,1

Tableau 7.4 Résultats pour le calcul du coût d'ébavurage

Paramètre	Pièce #11				
	Valeur	Origine	IC [%]	Valeur réelle	Erreur [%]
L_{Totale} [in]	78740,2	Extraite	100,0		
TH_{eba} [$/min]	50,0	Consultée	95,0		
T_{eba} [min]	34,1	Similaire	95,7	34,0	0,3
C_{eba} [$]	28,4	Décomposée	90,9	28,3	0,3
Pièce #18					
L_{Totale} [in]	3826,9	Extraite	100,0		
TH_{eba} [$/min]	50,0	Consultée	95,0		
T_{eba} [min]	25,0	Similaire	93,5	22,0	13,6
C_{eba} [$]	20,8	Décomposée	88,8	18,3	13,6

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

7.2 Estimation hors-contexte

Malgré les résultats très satisfaisants apportés par la première partie de ce chapitre, il est normal de vouloir le confronter à de nouvelles pièces. En effet toutes nos données proviennent du domaine aéronautique et plus précisément du fraisage de grandes plaques en aluminium. Il est donc fortement possible que l'adaptation du modèle soit teintée par cet aspect des données. On pourrait alors se questionner sur son comportement et son utilisation pour un produit venant d'un autre secteur industriel.

Tout d'abord il est évident que l'exemple d'adaptation se comportera différemment et potentiellement moins bien sur une pièce extérieure. Les corrélations ne seront plus forcément les mêmes pour cette nouvelle catégorie de pièces par exemple. Cependant, comme mentionné précédemment, le développement du CHAPITRE 6 représente simplement un exemple d'adaptation. Notre modèle a la force et l'avantage de pouvoir être personnalisable en fonction des besoins de chaque entreprise. De plus, l'utilisation de la similarité le rend efficace à condition qu'un historique de bonne qualité existe au sein de la compagnie. Si nous testons une nouvelle pièce en nous basant sur les 28 sélectionnées, il est certain que l'analyse de similarité retournera des résultats trop lointains pour être utilisables. Cela se traduira par des index de similarité très bas et, par conséquent, un faible indice de confiance sur les coûts estimés. Il y a aussi une augmentation du risque d'avoir de grandes erreurs de prédiction avec les régressions linéaires.

Si un tel cas se produit en industrie et qu'une pièce sans historique ou similaire doit être chiffrée, notre modèle fonctionnerait en mode séquentiel. Les règles de priorités l'obligeront alors à demander l'avis de l'expert pour pouvoir mener à bien la cotation. Notre modèle se repose en majeure partie sur le contexte, que ce soit les pièces et les cotations passées ou encore l'entreprise considérée. Il serait donc impertinent de le faire fonctionner sans aucune base sur laquelle s'appuyer.

7.3 Discussions des résultats

Il est tout d'abord possible de voir que le choix de la machine se fait sans aucun problème dans nos deux cas étudiés. En effet, chaque machine industrielle est généralement dédiée à des types de pièces bien précis et il est rare que ces habitudes soient changées. Cela se produit de manière exceptionnelle suite à une panne ou une surcharge de production d'une machine par exemple.

Avant toute chose je tiens à préciser que notre mesure d'erreur ne sert qu'à titre indicatif afin d'évaluer globalement le comportement de notre modèle par rapport aux estimations faites par les experts. Les données d'estimation sur lesquelles nous nous basons sont elles-mêmes entachées d'erreurs et de variations souvent plus grandes que 3%. En effet les chiffrages ne représentent pas le coûts exact des pièces mais seulement leur estimations faite en amont. Il est donc tout à fait normal que ces estimations fluctuent et qu'elles comportent des irrégularités. Notre mesure d'erreur n'est qu'un outil cherchant à montrer, si oui ou non, nous nous rapprochons du coût qu'aurait fourni l'estimateur. Ainsi, même si nous ne sommes pas en mesure d'évaluer notre erreur par rapport au coût réel, nous pouvons évaluer le rapprochement de notre méthode avec le coût estimé. Cela permet de voir si notre modèle est exploitable, si la similarité est effectivement une bonne alternative aux connaissances tacites et donc, si à terme notre proposition peut aider efficacement l'estimateur dans son travail.

Ainsi comme vous pouvez le constater, l'ensemble de nos résultats est très prometteur. Notre approche parvient à estimer le coût matière de manière très fidèle et avec un bon degré de confiance (environ 90%). Les erreurs pour la pièce #11 et la pièce #18 sont respectivement de 1,3% et 3,2%, ce qui est minime. Dans le second cas, cet écart vient essentiellement d'une sous-estimation de deux pouces par notre modèle concernant la largeur du brut. De la même façon, les résultats pour les coûts d'usinage sont très proches des valeurs réelles avec une erreur maximum de 5% pour le produit #18. Le temps d'ébavurage, quant à lui, suit exactement la même tendance que lors de nos analyses précédentes. Ainsi, l'estimation du coût C_{eba} du produit #11 ne présente presque aucune erreur alors que pour la pièce #18 celle-ci est d'environ

14%. Cette anomalie a été expliqué dans la section précédente et est essentiellement due à une des pièces sélectionnées par similarité, le produit #25. En effet, ce dernier provoque une forte diminution du coefficient de détermination R^2_{ajus} de la régression linéaire liée au temps d'ébavurage. Cela a donc pour conséquence de fausser la valeur prédite en utilisant cette droite de régression, ce qui explique la proportion de cette erreur.

La Figure 7.1 illustre ce propos et montre que plus le coefficient de détermination ajusté est bas, plus l'erreur commise pour chacun des coûts est élevée. En effet, ce coefficient est directement lié à la qualité de la prédiction.

De manière générale on remarque que les résultats de la pièce #11 sont légèrement meilleurs que ceux de la pièce #18. On peut donc conclure que la sélection appropriée des pièces similaires constitue une étape primordiale dans le bon fonctionnement et déroulement de notre approche. Plus les pièces sont proches, plus il sera aisé pour nous d'en estimer les coûts correctement et plus notre indice de confiance sera élevé.

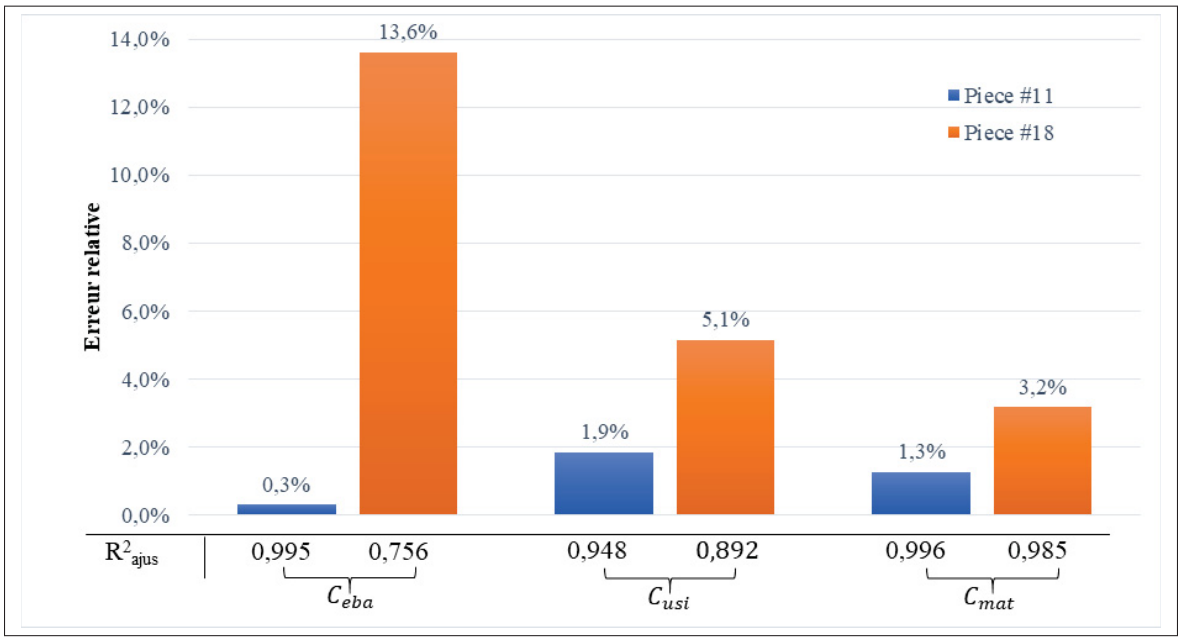

Figure 7.1 Pourcentage d'erreur en fonction coût

Normalement ces indices de confiance devraient être un reflet de l'erreur potentielle sauf que cela ne coïncide pas avec nos observations. En effet, nos deux erreurs de 1,8% et 5,2% sur le coût d'usinage correspondent à des indice de confiance quasi-identiques, respectivement 90% et 88,3%. Cette remarque est encore plus visible pour le coût d'ébavurage. Dans ce cas, la valeur qui présente une erreur de 13,6% est associée à un indice de confiance de 88,8% alors que celle présentant une erreur de 0,31% possède un indice de confiance de 90%. Ce constat nous porte à dire que notre indice de confiance ne se comporte pas de la façon attendue et qu'il mériterait une révision. Ce dernier se base essentiellement sur les indices de confiance des deux paramètres d'entrée et sur leur coefficient de corrélation. Nous supposons qu'il serait judicieux de remplacer ce coefficient par celui de détermination de la régression linéaire, car il est directement lié aux erreurs et aux variations des prédictions. Pour cette raison, des pistes de recherches supplémentaires sont décrites dans la section « Conclusion et recommandations » afin de pouvoir améliorer cet indice.

