



HAL
open science

Optimisation multicritères de gammes d'usinages

Laurent Delolme

► **To cite this version:**

Laurent Delolme. Optimisation multicritères de gammes d'usinages. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2017. Français. NNT: 2017CLFAC019. tel-02683330

HAL Id: tel-02683330

<https://theses.hal.science/tel-02683330>

Submitted on 1 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° ordre : 2808
EDSPIC : 797

UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE
Ecole Doctorale
Sciences pour l'Ingénieur de Clermont Ferrand

Thèse

Présentée pour obtenir le grade de :

Docteur d'université

Spécialité : Génie Mécanique

Par

Laurent Delolme

Optimisation multicritères de gammes d'usinage

Soutenue publiquement le 03/05/2017

Devant le jury :

Pr Jean Yves Hascoët	Ecole Centrale de Nantes	Président
Pr Caroline Thierry	Université Toulouse Jean Jaurès	Rapporteur
Pr François Villeneuve	Institut Nationale Polytechnique de Grenoble	Rapporteur
Pr Jacques Lamothe	Ecole des Mines d'Albi	Examineur
Dr Séverine Durieux	SIGMA Clermont	Encadrante
Mr Denis Bechet	Aubert et Duval	Examineur
Pr Emmanuel Duc	SIGMA Clermont	Directeur de thèse

Remerciements

Un travail de recherche tel que celui effectué dans le cadre d'un doctorat n'est évidemment pas un travail qui se mène seul de bout en bout. J'aimerais donc ici remercier les personnes qui ont permis que ce projet aille au bout.

Je vais commencer par remercier François Villeneuve et Caroline Thierry qui ont accepté de rapporter cette thèse, malgré la difficulté inhérente à la dualité des thématiques abordées. Merci également à Jean-Yves Hascoët d'avoir accepté de présider le jury, ainsi que pour sa bienveillance lors de la soutenance. Je remercie également tous les membres du jury d'avoir accepté d'assister à la présentation de ce travail, et pour l'intérêt qu'ils ont montré envers ces travaux.

Je voudrais remercier Emmanuel Duc, qui m'a dirigé tout au long de ces trois années et quelques de thèse. Il a été disponible et à l'écoute, et s'est toujours intéressé à l'avancée des travaux et à leur bonne marche. Je remercie également Séverine Durieux d'avoir co-encadré cette thèse. Elle a déployé de gros efforts pour se mettre à notre niveau, comprendre notre langage de mécanicien, tout en apportant son expertise qui a été le fondement de l'originalité de ces travaux.

Je voudrais maintenant remercier les personnes d'Aubert & Duval qui ont permis à ce projet d'exister, à commencer par Sylvain Saleur, Eric Resmond et Christophe Guinot, qui ont été mes interlocuteurs privilégiés au sein de l'atelier d'usinage de l'entreprise. Leurs connaissances, leurs expériences et leurs remarques m'ont permis d'avancer rapidement et efficacement, et de me construire personnellement autour de cette première expérience significative dans le monde du travail. Merci pour tous ces dialogues, sérieux ou non, que nous avons pu avoir. Mes remerciements vont également à Denis Bechet, du département R&D d'Aubert & Duval qui a assuré le lien entre science et industrie tout au long du projet, et qui, par ses nombreuses relectures a contribué à la qualité du manuscrit.

Je souhaite évidemment adresser mes plus vifs remerciements à tous les techniciens et opérateurs de l'atelier, qui ont rendu mon quotidien simple et évident malgré les retards ou imprévus que nous avons pu rencontrer tout au long de ces années. Je pense notamment à Gaël, Mickaël, Jordan, Paul, Antonio, Les Nicolas, Romain, Bruno, Tony, et bien d'autres encore.

Je ne peux pas faire de remerciements sans en adresser aux doctorants et permanents du laboratoire qui ont fait partie intégrante de mon quotidien et ont permis d'oublier momentanément le travail dans des soirées, repas, sorties diverses et variées : Benoît, Mathieu, Nico, Héloïse, Charles, Adrien, Guillaume, Manu... Je veux adresser des remerciements tous particuliers pour Anne-Lise, sans qui ce projet n'aurait eu aucune réalité concrète et utilisable. Merci à toi pour ta patience et ton soutien qui a largement dépassé le cadre du

projet de Master grâce auquel nous nous sommes connus. C'est maintenant à ton tour de faire avancer la science !