La validation empirique du modèle dont les résultats finaux sont présentés dans le Tableau 7.5 a permis de démontrer la validité de notre approche. Nos estimations concordent très fortement avec les valeurs réelles de coût et l'erreur de prédiction reste assez faible et ne dépasse pas 4% du coût total pour nos deux études de cas.

Tableau 7.5 Résultats pour le calcul du coût total

Paramètre	**Pièce #11**				
	Valeur	Origine	IC [%]	Valeur réelle	Erreur [%]
C_{piece} [$]	652	Décomposée	91,3	654	0,3
Pièce #18					
C_{piece} [$]	6963	Décomposée	89,7	7202	3,3

Finalement, malgré les quelques écarts, nous pouvons dire que notre modèle permet de correctement prédire les différents coûts d'une pièce usinée en se basant sur la similarité. L'utilisation de notre approche permet entre autres de proposer des estimations qui seront fidèles avec les

manières de faire des estimateurs et des entreprises. Elle permet aussi d'assurer la répétabilité des coûts et une bonne fidélité. Cela aura tendance à conduire l'estimateur vers une standardisation de ces cotations ce qui ne peut être que bénéfique.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La problématique principale de ce travail de recherche reflétait directement la volonté des entreprises de toujours améliorer leurs processus internes afin de réduire les coûts et les risques d'erreurs. Une meilleure compréhension et une meilleure estimation des coûts des produits usinés suivaient parfaitement cette intention. L'objectif de ce mémoire était donc de proposer une aide au chiffrage pour les pièces usinées dans le domaine aéronautique qui devait se baser sur la similarité. Grâce à cette aide, il sera possible pour les industriels d'estimer plus rapidement les coûts des produits en y associant un niveau de confiance approprié. Cela permettra de conforter l'expert dans son travail et d'éviter certaines erreurs lors des cotations. Afin d'atteindre ce but, six objectifs spécifiques ont été formulés.

Nous avons, dans un premier temps, chercher à mieux comprendre l'ensemble du processus d'estimation chez les différents partenaires industriels. Suite à quelques visites et discussions avec les experts, nous avons pu constater que pour les entreprises d'un même secteur d'activité, la gestion des estimations se déroulaient de façon quasi-identique, et ce, quel que soit la taille de l'entreprise. Nous avons donc pu identifier deux procédés généraux, un pour les fabricants et un pour les donneurs d'ordres.

Le second objectif consistait à identifier quels paramètres étaient employés pour calculer le coût des pièces et comment ceux-ci influençaient les décisions des estimateurs. Cet objectif cherchait également à évaluer à partir de quel moment et comment les entreprises se différenciaient dans leur processus de chiffrage. Afin de comprendre les spécificités de chacune d'entre elles, nous avons assisté les estimateurs dans leur travail pour un grand nombre de cotations différentes. Ces observations ont permis de conclure que toutes les entreprises se basent sur la même liste de paramètres entrants pour effectuer une estimation. Pour n'en citer que quelques uns, on retrouve la géométrie, l'alliage, le fini de surface ou encore les annotations et la taille

du lot. Les variations concernent l'importance accordée à chacun de ces paramètres, les coûts sortants calculés et bien évidemment les relations appliquées pour y parvenir.

Il serait d'ailleurs intéressant d'observer si les mêmes tendances se retrouvent dans un autre secteur industriel que celui de l'usinage CNC des métaux. En effet, puisque notre étude se limite à ce que nous avons pu voir chez les différents partenaires industriels, il est possible que les paramètres changent pour d'autres domaines d'activité. Est-ce que plus on s'éloigne du secteur aéronautique, plus les variations des modèles d'estimation sont importantes ? Ce point de départ pourrait faire l'objet d'un travail de recherche visant à évaluer la corrélation entre l'activité industrielle et les procédés d'estimation.

De plus, ces analyses nous ont permis de mieux comprendre les choix effectués et de traduire certaines de ces connaissances en règles de décision. En effet, nous avons clairement identifié au début du projet qu'une grande partie des connaissances utilisées par les experts relevait du domaine tacite et qu'il faudrait parvenir à les évaluer. Cela correspondait à notre troisième objectif spécifique. Pour le mener à bien, un exercice d'estimation a été conduit chez les partenaires. Aux termes de celui-ci, nous avons pu constater l'influence indéniable de l'expérience et du contexte sur les estimations. Cette analyse a souligné les écarts d'importance, de décision et de comportements variant avec l'environnement et les connaissances de chacun des experts. Cette étape était cruciale afin de mieux comprendre quand et comment notre outil pouvait les assister pour proposer un modèle qui puisse s'adapter à leur besoins.

Notre exercice portait seulement sur 12 produits fournis par les industriels. Une première piste de recherche potentielle pourrait se concentrer sur le comportement des experts face à un plus grand nombre de pièces sortant de leur cadre de connaissances. De plus, nous avons pu observer que dans une certaine mesure, le manque d'expertise pouvait être comblé par le temps passé à effectuer l'estimation. En effet, ce temps supplémentaire permet à l'expert de mieux réfléchir au problème, de se renseigner au besoin et de demander l'avis de ses collègues. Il serait

donc pertinent de voir à quel point ces différents aspects permettent de compenser certaines faiblesses et comment ils influencent l'estimation.

Nous avons ensuite été en mesure de proposer un modèle généralisé d'estimation que nous avons par la suite tenté d'adapter pour l'une des entreprises. La base du modèle se voulait totalement personnalisable. Notre modèle peut donc être employé dans n'importe quel cadre d'estimation et conduire à une grande variété d'implémentations différentes. Les aspects novateurs reposent sur l'utilisation de la similarité géométrique, les origines,les obtentions multiples d'un même paramètre et l'emploi d'un indice de confiance pour chacun d'entre eux.

Notre adaptation s'est concentrée sur le chiffrage du coût de la matière brute, du coût d'usinage et du coût d'ébavurage des pièces. Bien que ceux-ci soient des phénomènes complexes, nous avons démontré que l'utilisation de certains paramètres précis permettent d'estimer ces coûts. Nous avons donc relié les dimensions du brut à celles de la boîte englobante, le temps d'ébavurage à la longueur totale des arêtes et le temps d'usinage à une combinaison du volume et de la surface à usiner et du score d'annotation.

Lors de nos analyses, nous avons pu prouver d'une part que ces corrélations se vérifiaient sur notre échantillon de 28 pièces (Coefficients de Pearson > 0,9) et, d'autre part, que l'utilisation de la similarité permettait de renforcer encore plus ces relations. Notre cinquième objectif venait d'être atteint. La similarité géométrique améliore les prédictions de nos estimations et permet de minimiser les erreurs commises. Ainsi, lors de la validation empirique de notre modèle, correspondant à notre dernier objectif, nous avons observé que celui-ci est capable de prédire les coûts considérés avec une erreur ne dépassant pas les 5% de la valeur réelle.

Cependant, par manque de données et de temps, nous n'avons pas été en mesure d'implémenter la totalité des coûts pris en compte par les industriels ni de tester notre modèle avec une plus large banque de pièces. Cela ouvre les portes vers de nombreux axes de recherche et vers le

Rapport-Gratuit.com

travail qu'il reste à effectuer dans le but de mener à bien le projet Lean-702. D'abord, nous devons compléter avec les industriels l'analyse de leurs paramètres d'estimation ainsi que les différentes possibilités pour intégrer au mieux notre futur outil. Nous devons, bien évidemment, adapter notre modèle pour les attentes et les exigences de chacun d'entre eux. Finalement, nous devons clore le projet par le développement d'un outil informatique qu'ils pourront utiliser.

Tel que mentionné précédemment, l'utilisation de la similarité a été appliqué sur les 28 pièces fournies par une des entreprises. Il serait intéressant de voir comment notre modèle se comporte lorsque nous essayons de lui soumettre d'autres familles de pièces aéronautiques comme des trains d'atterrissages par exemple. Ces tests permettraient certainement de faire ressortir certaines lacunes de notre adaptation qui ne sont pas apparues dans notre étude initiale. Dans la continuité de cette idée et pour évaluer les possibilités d'améliorations de notre modèle, il est nécessaire de le transposer dans une industrie complètement différente de celle de l'usinage aéronautique, comme l'industrie automobile par exemple.