Merci également à mes parents, pour tout ce qu'ils m'ont apporté, pour leur soutien indéfectible et leurs conseils avisés. Je n'oublie pas non plus ma sœur ainsi que tous mes amis, Gadz'Arts ou non (parce qu'on n'est pas si sectaire que ça), qui ont, chacun à leur manière, cru en moi et contribué à m'amener là où je suis à présent.

Mes derniers remerciements vont à Marion, qui a tout fait pour m'aider, m'a soutenu, m'a supporté, m'a subi, jusque dans les moments les plus difficiles. Ceci n'est qu'un petit chapitre de notre vie, et certainement pas le plus beau. Car le plus beau, nous allons seulement commencer à l'écrire.

J'en oublie certainement encore et je m'en excuse.

Je dédie cette thèse à mes grands-pères,
Qui ont dédié leurs vies professionnelles à la mise en forme des métaux.
C'est aussi grâce à vous si j'en suis là aujourd'hui.

Résumé

L'objectif de ces travaux est de développer une méthodologie de génération automatique de gammes d'usinage optimisées et innovantes qui permettent aux sous-traitants aéronautiques de faire face aux problématiques de productivité et de compétitivité actuelles. Dans un premier temps, un état de l'art sur les systèmes existants de génération de gammes est présenté et permet d'introduire les limites des systèmes actuels. Une méthodologie en quatre étapes est ensuite proposée, permettant à l'utilisateur d'obtenir des gammes d'usinage optimisées respectant son savoir-faire et son expérience et introduisant de l'innovation. Cette méthodologie s'appuie sur une représentation du comportement décisionnel des methodistes dans une situation donnée ainsi que face au risque à l'industrialisation et élargit la formalisation de la performance d'une gamme en prenant en compte d'autres critères de performance autres que le temps d'usinage ou le coût global. Ainsi, un état de l'art sur les méthodes d'aide à la décision multicritère permet de sélectionner la méthode pour l'agrégation des performances par rapport à la problématique industrielle. Après une description géométrique et technologique de la pièce et la création par les methodistes, d'opérations d'usinage élémentaires, un algorithme génétique est utilisé pour générer des gammes optimisées. Lors d'une dernière étape, la méthodologie présente les meilleures gammes générées au methodiste et l'utilisation de la théorie du choix social lui permet de cibler les gammes les plus performantes à implanter, en intégrant un critère de risque à l'industrialisation. Cette méthodologie a été appliquée à une pièce de train d'atterrissage usinée en alliage de Titane et a permis une diminution de 25% du temps d'usinage tout en augmentant la fiabilisation. Des perspectives d'amélioration de l'outil d'aide à la décision, à diverses étapes de la méthodologie, sont enfin proposées.

Mots clés : Usinage ; génération de gammes ; alliage de titane ; décision multicritère ; optimisation

The objective of this work is to develop a Computer-Aided Process Planning (CAPP) methodology to allow aeronautical subcontractors to face the current productivity and competitiveness problems. To start, a state of the art on the existing CAPP systems is presented and introduce the limits of the current systems. A four-step methodology is then proposed, allowing the user to obtain optimized machining ranges respecting his know-how and experience and introducing innovation. This methodology is based on a representation of the decision-making behavior of the process planners in a given situation as well as the risk of industrialization and broadens the formalization of the performance by taking into account performance criteria other than the machining time or cost. Thus, a state of the art on multicriteria decision-making methods helps to select the method for the aggregation of performance in relation to the industrial problem. After a geometrical and technological description of a mechanical part and the creation by the process planners of elementary machining operations, a genetic algorithm is used to generate optimized ranges. In a final step, the methodology presents the best process plans generated to the process planners and the use of the social choice theory allows to target the most efficient ones to choose, integrating a risk criterion based on tool deflection. This methodology was applied to a Titanium alloy machined landing gear part and allowed a 25% reduction in machining time while

increasing reliability. Finally, prospects for improving the decision-making tool at various stages of the methodology are proposed.