Ensuite, lors de la combinaison des composants pour le calcul du temps d'usinage en section 6.6.2, nous avons mis en avant la ressemblance, l'estimation du temps d'usinage et l'estimation de la complexité d'une pièce usinée décrite par Proteau (2016). En effet, tout nous porte à croire qu'un rapprochement entre la complexité d'une pièce et son coût d'usinage peut être fait. Il serait pertinent d'étudier la question plus en détail.

Toujours au sujet de l'usinage, nous avons défini le volume effectif comme étant un composant majeur pour l'estimation de ce temps. Dans notre étude de cas, ce volume se base sur l'aire projetée de la pièce mise à l'échelle avec un coefficient λ pour tenir compte du passage de l'outil de coupe. Néanmoins, il se peut que cela ne s'applique pas pour tous les types de pièces. On peut donc se poser plusieurs questions. Peut-on trouver une relation paramétrique entre l'aire projetée et le volume effectif, qui nous permettrait de remplacer notre coefficient multiplicateur ? Comment calculer ce volume de façon exacte à partir du modèle 3D enrichi

et de la géométrie de la pièce ? Il serait nécessaire et intéressant d'approfondir cette notion de volume effectif afin de la généraliser à n'importe quelle pièce usinée. Cela permettrait ensuite de mieux prédire le temps d'usinage.

Une autre piste potentielle de recherche concerne l'utilisation de la similarité géométrique couplée au concept de contexte géométrique. Dans notre cas, la similarité est employée de manière globale dans le but de trouver des pièces de même géométrie. Il serait intéressant d'inclure une nouvelle profondeur dans cette recherche qui se baserait sur l'interprétation des éléments topologiques dans leur contexte spatial. Cette notion a été aperçue lors de l'étude en industrie, mais s'avère très complexe à expliciter. Comment identifier qu'un certain contexte géométrique augmente le coût d'usinage d'une opération précise ? Par exemple, l'inclinaison d'une paroi qui pourrait rendre celle-ci difficile d'accès pour l'usinage, augmentant le temps correspondant à sa réalisation. Cela permettrait de pouvoir associer les temps indépendamment du contexte géométrique de certains éléments. À terme, on pourrait utiliser la similarité afin d'identifier les éléments géométriques qui diffèrent entre deux pièces et associer un coût ou un temps à chacune de ces variations.

La dernière recommandation concerne l'indice de confiance qui a été mis en place dans notre modèle. Nos analyses ont prouve qu'il n'était pas vraiment représentatif de l'erreur potentielle sur l'estimation. Nous suggérons d'utiliser le coefficient de détermination plutôt que celui de corrélation pour le calcul de cette confiance. Dans le cas du temps d'ébavurage de la pièce #18, le coefficient de Pearson utilisé pour calculer l'indice de confiance est de 90,9%, alors que le coefficient de détermination de la régression est seulement de 74,6%. Cette observation démontre bien que l'emploi du coefficient R^2_{ajus} serait plus adapté pour le calcul de la confiance et permettrait de mieux coïncider avec l'erreur commise. Ceci constitue un début de piste qui mériterait d'être explorée.

Pour récapituler, voici nos contributions scientifiques :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1. Nous avons étudier l'importance de l'environnement et des connaissances tacites sur les prises de décisions et les paramètres dans les cotations de pièces ;
2. Nous avons développé un modèle généralisé innovant pour l'estimation ;
3. Nous avons démontré la pertinence et la precision de notre modèle dans le cas de l'estimation des pièces usinées ;
4. Nous avons évaluer l'influence et l'intérêt de la similarité géométrique pour l'estimation des coûts ;
5. Pour finir, nous avons présente un article pour la conférence PLM 2017 (*IFIP* 14th *International Conference on Product Lifecycle Management*). Il a été accepté pour publication (Voir ANNEXE I).

Finalement, à travers ce travail de recherche, nous avons mis en place les fondations d'une nouvelle méthodologie d'estimation se basant sur les similarités. Nous avons démontré à quel point l'utilisation de la similarité géométrique peut être puissante et efficace comme alternative à l'obtention de certains paramètres considérés comme trop complexes. Ce mémoire est également la preuve qu'une grande partie du savoir-faire et des connaissances d'une entreprise de fabrication se retrouve au final emprisonnée dans la géométrie des produits. Les entreprises ont alors tout intérêt à mettre à profit ces mines d'or d'informations pour s'améliorer et se développer.

ANNEXE I

ARTICLE DE CONFÉRENCE PLM 2017

COST ESTIMATION AIDED SOFTWARE FOR MACHINED PARTS : AN HYBRID MODEL BASED ON PLM TOOLS AND DATA

Marc-Antoine Michaud[1], Roland Maranzana[2]

[1] Département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3
[2] Département de Génie Production Automatisée, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article présenté à la conférence PLM 2017 à Séville le 10 Juillet 2017.

Abstract

For each manufacturer, exact cost estimation is both a major priority and a challenge. This routine task is far from being optimized and depends on a very large number of parameters both strategic and technical. To help estimate a cost, applications have been developed but estimation is a task that would greatly benefit from the re-use of knowledge and data found in alphanumeric and geometric documents. Every manufacturing company has switched to numerical data with CAD, CAM, or ERP systems but one of the main drawbacks is the low usage of all these information that contain valuable knowledge and expertise. This paper describes the current state of cost estimation and proposes a new hybrid approach whose purpose is to maximize the re-use of information for machined parts. Our approach is based on a parameterized and customized cost model, an extractor of semantic descriptors in geometric documents (Model Based Definition files) and related textual documents and finally correlations to adjust the cost of machined parts.

Keywords : Knowledge reuse, PLM tools, Model Based Definition, case-based reasoning, semantic search, machining part, cost estimation

1. Introduction

As the competition is fiercer, companies have to stay competing while also being able to deliver and produce high quality products in a fair time. Having a reliable and precise cost estimation is crucial for this, it will limit the risks of overheads, allow a better production and budget management and help making better strategic decisions. As the use of CAD software has allowed enormous time savings for design (Molcho, Cristal & Shpitalni, 2014), cost estimation represents a task which would greatly profit from a computer application to produce faster and more accurate quoting for both the clients and the contractors. This task is often entrusted to one or two experts who will rely on both tacit knowledge acquired from experience and explicit parameters or standard guidelines. Software applications such as Apriori or Techniquote are sometimes used but they present limitations, their database has to be up to date, they need to be adapted to the different processes of the company and they often require a lot of time to estimate. However, companies struggle to obtain repeatable price for the same type of machined parts through time because it is the combination of knowledges being both tacit and explicit regrouping the capacity of the company, the type of part and their features as well as the human and financial aspects. The main objective of this paper is to propose a methodology for the cost estimation which can adapt to the resources and capacity of the company. Tacit knowledge remains a master piece in the machined part cost estimation process that we need to understand and integrate. Therefore, we suggest an innovative approach based on similarity based-knowledge in order to develop models of customized costs which rely on the massive re-use of former data related to similar parts as an alternative to this tacit knowledge. The rest of the paper is organized as follows : Section 2 focus on the literature review in cost estimation, model based definition and part similarity assessment. The Section 3 will present the observations that have been made in the industry as well as our hypothesis for the model. In Section 4, we describe our proposed methodology, present our contribution and illustrate the model with a simple example. In Section 5 we will discuss some perspectives of work and conclude the paper.

2. Literature Review

Cost estimation has been an alive nerve of industry for almost a century because it is a primordial stage in a product life cycle (Feng, Kusiak & Huang, 1996). Thus, one can find a broad panoply of methods and techniques, each one depending on available information, type of parts, materials or industrialization stage for example (Liu & Qiao, 2012). As described by Niazi, Dai, Balabani & Seneviratne (2006) and Ben-Arieh (2010), all of these methods can be divided into two groups, the quantitative and the qualitative ones. Each of them is then separated in two classes, and inside those subdivisions other categories can be made. This is also described by Shehab & Abdalla (2001). However, every method has its advantages, its field of predilection, its limits and is better suited for a specific time in the product life cycle, as illustrated by Liu & Qiao (2012).

2.1 Quantitative approaches

2.1.1 Parametric techniques

These cost estimation techniques were widely used because they often produce accurate estimation, and are easy to implement, but cost drivers needed to be correctly identified, limiting each method to one type of parts and making it prone to errors when parts were changing too much. Even if Ficko, Drstvenšek, Brezočnik, Balič & Vaupotic (2005) show that these techniques have been improved, some limitations are still present and are innate to the parametric approach.

2.1.2 Analytical techniques

They regroup models based on cost-tolerance, activities, features or operations. Cost-tolerance models are almost all based on the quality-loss function proposed by Taguchi (1986) and curve fitting techniques (Sutherland & Roth, 1975). Machining or form features based models such as presented by Feng *and al.* (1996) or Xu, Fang & Gu (2006) tends not to take into account all the

processes and does not consider the impact of tolerances for example. Moreover, the enormous data requirements for these techniques restrict their use for the final phases of industrialization process.