Key-Words: *Machining; Computer Aided Process Planning; Titanium Alloy; Multicriteria Decision Making; Optimization*

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Table des matières	7
Table des illustrations.....	13
Index des Tableaux	15
Index des équations	17
Liste des notations.....	21
Chapitre 1 : Problématique Industrielle	27
1. Contexte et problématique industrielle	27
2. Créer une gamme par une méthode d'ingénierie classique.....	30
2.1 Présentation du cas d'application.....	30
2.2 Méthodologie utilisée	33
2.3 Limites de l'ingénierie classique	39
3. Evolution de la problématique et enjeux industriels.....	40
3.1 Objectifs de la thèse et verrous scientifiques.....	42
4. Conclusion et articulation du mémoire	44
Chapitre 2 : Méthodes de génération de gammes d'usinage	47
1. Formalisation du concept de gamme d'usinage.....	47
1.1 Positionnement de la gamme d'usinage.....	47
2. La génération automatique de gamme de fabrication.....	47
3. Sélection des outils et conditions de coupe	49
3.1 Processus géométrique : définition des géométries outils.....	50
3.2 Processus Technologique : Définition des conditions de coupe.....	51
3.3 Système d'optimisation multi-outils.....	53
3.4 Conclusion.....	53
4. Estimation des temps d'usinage	53
5. Processus de génération de gammes d'usinage : un état de l'art.....	54
5.1 Génération de gammes par variantes	55
5.2 Génération de gammes par approche générative	56
5.2.a Approche générative, systèmes algorithmiques	57

6. Une vision globale des méthodologies CAPP existantes	58
7. Précision et fiabilité des gammes générées	62
8. Conclusion	62
Chapitre 3 : Identification des indicateurs de performance d'une gamme de fabrication et des risques techniques associés.....	65
1. Introduction.....	65
2. Indicateurs de Productivité	66
2.1 Temps à Valeur Ajoutée.....	66
2.2 Temps à Non-Valeur Ajoutée.....	67
2.3 Temps liés aux utilisations des outils de coupe	69
2.4 Coût carbure	71
3. Risques techniques en usinage.....	72
3.1 Proposition d'un indice de risque pour une opération d'usinage	73
3.2 Formalisation de l'indice de risque d'une gamme.....	75
4. Conclusion	78
Chapitre 4 : Décision Multicritère Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique	79
1. Avant-propos	79
2. Introduction.....	79
3. L'aide à la décision.....	80
3.1 Définition de l'aide à la décision	80
3.2 Approches de l'aide à la décision.....	80
3.3 Démarche de formalisation d'un processus d'aide à la décision.....	81
4. Aide à la décision multicritère	83
4.1 Définition de l'aide à la décision multicritère et processus	83
4.2 Typologie des problèmes d'aide à la décision multicritère	84
4.3 Conséquences et critère	85
4.4 Les méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM).....	86
4.4.a Front de Pareto (Ghosh and Chakraborty 2014)	87
4.4.b Les méthodes du critère unique de synthèse.....	88
4.4.c Méthodes multicritères d'aide à la décision de surclassement	94

4.5	Choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère dans le cadre de notre problématique.	101
4.5.a	Etat de l'art des méthodes utilisées en conception et fabrication.....	101
4.5.b	Quelle méthode pour notre problématique ?.....	102
5.	Présentation des principes et hypothèse de la méthode <i>Analytic Hierarchy Process</i>	103
5.1	Avant-propos	103
5.2	Principes et exploitation de la méthode AHP	103
6.	Utilisation de la théorie du choix social dans le cadre de nos travaux de recherche.....	109
6.1	Majorité relative	110
6.2	Méthode de Condorcet.....	111
6.3	Méthode de Borda.....	112
7.	Conclusion	113
Chapitre 5 : Contribution scientifique à la problématique posée		115
1.	Introduction.....	115
2.	Formalisation scientifique	115
2.1	Spécification de la pièce à usiner.....	115
2.2	Caractérisation de la machine.	118
2.3	Caractérisation de la base de données outils disponibles.	118
2.4	Spécification d'une gamme (Variables de décision de notre problème).....	119
2.5	Objectifs de l'optimisation.....	122
2.6	Contraintes.	123
2.6.a	Contraintes sur le choix d'outil.....	123
2.6.b	Contraintes dimensionnelles sur les opérations d'usinage.....	124
2.6.c	Contrainte sur le séquençement de la gamme	124
3.	Proposition d'une méthode d'optimisation automatique de gammes de fabrication.....	124
3.1	Etape 1 : Description des zones à usiner	127
3.2	Etape 2 : Définition de gamme enveloppe pour chaque zone avec optimisation des conditions de coupe	128
3.3	Etape 3 : Optimisation globale de la gamme de la pièce.....	129
3.3.a	Objectif et choix du type d'algorithme.....	129
3.3.b	Présentation de l'algorithme génétique d'optimisation	129