2.2 Qualitative approaches

2.2.1 Analogical techniques

These methods rely more on regression analysis or neural networks in order to find relationships between cost and a selected set of variables. They are good to deal with non-linear problems and to adapt but they are data-dependent and more difficult to develop or implement.

2.2.2 Intuitive techniques

On the other hand, intuitive techniques, such as rule-based or knowledge-based system are often quicker and handles very well uncertainty. However, they are also hard to keep updated, limited to a sort of design and the implementation often requires too much effort as well. Case based reasoning address some of these issues and is one of the most used techniques nowadays (Molcho, Cristal & Shpitalni, 2014). The main drawbacks of all the CBR techniques are the necessity to abstract features or parameters in order to compare parts, resulting in techniques that are applicable to one type of design and the need for past designs.

2.3 New trends in estimation and knowledge management

As you can see a large number of models have been developed for various kinds of applications, each one having its advantages and the limitations as shown by Niazi *and al.*, 2006. But the existing models often rely too much on mathematical models and are not prone to be customized to the needs of a given company. Recent research papers show a new trend to get quicker and more precise results by combining several approaches as shown by Layer, Brinke, Houten, Kals & Haasis (2002) and used by Chougule & Ravi, 2006 for example. Theses new methods provide more promising results and are also increasingly based on the new capabilities of data

treatments, semantic researches or machine learning for instance (Roy, Kelvesjo, Forsberg & Rush, 2001 or Ma, Sajadfar & Campos Triana, 2014). In deed, the last decade has shown some interesting projections for the treatment of great volumes of non-structured data. Digital systems like, Computer-Aided Design (CAD), or ERP (Enterprise Resources Planning) have become widely used (Alemanni, Destefanis & Vezzetti, 2010). But the interoperability between these applications is almost none existent, information is dispersed in innumerable files resulting in duplicates and inconsistency. The problem is even acuter on the level of mechanical engineering where a significant portion of information is locked up in the 3D geometry. The MBD including the 3D model as well as the PMI makes it possible to have a complete representation of the part in a single file. Moreover, these crucial data are complex to retrieve from the design drawings and the extraction would be easier from a MDB. According to Quintana, Rivest, Pellerin, Venne & Kheddouci (2010) and Venne (2009), companies in aeronautics, automobiles or software preach this practice aiming to decrease design times and gather numerically all information at the same place. This proliferation of digital information created the need for search engines and there exist nearly fifty company search engines made by Oracle, SAP, Dassault for example. However, they are limited to the indexing of alphanumeric items. Several approaches for indexing 3D models were proposed in scientific articles (Brière-Côté & Rivest, 2013), but few applications crossed the stage of the university research. Yet some software like 3DPartFinder are able to index parts directly by the boundaries representation (Msaaf, Maranzana & Rivest, 2007 and Brière-Côté & Rivest, 2010), characterized by a higher degree of accuracy, an index much more concise and improved performances. As pointed out by Quintana *and al.* (2010) and Xu *and al.* (2006), similarity and reuse of knowledge are an underexploited domain, over 70% of the customized product can be made out from the existing product design resources for example, which comfort the interest to invoke similarity.

3. Industrial observations and hypotheses

3.1 Observations

In order to verify and put to the test what the literature taught us, several meetings and discussions were conducted with the different companies involved in the project. Therefore, after multiple visits and cost estimations, we could make several reports, some of them matching what was seen in the research studies and some not :

- there exist at least two methods and the choice of the methods depends essentially on the available time, the overall complexity or the added-value of the part ;
- the model is always affected by strategic factors and selling cost is not the same as pricing cost ;
- it always remains a significant proportion of tacit knowledge inversely proportional to the allocated time ;
- historical data and reuse of knowledge are underused ;
- they only have few options to reduce specific costs.

We also made some observations concerning the models. As shown in the equation A I-1, the majority divide the cost into 3 or 4 distinct categories : material cost, machining cost, post-processing cost and various cost like margins, tools, hardware, assembly. This is an approach Feng *and al.* (1996) and Ozcan & Fığlalı (2014) brought up in their studies. The practices are also often based on the same approaches but with some variations :

- they use a volumetric approach to raw material cost and machining time ;
- they submit tenders in order to know the exact price ;
- they estimate the machining time according to the operations and the machines used ;
- they sort of the parts and using historical data when possible.

$$C_{part} = C_{material} + C_{machining} + C_{post-process} + C_{others} \quad \text{(A I-1)}$$

From what we observe there are some gaps between research models and the industry how-to and thus the need to come up with a different approach. The companies seek to maximize their productivity, estimating as fast as possible in order to process a maximum of requests for quote. Moreover, even if the time granted to quote a part should depend on its added-value, companies often allows the minimum necessary to estimate. Therefore, an adequate model should be presented being both simple enough, quick and putting the emphasis on the reuse of valid knowledge and the reliability of the cost. The objective would be to reduce the potential error and make it possible to better understand from which parameters the estimation comes while offering a variable level of detail depending on what the user is looking for. The Figure-A I-1 tend to show the contribution of our final model.

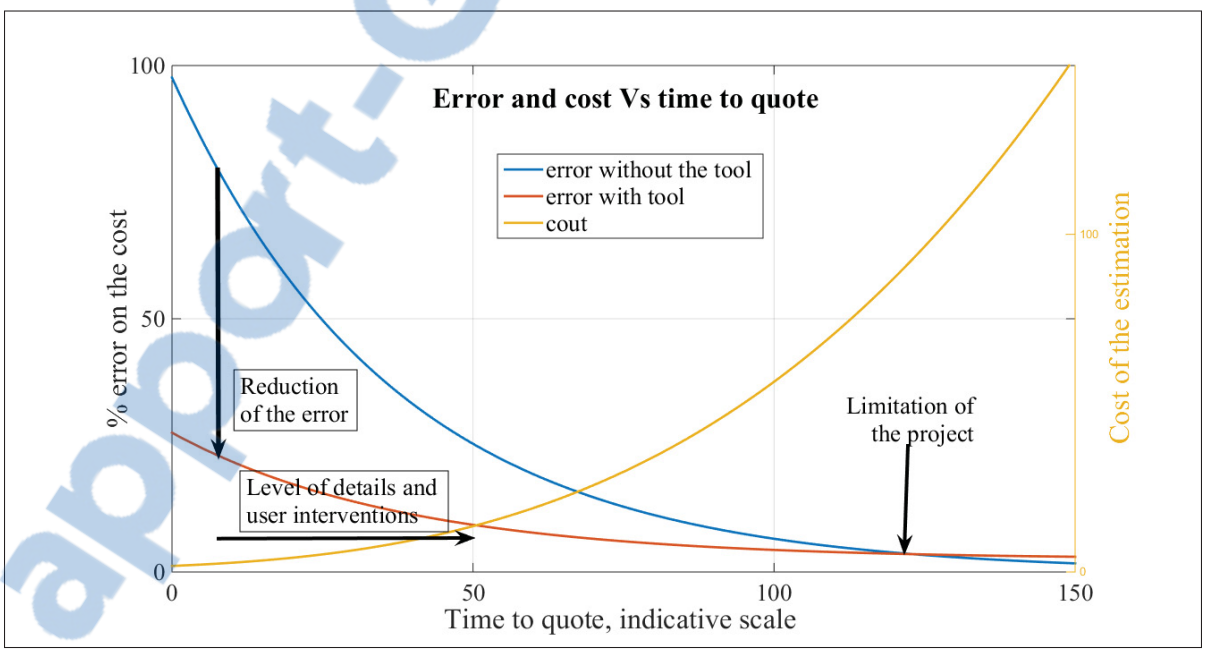

Figure-A I-1 Contribution of the project

Rapport-Gratuit.com

3.2 Hypothesis

Based on our observations and the state of the art we can draw some hypothesis for our current work listed below :

1. Cost depends on several parameters with different levels of influence ;
2. Geometric similarity implies other correlations such as similar machining, material, or processes. Parts with similar information tend to converge towards the same cost value ;
3. The more similar part we have, the higher degree of confidence we get on an estimation.

4. Proposed methodology

4.1 Overview

The complete methodology has been designed to answer the research questions. It composed 4 groups and 6 steps (see Figure-A I-2). The first one aim to understand the environment of the company, to identify the key parameters, the way of proceeding, and to quantify the tacit knowledge. The second one is the design of a generalized model which will be detailed in the present section. The third one consists in merging all the information obtained during the first step with the model. Finally, the last group is for evaluating the final model and validating the benefit of the geometrical similarity.

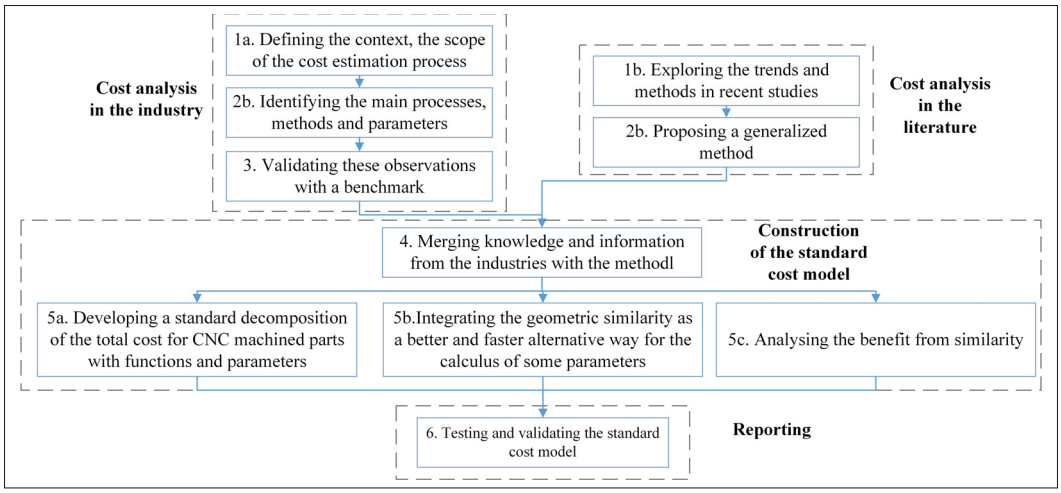

Figure-A I-2 Methodology Steps

4.2 The generalized model

4.2.1 Problem description

Based on our observations, companies estimate costs using comparable methods, some parameters are common between them, others are specific to the enterprise. We can then divide each problem into two entities :

1) an object P (in costing, it represents the part) ;

2) its environment E (illustrated by the company).

4.2.2 The parameters and functions

Each of these entities will also be defined by a number of parameters x_i and a set of functions (see equation (A I-2)).

$$\begin{cases} P &= (x_i) \text{ with } i \in 1,..,n \\ E &= (x_j) \text{ with } j \in n,..,m \end{cases} \tag{A I-2}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

We can then classify the parameters and the functions used to calculate the costs into two categories as illustrated in Table 1. Nevertheless, the functions can be anything from a sum, to linear regression and are either exact functions or approximation depending on the company. They are used to break-down a parameter into other ones, more detailed. The number of parameters will be determined by the necessary levels of decomposition to obtain an acceptable result and by the process of the enterprise specifying the prevalence of certain parameters. The more parameters there are, the more precise the refinement can be. We then have a tree with K_i—Layers of decomposition depending on the top parameter. In theory, each parameter can be refined until it is exact or coming from a database, but in practice it might not be possible or necessary. The decomposition stops when no function is found to break down the considered parameter or when it is not considered profitable. As an example, a length or a density cannot be further decomposed, whereas features machining time can but it might be too complicated to implement. The challenge is to find a suitable balance between the level of decomposition, its practicability and its benefit.

4.2.3 The Notion of source of the parameters

Decomposing a parameter is not the only way of obtaining a value for it. As a consequence, we have decided that the provenance of a parameter is almost as much important as its value and have distinguished five different possible sources : exact, database, tacit, similar or calculus :

- exact : parameter is taken from the MDB or databases that are not prone to change in time. A density or an area extracted from the 3D model are examples of exact source ;
- database : parameter is coming from a database, but the value can fluctuate over time like a price of material ;
- tacit : the value is entered by the user depending totally on his personal knowledge ;
- calculus : a parameter x_i can be broken down into x_j, x_v using a specific function ;
- similar : the value is predicted either by finding a relationship between two or more correlated parameters with a regression for example or by using a set of rules. Data used to

build the model are only taken from geometrically similar parts and a similarity index is defined between the new part and old ones allowing to keep the most similar and to weigh the influence of each part within the relationship.

4.2.4 The Reliability and Precision

Another major point is that an estimation has to be reliable and precise. To address this matter, we propose to attribute a reliability coefficient scaling from 0 to 1 to each parameter depending on its source and an absolute error. The reliability coefficient represents the confidence we have in the value, and the absolute error represents the potential error we made on the value. The reliability coefficient for the calculus or similarity provenances will vary depending on the RC of the parameters used and on their correlation. In case of a simple multiplication or fraction calculus, the reliability coefficient will behave as combined probability of two independent events. For similarity, we will use the Wang and Stanley composite reliability formula between two parameters as described by Widhiarso & Ravand (2014) in order to determine the composite RC that will be adjusted depending on the number of similar parts used, their seniority and the difference of batch size. The absolute error is taken from the computer tools or the measurement methods. For the calculi and the similarities, we will use partial differential method and weighted mean absolute error.

4.2.5 Geometric similarity and priority

The model allows to emphasize some sources depending on the reliability coefficient or where the data is available. The source with the highest reliability is prioritized if possible, even if the user has always the decisive verdict and can overwrite any value using his knowledge. The model allows us to get values from different origins for the same parameter. The Figure-A I-3 shows an example of decision tree about these choices that can change from parameter to parameter. The other main contribution is the possibility to use the geometric similarity between parts as an alternative way to obtain parameters which are too complicated to decompose or depend too much on tacit knowledge (Boothroyd & Reynolds, 1989). By finding similar parts

we can then adapt any given parameter. This allows us to transcribe the tacit knowledge to be able to reuse it. The model rests on the assumption that geometrically similar parts will likely serve the same function, leading to similar characteristics, letting us determine analogically some variables and costs which are not calculable with a parametric technique. Furthermore, to refine the similarity search we can filter the parts by material for example, in order to have fewer chances of exceptions.

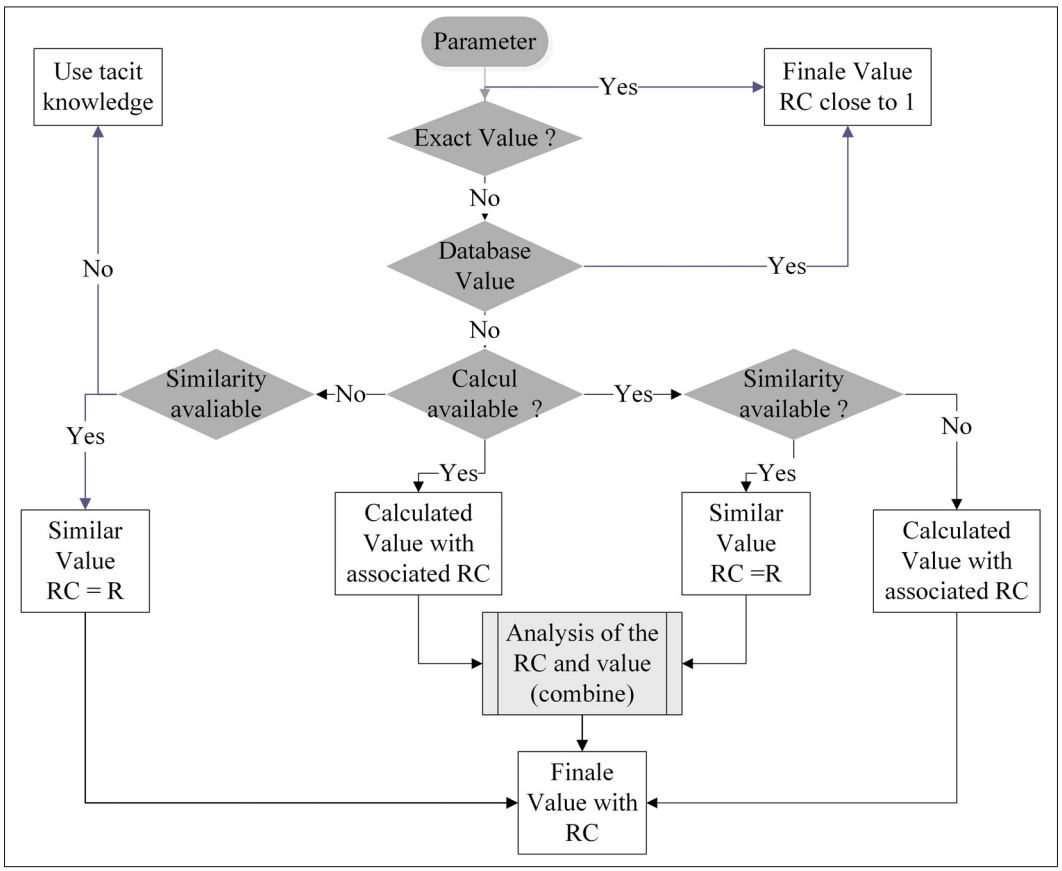

Figure-A I-3 Decision tree depending on the source

4.3 An example with the cost of the raw material

In order to illustrate the process of the generalized model, we decide to take a simple example to calculate the cost of the raw material for a CNC part. Let's say enterprise 1 machine aluminum part for motorcycle market. Here is the list of parameters for the part and the enterprise in equation (A I-3).

$$\begin{cases} P &= (C_{raw}, W, V_{raw}, V_{boundingbox}, \rho, material) \\ E &= (Price_{material}, K) \end{cases} \tag{A I-3}$$

The fictive enterprise has a database linking material, density and price as shown in Table-A I-1 below (densities are correct but prices are fictive).