3.3.c	Création de la population initiale	131
3.3.d	Evaluation des individus	132
3.3.e	Sélection de la nouvelle population et création de nouveaux individus.....	134
3.3.f	Critère d'arrêt.....	138
3.3.g	Résultats	138
3.3.h	Paramètres d'entrée.....	138
3.4	Etape 4 : Choix final du méthodiste	139
3.5	Etape Parallèle : Modélisation du comportement décideur du méthodiste	139
3.6	Conclusion.....	140
Chapitre 6 : Présentation de l'outil informatique et application à un cas industriel		141
6.	Structure et articulation du logiciel	141
6.1	Onglet écran principal.....	141
6.2	Description des zones à usiner	142
6.3	Gammes enveloppes	143
6.4	Gamme d'usinage détaillée	145
6.5	Etape 4 : utilisation de la théorie du choix social	146
6.6	Base de données outils	146
7.	Dimensionnement du cas d'étude.....	148
7.1	Présentation de la pièce	148
7.2	Réalisation de l'AHP pour l'étape 3	149
8.	Paramétrage de l'algorithme génétique.....	151
8.1	Définition des tests	151
8.2	Analyse des tests.....	151
8.3	Expérimentations complémentaires.....	155
8.4	Analyse des résultats	156
8.4.a	Probabilité de croisement	156
8.4.b	Probabilité de mutation de séquençement.....	156
8.4.c	Probabilité de mutation de zone	157
8.4.d	Probabilité de mutation d'outil	158
8.5	Choix du réglage final.....	159

9.	Application au cas d'étude	160
9.1	Présentation des résultats données par l'outil	160
9.2	Comparaison avec la gamme initiale et la méthode d'ingénierie classique	161
10.	Impact de l'AHP sur les résultats.....	162
11.	Conclusion	165
Chapitre 7 : Conclusions et perspectives.....		167
Annexes		169
1.	Annexe 1 : Réglages donnant la meilleure valeur du <i>MCP</i>	169
2.	Annexe 2 : Plan d'expériences complémentaires.....	170
3.	Annexe 3 : Détails des 5 meilleures gammes obtenues par le réglage identifié (Methodiste 1)	172
4.	Annexe 4 : Détails des gammes initiale et optimisée en ingénierie	175
5.	Détails des meilleures gammes obtenues pour les methodistes 2, 3 et 4	176
Références.....		179

Table des illustrations

Figure 1 : Augmentation prévisionnelle du nombre de passagers aériens (Airbus, 2014).....	27
Figure 2 : Part des divers matériaux composant un aéronef (Airbus, 2014; Boeing, 2006).....	28
Figure 3 : Géométrie de la pièce d'étude, à gauche : forme finale, à droite : forme brute	32
Figure 4 : Extrait de la gamme d'usinage initiale de la pièce d'étude	34
Figure 5 : diagramme de Pareto de l'utilisation des outils de la gamme initiale.....	34
Figure 6 : Détail de la gamme d'usinage optimisée de la pièce d'étude.	36
Figure 7 : Diagramme de Pareto d'utilisation des outils de la gamme optimisée.	36
Figure 8 : Répartition des temps VA et NVA pour le cas d'application.....	37
Figure 9 : Répartition des temps NVA liés au cas d'application	37
Figure 10 : Evolution du temps de fabrication de la pièce d'étude.....	39
Figure 11 : Définition de la gamme optimale au regard des critères usuels de performance	41
Figure 12 : Définition d'un processus usinant complexe.....	42
Figure 13 : méthode de choix d'un outil de coupe (Hupman et al. 2015).....	50
Figure 14 : Catégories des techniques de génération de gammes d'usinage (Villeneuve 2002)	55
Figure 15 : Schéma de fonctionnement de l'étape préparatoire d'une méthode par variante (Chang, 1990)56	
Figure 16 : Schéma de fonctionnement de l'étape productive d'une méthode par variante (Chang, 1990)..	56
Figure 17 : Nombre de méthodes CAPP développées par technologie et par année (Xu et al. 2011)	61
Figure 18 : Paramétrage de la trajectoire outil pour l'opération n de la gamme m.....	66
Figure 19 : Modélisation de l'indice de risque d'une opération d'usinage	73
Figure 20 : Modélisation d'une poutre encastree en flexion simple.....	74
Figure 21 : Processus de décision multicritère (Nafi & Wery, 2010)(Nafi & Wery, 2010).....	84
Figure 22 : Pseudo-Critère.....	86
Figure 23: Front de Pareto pour une tôle en flexion (Grierson 2008).....	88
Figure 24 : Les étapes de AHP.	92
Figure 25 : Structure hiérarchique d'un problème de décision selon la méthode AHP.	92
Figure 26 : Exemple d'architecture décisionnelle pour un problème d'ordonnement (Ounnar, Naamane, Pujo, & M'Sirdi, 2013)	104
Figure 27 : Zone d'usinage quelconque (à gauche) et sa modélisation (à droite).....	116
Figure 28 : Modélisation du volume de matière à enlever	116
Figure 29 : Exemple d'un outil ayant plusieurs plaquettes carbures par dent.....	119
Figure 30 : comparaison du volume usiné entre les différentes opérations sur une zone	120
Figure 31 : Epaisseur moyenne de copeau hm, n	122
Figure 32 : Architecture de la méthode proposée.	126
Figure 33 : Caractéristiques nécessaires à la description des zones à usiner.....	127
Figure 34 : Exemple d'alésage à usiner.....	128
Figure 35 : forêt à plaquettes (à gauche), fraise cylindrique et cycle hélicoïdal (à droite)	128

Figure 36 : Etapes de l'algorithme génétique.....	131
Figure 37 : Gammes complètes avec un séquençement zone par zone.	131
Figure 38 : Gammes complètes avec un séquençement aléatoire des opérations élémentaires.....	131
Figure 39 : Mécanisme de création d'une nouvelle génération.....	135
Figure 40 : Représentation d'un croisement de gammes enveloppes.....	136
Figure 41 : Représentation d'un individu parent.....	136
Figure 42 : Représentation d'individu enfant issu d'une modification du séquençement.....	137
Figure 43 : Représentation d'un individu enfant issu d'un changement de gamme enveloppe.....	137
Figure 44 : Représentation d'un enfant issu d'une mutation sur l'outil de la deuxième opération.....	137
Figure 45 : Probabilités cumulées de mutation.....	138
Figure 46 : Modèle décisionnel hiérarchique proposé.....	140
Figure 47 : Ecran présentant les diverses zones à usiner renseignées.....	142
Figure 48 : Masque de saisie des zones à usiner.....	143
Figure 49 : Tableau récapitulatif des caractéristiques d'une zone à usiner.....	143
Figure 50 : Masque de saisie des informations pour une opération d'usinage.....	144
Figure 51 : Masque de saisie d'un nouvel outil coupant.....	147
Figure 52 : Zones à usiner.....	148
Figure 53 : Identifications des zones à usiner.....	149
Figure 54 : Meilleure valeur du MCP obtenue pour chaque test.....	151
Figure 55 : Convergence MCP sur les tests à 50 itérations.....	152
Figure 56 : Convergence MCP sur les tests à 150 itérations.....	152
Figure 57 : Convergence MCP sur les tests à 300 itérations.....	153
Figure 58 : Comparaison des valeurs de <i>Ptournoi</i> sur la vitesse de convergence de l'algorithme.....	153
Figure 59 : Comparaison de l'influence du pourcentage de meilleurs individus conservés sur la convergence.....	154
Figure 60 : Valeur minimale du <i>MCP</i> obtenue pour chaque test en fonction de la valeur de <i>Pc</i>	156
Figure 61 : Numéro de la première itération d'apparition de la meilleure valeur du <i>MCP</i> en fonction de la valeur de <i>Pc</i>	156
Figure 62 : Valeur minimale du <i>MCP</i> obtenue pour chaque test en fonction de la valeur de <i>Pms</i>	157
Figure 63 : Numéro de la première itération d'apparition de la meilleure valeur du <i>MCP</i> en fonction de la valeur de <i>Pms</i>	157
Figure 64 : Valeur minimale du <i>MCP</i> obtenue pour chaque test en fonction de la valeur de <i>PmGE</i>	158
Figure 65 : Indice de la première itération d'apparition de la meilleure valeur du <i>MCP</i> en fonction de la valeur de <i>PmGE</i>	158
Figure 66 : Valeur minimale du <i>MCP</i> obtenue pour chaque test en fonction de la valeur de <i>Pmo</i>	158
Figure 67 : Numéro de la première itération d'apparition de la meilleure valeur du <i>MCP</i> en fonction de la valeur de <i>Pmo</i>	159