Tableau-A I-1 Density and price database example

Material specification	Density [kg/m^3]	Price [$/kg]
Al 7050	2800	3.56
Al 7178	2830	4.35

Using our previously described method, a possible decomposition scheme is detailed in Figure-A I-4. We decide to use as much as possible exact data and use similarity to interpolate the raw volume. Indeed, we suppose that the raw volume depends on many other parameters like the volume of the bounding box, the type of machine, machining strategy like near net shape or picture frame. We then expect to find these relations encapsulated inside the past machined similar parts. As a comparison, the company has its own function to calculate the raw volume where K is a tacit factor going from 1,05 up to 1,15 (to add 5% to 15% of the volume) with a reliability factor of 0,7.

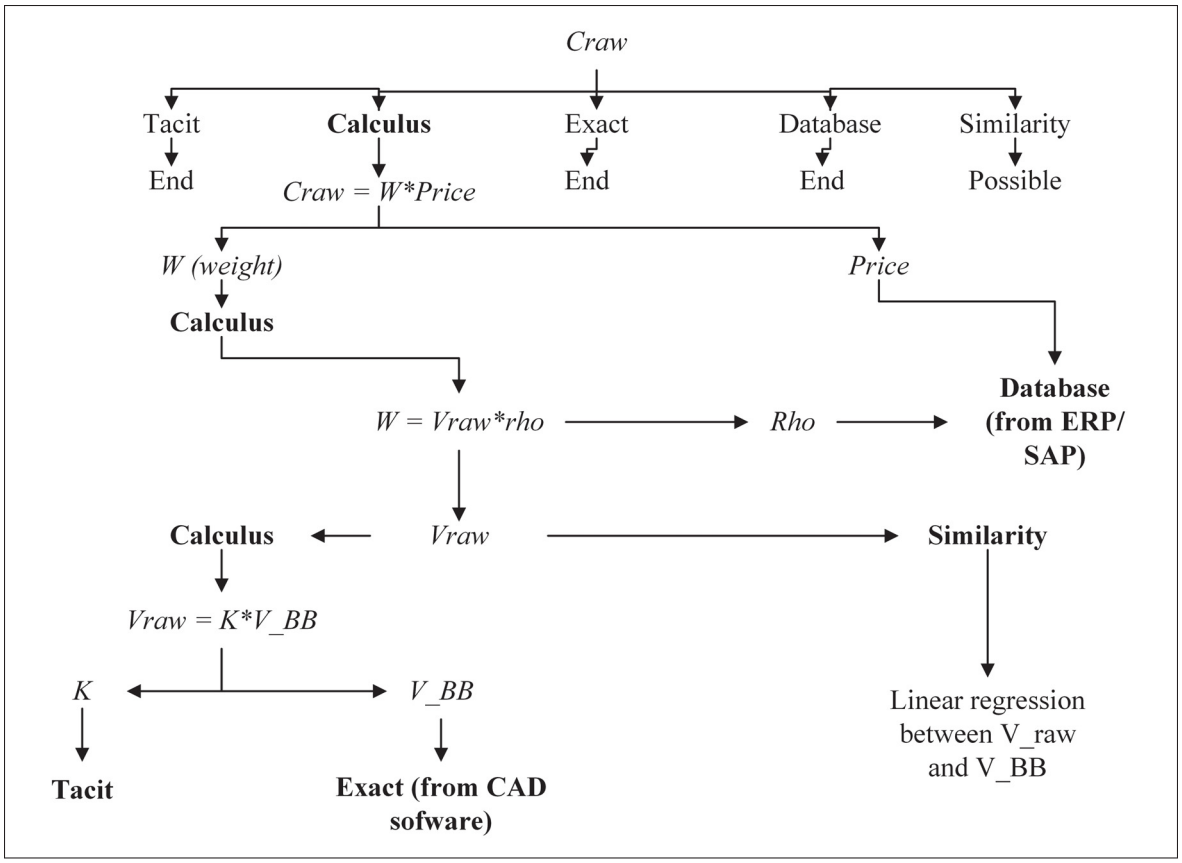

Figure-A I-4 Decomposition scheme for the example

We have to find the cost of the raw material of the part 4, represented as the blue part in the Figure-A I-5 that represents the similarity query. The Table-A I-2 shows the values of the different parameters as well as their origin and reliability coefficient. The RC of the different volume is assumed to be close to 1 as it is taken from the MBD itself. The volume of the raw is the real value measured by operators, thus we assume the RC to be 0,99 with a negligible absolute error depending on the measurement tools. The RC of the price is set to 0,95 as it is a parameter fluctuating in time, and we assume an absolute error of 0,1 if the database has not been updated recently.

We have used similarity and calculus to find the volume of the raw material for the new part 4, as well as its cost. Similarity is carried out using a weighted linear least squares regression analysis between the volume of the bounding box and the volume of the raw material. The

similarity index serves to weight the regression in order to minimize the error estimate. We have then compared both of the results with the real cost that we know in order to evaluate the potential of our methodology. The Figure-A I-6 display the outcome of the regression and Table-A I-3 show the resulting comparison.

Tableau-A I-2 Parameters of the similar parts and results of the similarity query

Part		**1**	**2**	**3**	**4**
C_{raw} [$]	Value Origin RC	30,323 Calcul 0,9405	24,621 Calcul 0,9405	22,511 Calcul 0,9405	**To be determined**
W [kg]	Value Origin RC	8,518 Calcul 0,99	5,660 Calcul 0,99	5,817 Calcul 0,99	
V_{raw} [m^3]	Value Origin RC	3,042E-03 Exact (real) 0,99	2,000E-03 Exact (real) 0,99	2,070E-03 Exact (real) 0,99	
$V_{Boundingbox}$ [m^3]	Value Origin RC	2,667E-03 Exact (MBD) 1	1,639E-03 Exact (MBD) 1	1,813E-03 Exact (MBD) 1	Exact (MBD) 1
Material	Value Origin RC	Al 7050 Exact (MBD) 1	Al 7178 Exact (MBD) 1	Al 7075 Exact (MBD) 1	Al 7050 Exact (MBD) 1
ρ [kg/m^3]	Value Origin RC	2800 Database 1	2830 Database 1	2810 Database 1	2800 Database 1
Price [$/kg]	Value Origin RC	$3,56 Database 0,95	$4,35 Database 0,95	$3,87 Database 0,95	$3,56 Database 0,95
Similarity index	Value	0,941	0,853	0,76	#REF

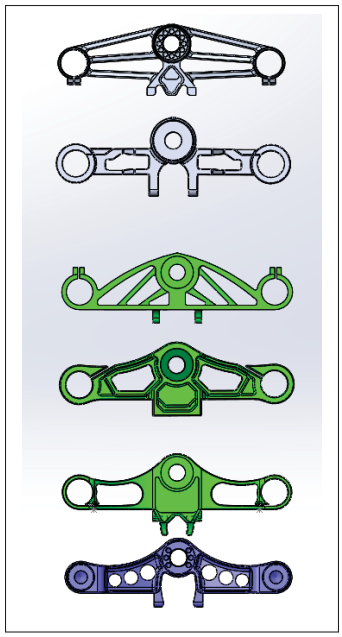

Figure-A I-5 Results of the similarity query (reference in blue)

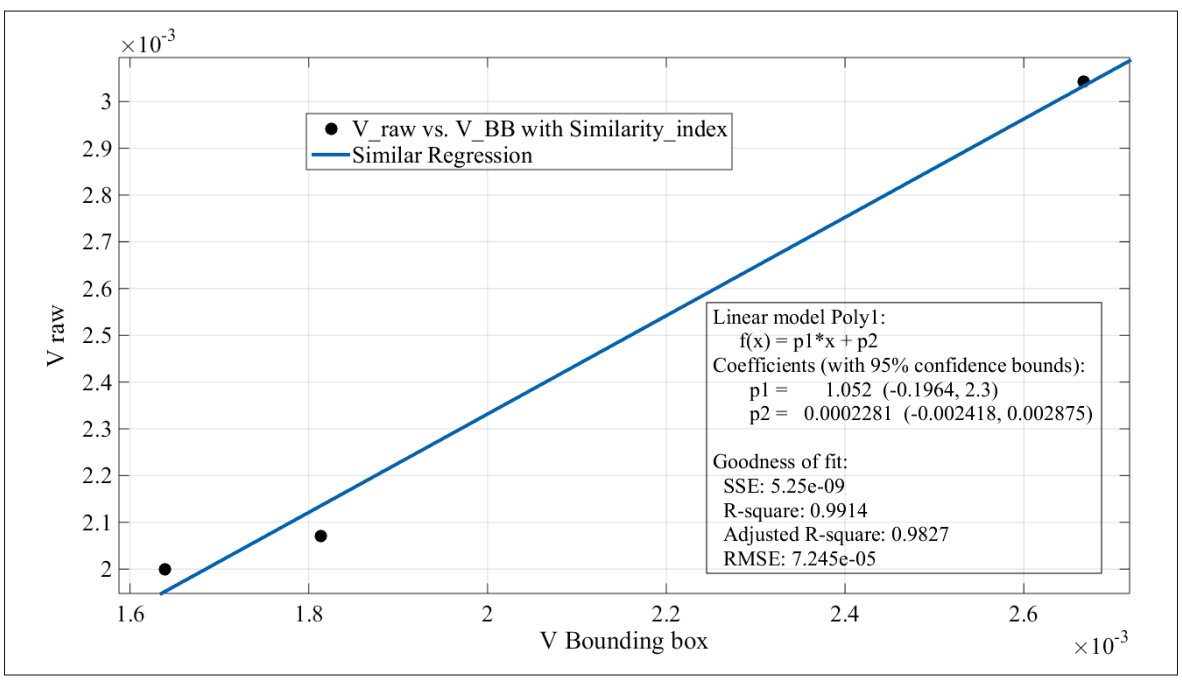

Figure-A I-6 Results of the weighted least square regression

Our approach shows promising result when used for the cost of the raw material which is already a consistent part of the total cost for a CNC machined part. We manage to reduce the absolute error from $2 to $1,18 on a $28 price, but more important we manage to have a really higher reliability coefficient on that estimation. The tacit factor K is depending on the experts, whereas, using similarity we are able to estimate the raw volume more precisely with a RC up to 0,897 against 0,7. Thus, this allows us to be both closer to the real price ($28,2 estimated with similarity versus $28 real) and more confident with an RC of 0,85. Furthermore, this reliability can be easily increased if we choose parts with a higher similarity index. The methodology helps to evaluate and measure the quality and the confidence of the estimation which both are key factors for the quotation process. The first results obtained with our methodology are very encouraging, therefore more experiments and estimations will be conducted in order to suggest a complete cost estimation model for the different companies and to enhance our possible outcomes.

Tableau-A I-3 Comparison between the similar method and the approximate calculus of entreprise 1

Part 4	**Value**	**Origin**	**RC**	**Absolute uncertainty**	**Relative Error [%]**
$V_{Boundingbox}$ [m^3]	2,48E-03	Exact	1		
K	1,10	Tacit	0,7	0,05	
$V_{raw/calcul}$ [m^3]	2,73E-03	Calcul	0,7	1,24E-04	3,1%
$V_{raw/sim}$ [m^3]	2,83E-03	Similar	0,923	3,84E-05	0,7%
$V_{raw/real}$ [m^3]	2,81E-03	Exact	0,99		
$Price_{mat}$ [$/kg]	$3,56	Database	0,95	0,1	
ρ [kg/m^3]	2800	Database	1		
$C_{raw/calcul}$ [$]	$27,2	Calcul	0,665	$2,00	3,1%
$C_{raw/sim}$ [$]	$28,2	Similar	0,877	$1,18	0,7%
$C_{raw/real}$ [$]	$28,0	Exact	0,941		

Rapport-Gratuit.com

5. Conclusion and future work

5.1 Conclusion

In this paper, we proposed a new generalized methodology for cost estimation in the case of CNC machined parts. We identified the different models in circulation in the industry and suggested a new approach to deal with the tacit knowledge that is always a major factor during the estimation process. Similarity can be used as an alternative method to obtain precise and valuable information about the cost of a product. It allows to reduce considerably the risk of errors, and increase the fidelity. Accordingly, this proposal shows the importance of knowledge contained within the companies and how many aspects derive from a part's geometry. Hence, the advantages of similarity, for some specific tasks, clearly appears, as stated in this paper.

5.2 Future work

Our future work concerns the development of a standardized cost estimation model for each aspect of a machined part price (material, machining, post processing, and so on). By talking more with the experts, tracking and benchmarking some parts, we aim to refine further the parameters, functions and models used for the different calculi and better integrate and use the geometrical similarity. We also plan to test further our model in some real world scenarios to extend its validity and address any potential issues.

Acknowledgement

This work was financed by the Canadian program MITACS, Techniprodec, Conception Genik, Arconic and Stelia North America.

References

Alemanni, M., Destefanis, F. & Vezzetti, E. (2010). Model-based definition design in the product lifecycle management scenario. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 52(1-4), 1-14. doi : 10.1007/s00170-010-2699-y.

Ben-Arieh, D. (2010). Cost estimation system for machined parts. *International journal of production research*, 38(17), 4481-4494. doi : 10.1080/00207540050205244.

Boothroyd, G. & Reynolds, C. (1989). Approximate cost estimates for typical turned parts. *Journal of manufacturing systems*, 8(3), 185-193.

Brière-Côté, A. & Rivest, L. (2010). *Vers une nouvelle approche pour la mesure et la représentation des différences entre modèles géométriques*. Unpublished Work.

Brière-Côté, A., Rivest, L. & Maranzana, R. (2012). Integration of explicit geometric constraints in the comparison of 3d cad models for part design reuse. Dans Rivest, L., Bouras, A. & Louhichi, B. (Éds.), *Product Lifecycle Management : Towards Knowledge-Rich Enterprises - IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2012, Revised Selected Papers* (pp. 445-457). New York, NY : Springer New York.

Chougule, R. G. & Ravi, B. (2006). Casting cost estimation in an integrated product and process design environment. *International journal of computer integrated manufacturing*, 19(7), 676-688. doi : 10.1080/09511920500324605.

Feng, C.-X., Kusiak, A. & Huang, C.-C. (1996). Cost evaluation in design with form features. *Computer-aided design*, 28(11), 879-885.

Ficko, M., Drstvenšek, I., Brezočnik, M., Balič, J. & Vaupotic, B. (2005). Prediction of total manufacturing costs for stamping tool on the basis of cad-model of finished product. *Journal of materials processing technology*, 164-165, 1327-1335.

Layer, A., Brinke, E. T., Houten, F. V., Kals, H. & Haasis, S. (2002). Recent and future trends in cost estimation. *International journal of computer integrated manufacturing*, 15(6), 499-510. doi : 10.1080/09511920210143372.

Liu, F. & Qiao, L. H. (2012). Product information modeling and organization with mbd. *Applied mechanics and materials*, 163, 221-225.

Ma, Y. S., Sajadfar, N. & Campos Triana, L. (2014). A feature-based semantic model for automatic product cost estimation. *International journal of engineering and technology*, 6(2), 109-113. doi : 10.7763/ijet.2014.v6.676.

Maranzana, R., Msaaf, O. & Rivest, L. (2007). *Interprétation des modèles géométriques 3d : application à la recherche de pièces et à la comparaison de leurs représentations géométriques*. Unpublished Work.

Molcho, G., Cristal, A. & Shpitalni, M. (2014). Part cost estimation at early design phase. *Cirp annals - manufacturing technology*, 63(1), 153-156.

Msaaf, O., Maranzana, R. & Rivest, L. (2007). Part data mining for information re-use in a plm context. 187-194. doi : 10.1115/gt2007-27966.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S. & Seneviratne, L. (2006). Product cost estimation : Technique classification and methodology review. *Journal of manufacturing science and engineering*, 128(2), 563. doi : 10.1115/1.2137750.

Ozcan, B. & Fığlalı, A. (2014). Artificial neural networks for the cost estimation of stamping dies. *Neural computing and applications*, 25(3-4), 717-726. doi : 10.1007/s00521-014-1546-8.

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, F. & Kheddouci, F. (2010). Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle ? a global perspective from aerospace industry. *Computers in industry*, 61(5), 497-508. doi : 10.1016/j.compind.2010.01.005.

Roy, R., Kelvesjo, S., Forsberg, S. & Rush, C. (2001). Quantitative and qualitative cost estimating for engineering design. *Journal of engineering design*, 12(2), 147-162. doi : 10.1080/09544820110038997.

Shehab, E. M. & Abdalla, H. S. (2001). Manufacturing cost modelling for concurrent product development. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 17(4), 341-353.

Sutherland, G. H. & Roth, B. (1975). Mechanism design : Accounting for manufacturing tolerances and costs in function generating problems. *Journal of engineering for industry*, 97(1), 283. doi : 10.1115/1.3438551.

Taguchi, G. (1986). Introduction to quality engineering : designing quality into products and processes. Repéré à https://books.google.ca/books/about/Introduction_to_quality_engineering.html?id=1NtTAAAAMAAJ&redir_esc=y.

Venne, F. (2009). *Capture des annotations au sein de la maquette numérique en développement de produits aéronautiques*. (Mémoire de maîtrise électronique, Montréal).

Widhiarso,W. ; Ravand, H. (2014). Estimating reliability coefficient for multidimensional measures : A pedagogical illustration. *Review of psychology*, 21(2). Repéré à http://hrcak.srce.hr/147109.