Index des Tableaux

Tableau 1 : Matrice de correspondance entre les axes de deux opérations consécutives et l'angle α	68
Tableau 2 : Matrice de correspondance entre les changements d'axe et la nécessité d'un changement d'accessoire.....	69
Tableau 3 : Exemple de gammes de fabrication.....	76
Tableau 4 : Différence entre les différentes approches d'aide à la décision (Tsoukiàs, 2006)	81
Tableau 5 Les différentes problématiques de décision [Roy, 1985]	85
Tableau 6 : Echelle de valeur de Saaty (T. L. Saaty, 1984)	93
Tableau 7 : Comparaison des méthodes d'aide à la décision multicritère à critère unique de synthèse	94
Tableau 8 : Les 6 types de critères pour la méthode PROMETHEE (Vincke, 1994)	96
Tableau 9 : Relations entre les alternatives	97
Tableau 10 : Comparaison des méthodes de surclassement.	100
Tableau 11 : Exemple de matrice de comparaison de 4 solutions par rapport à un critère C1	106
Tableau 12 : Matrice de comparaison normalisée	106
Tableau 13 : Vecteur priorité des 4 solutions par rapport au critère C1.....	106
Tableau 14 : vecteur [WAO] d'importance des alternatives par rapport à l'objectif général.....	108
Tableau 15 : Variation du RCI en fonction du nombre d'alternatives	109
Tableau 16 : Concordance entre la théorie du choix social et la décision multicritère (Arrow & Raynaud, 1986)	110
Tableau 17 : Exemple de classement relatif des gammes proposées sur chaque performance élémentaire	110
Tableau 18 : Exemple pour la majorité relative	111
Tableau 19 : Classement relatif des gammes par rapport aux indicateurs élémentaire.....	112
Tableau 20 : Score et classement selon la méthode de Borda.....	112
Tableau 21 : Récapitulatif des caractéristiques des étapes de la méthode proposée	127
Tableau 22 : Analogie des termes utilisés en algorithme génétique et dans notre cas de fabrication.....	130
Tableau 23 : Paramètres d'entrée de l'algorithme d'optimisation de gammes	139
Tableau 24 : Ecran principal	142
Tableau 25 : Tableau représentant une gamme enveloppe de la zone considérée.....	144
Tableau 26 : Tableau récapitulatif des performances d'une gamme d'usinage.....	145
Tableau 27 : Extrait d'un tableau détaillant une gamme d'usinage	145
Tableau 28 : Tableau regroupant les performances des meilleures gammes générées	146
Tableau 29 : Exemple de résultats de la théorie du choix social.....	146
Tableau 30 : Extrait de la base de données outils coupants intégrée	146
Tableau 31 : Types outils et abréviations associées	147
Tableau 32 : Cycles d'usinage référencés et leurs abréviations	148
Tableau 33 : Exemple de matrice de comparaison de critères	149

Tableau 34 : Gammes fictives pour les critères de niveau 1	150
Tableau 35 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste pour les critères de niveau 2...	150
Tableau 36 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du décideur 1 pour les critères de niveau 1	150
Tableau 37 : Valeurs des indicateurs de performance de la meilleure gamme générée par les tests	154
Tableau 38 : Description de la meilleure gamme générée	155
Tableau 39 : Récapitulatif des valeurs de performances des 5 meilleures gammes générées par le logiciel	160
Tableau 40 : Application de la théorie du vote social.	161
Tableau 41 : Comparaison des niveaux de performances entre les gammes initiales, optimisée et fournie par le logiciel	161
Tableau 42 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 2 pour les critères de niveau 2	162
Tableau 43 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 2 pour les critères de niveau 1	163
Tableau 44 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 3 pour les critères de niveau 2	163
Tableau 45 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 3 pour les critères de niveau 1	163
Tableau 46 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 4 pour les critères de niveau 2	163
Tableau 47 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 4 pour les critères de niveau 1	163
Tableau 48 : Valeurs des indicateurs de performance de la meilleure gamme générée pour chaque méthodiste.....	164