Xu, X., Fang, S. & Gu, X. (2006). A model for manufacturing cost estimation based on machining feature. *International technology and innovation conference (itic 2006)*.

LISTE DE RÉFÉRENCES

Alemanni, M., Destefanis, F. & Vezzetti, E. (2010). Model-based definition design in the product lifecycle management scenario. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 52(1-4), 1-14. doi : 10.1007/s00170-010-2699-y.

An, S.-H., Kim, G.-H. & Kang, K.-I. (2007). A case-based reasoning cost estimating model using experience by analytic hierarchy process. *Building and environment*, 42(7), 2573-2579. doi : 10.1016/j.buildenv.2006.06.007.

Ben-Arieh, D. (2010). Cost estimation system for machined parts. *International journal of production research*, 38(17), 4481-4494. doi : 10.1080/00207540050205244.

Boothroyd, G. & Reynolds, C. (1989). Approximate cost estimates for typical turned parts. *Journal of manufacturing systems*, 8(3), 185-193.

Brière-Côté, A. & Rivest, L. (2010). *Vers une nouvelle approche pour la mesure et la représentation des différences entre modèles géométriques*. Unpublished Work.

Brière-Côté, A., Rivest, L. & Maranzana, R. (2012). Integration of explicit geometric constraints in the comparison of 3d cad models for part design reuse. Dans Rivest, L., Bouras, A. & Louhichi, B. (Éds.), *Product Lifecycle Management : Towards Knowledge Rich Enterprises IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2012, Revised Selected Papers* (pp. 445-457). New York, NY : Springer New York.

Cavalieri, S., Maccarrone, P. & Pinto, R. (2004). Parametric vs. neural network models for the estimation of production costs : A case study in the automotive industry. *International journal of production economics*, 91(2), 165-177. doi : 10.1016/j.ijpe.2003.08.005.

Cheng, B.-W. & Maghsoodloo, S. (1995). Optimization of mechanical assembly tolerances by incorporating taguchi's quality loss function. *Journal of manufacturing systems*, 14(4), 264-276. doi : 10.1016/0278-6125(95)98879-b.

Chougule, R. G. & Ravi, B. (2006). Casting cost estimation in an integrated product and process design environment. *International journal of computer integrated manufacturing*, 19(7), 676-688. doi : 10.1080/09511920500324605.

Dong, Z., Hu, W. & Xue, D. (1994). New production cost-tolerance models for tolerance synthesis. *Journal of engineering for industry*, 116(2), 199. doi : 10.1115/1.2901931.

Feng, C.-X., Kusiak, A. & Huang, C.-C. (1996). Cost evaluation in design with form features. *Computer-aided design*, 28(11), 879-885. doi : 10.1016/0010-4485(96)00009-7.

Ficko, M., Drstvenšek, I., Brezočnik, M., Balič, J. & Vaupotic, B. (2005). Prediction of total manufacturing costs for stamping tool on the basis of cad-model of finished product. *Journal of materials processing technology*, 164-165, 1327-1335. doi : 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.013.

Hillsman, C., Wang, Y. & Nazzal, D. (2013). A semi-automatic mold cost estimation framework based upon geometry similarity. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 68(5-8), 1387-1399. doi : 10.1007/s00170-013-4929-6.

Jung, J.-Y. (2002). Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features. *Journal of intelligent manufacturing*, 13(4), 227-238. doi : 10.1023/a :1016092808320.

Kheddouci, F. (2010). *L'archivage à long terme de la maquette numérique 3d annotée*. (Mémoire de maîtrise électronique, Montréal).

Layer, A., Brinke, E. T., Houten, F. V., Kals, H. & Haasis, S. (2002). Recent and future trends in cost estimation. *International journal of computer integrated manufacturing*, 15(6), 499-510. doi : 10.1080/09511920210143372.

Lin, Z.-C. & Chang, D.-Y. (2002). Cost-tolerance analysis model based on a neural networks method. *International journal of production research*, 40(6), 1429-1452. doi : 10.1080/00207540110116282.

Liu, F. & Qiao, L. H. (2012). Product information modeling and organization with model based definition. *Applied mechanics and materials*, 163, 221-225.

Ma, Y. S., Sajadfar, N. & Campos Triana, L. (2014). A feature-based semantic model for automatic product cost estimation. *International journal of engineering and technology*, 6(2), 109-113. doi : 10.7763/ijet.2014.v6.676.

McInerney, C. (2002). Knowledge management and the dynamic nature of knowledge. *Journal of the american society for information science and technology*, 53(12), 1009-1018. doi : 10.1002/asi.10109.

Minsky, M. (1974). A framework for representing knowledge. *Memo 306*, MIT-AI Laboratory : Massachusetts Institute of Technology, 76.

Mirdamadi, S., Etienne, A., Hassan, A., Dantan, J. Y. & Siadat, A. (2013). Cost estimation method for variation management. *Procedia cirp*, 10, 44-53.

Molcho, G., Cristal, A. & Shpitalni, M. (2014). Part cost estimation at early design phase. *Cirp annals - manufacturing technology*, 63(1), 153-156. doi : 10.1016/j.cirp.2014.03.107.

Msaaf, O., Maranzana, R. & Rivest, L. (2007). Part data mining for information re-use in a plm context. 187-194. doi : 10.1115/gt2007-27966.

Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S. & Seneviratne, L. (2006). Product cost estimation : Technique classification and methodology review. *Journal of manufacturing science and engineering*, 128(2), 563. doi : 10.1115/1.2137750.

Nonaka, I. (1994). A dynamic theory of organizational knowledge creation. *Organization science*, 5(1), 14-37. doi : 10.1287/orsc.5.1.14.

Nonaka, I. & Takeuchi, H. (1995). *The knowledge creating company : How japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford University Press, Inc.

Proteau, A. (2016). *Prédiction de la complexité d'un produit usiné : proposition d'un modèle basé sur l'analyse du modèle 3d enrichi*. (Mémoire de maîtrise électronique, Montréal).

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, F. & Kheddouci, F. (2010). Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle ? a global perspective from aerospace industry. *Computers in industry*, 61(5), 497-508. doi : 10.1016/j.compind.2010.01.005.

Roy, R., Kelvesjo, S., Forsberg, S. & Rush, C. (2001). Quantitative and qualitative cost estimating for engineering design. *Journal of engineering design*, 12(2), 147-162.

Rubio, L., De la Sen, M., Longstaff, A. P. & Fletcher, S. (2013). Model-based expert system to automatically adapt milling forces in pareto optimal multi-objective working points. *Expert systems with applications*, 40(6), 2312-2322. doi : 10.1016/j.eswa.2012.10.034.

Saa, R., Garcia, A., Gomez, C., Carretero, J. & Garcia-Carballeira, F. (2012). An ontology-driven decision support system for high-performance and cost-optimized design of complex railway portal frames. *Expert systems with applications*, 39(10), 8784-8792. doi : 10.1016/j.eswa.2012.02.002.

Shehab, E. & Abdalla, H. (2001). Manufacturing cost modelling for concurrent product development. *Robotics and computer integrated manufacturing*, 17, 341-353.

Speckhart, F. H. (1972). Calculation of tolerance based on a minimum cost approach. *Journal of engineering for industry*, 94(2), 447. doi : 10.1115/1.3428175.

Sutherland, G. H. & Roth, B. (1975). Mechanism design : Accounting for manufacturing tolerances and costs in function generating problems. *Journal of engineering for industry*, 97(1), 283.

Taguchi, G. (1986). Introduction to quality engineering : designing quality into products and processes.

Tilotma, S. & Kelkar, D. (2012). A tour towards knowledge representation techniques. *International journal of computer technology and electronics engineering*, 2(2).

Tripathi, K. (2011). A review on knowledge-based expert system : Concept and architecture. *Ijca special issue on artificial intelligence techniques - novel approaches and practical applications,*, 4.

Venne, F. (2009). *Capture des annotations au sein de la maquette numérique en développement de produits aéronautiques*. (Mémoire de maîtrise électronique, Montréal).

Watif. (2017, juin, 15). Techniquote, simplifiez vous le devis de la cao au cout d'usinage en quelques clics. [En Ligne]. Repéré à http://watif.fr/page/techniquote.

Watson, P. (2006). Cost estimation of machined parts within an aerospace supply chain. *Concurrent engineering*, 14(1), 17-26. doi : 10.1177/1063293x06063424.

Widhiarso,W. ; Ravand, H. (2014). Estimating reliability coefficient for multidimensional measures : A pedagogical illustration. *Review of psychology*, 21(2). Repéré à http: //hrcak.srce.hr/147109.

Xu, X., Fang, S. & Gu, X. (2006). A model for manufacturing cost estimation based on machining feature. *International technology and innovation conference (itic 2006)*.

Yang, J., Mao, J., Zhang, H. & Cao, Y. (2010). Novel cost–tolerance model based on fuzzy neural networks. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part b : Journal of engineering manufacture*, 224(11), 1757-1765. doi : 10.1243/09544054jem1789.