Index des équations

Equation (1) : Temps d'usinage d'une opération élémentaire.....	67
Equation (2) : Temps d'usinage de la gamme	67
Equation (3) : Temps total pour les changements d'orientation d'une gamme	68
Equation (4) : Temps total pour les changements d'accessoire d'une gamme.....	69
Equation (5) : Temps total pour les changements d'outil d'une gamme	70
Equation (6) : Temps total pour les changements de plaquettes pour une opération	71
Equation (7) : Temps total pour les changements de plaquettes pour une gamme.....	71
Equation (8) : Nombre de plaquettes changées durant une opération	71
Equation (9) : Coût carbure d'une gamme	72
Equation (10) : Effort de coupe d'une opération pour une gamme.....	74
Equation (11) : Flexion induite sur l'outil pour une opération d'une gamme.....	74
Equation (12) : Formulation finale de la flexion induite sur l'outil pour une opération d'une gamme	75
Equation (13) : Risque d'une opération d'une gamme	75
Equation (14) : Risque seuil admissible pour une opération d'une gamme.....	75
Equation (15) : Indice de risque d'une opération pour une gamme	75
Equation (16) : Indice de risque d'une gamme pour un méthodiste optimiste face au risque.....	76
Equation (17) : Objectif de décision pour le risque pour un méthodiste optimiste face au risque	76
Equation (18) : Indice de risque d'une gamme pour un méthodiste neutre face au risque	77
Equation (19) : Objectif de décision pour le risque pour un méthodiste neutre face au risque.....	77
Equation (20) : Indice de risque d'une gamme pour un méthodiste pessimiste face au risque.....	77
Equation (21) : Objectif de décision pour le risque pour un méthodiste pessimiste face au risque.....	77
Equation (22) : Indice de risque d'une gamme pour un méthodiste pessimiste face au risque	78
Equation (23) : Objectif de décision pour le risque pour un méthodiste sensible face au risque.....	78
Equation (24) : Objectif de décision multicritère	85
Equation (25) : Définition d'un vrai critère.....	86
Equation (26) : Définition d'un pseudo-critère	86
Equation (27) : Domination d'un critère par rapport à un autre.....	88
Equation (28) : Expression du front de Pareto	88
Equation (29) : Somme pondérée de critères	89
Equation (30) : Normalisation des performances (TOPSIS).....	90
Equation (31) : Produit des performances normalisées (TOPSIS)	90
Equation (32) : Solutions idéale (TOPSIS)	90
Equation (33) : Solutions anti-idéale(TOPSIS).....	90
Equation (34) : Distance euclidienne entre une solution et la solution idéale (TOPSIS).....	90
Equation (35) : Distance euclidienne entre une solution et la solution anti-idéale (TOPSIS).....	90
Equation (36) : Indice de similarité à la solution idéale (TOPSIS).....	90

Equation (37) : Normalisation des coefficients d'importance relative (SMART).....	91
Equation (38) : Critère de synthèse G (SMART).....	91
Equation (39) : Indice de Préférence (PROMETHEE)	95
Equation (40) : Flux sortant (PROMETHEE)	95
Equation (41) : Flux entrant (PROMETHEE).....	95
Equation (42) : Flux total (PROMETHEE)	95
Equation (43) : Conditions de surclassement (PROMETHEE)	97
Equation (44) : Indice de concordance (ELECTRE 1).....	98
Equation (45) : Indice de discordance (ELECTRE 1).....	98
Equation (46) : Indice de concordance (ELECTRE 2).....	98
Equation (47) : Indice de discordance (ELECTRE 2)	99
Equation (48) : Relation de surclassement forte (ELECTRE 2)	99
Equation (49) : Relation de surclassement faible (ELECTRE 2).....	99
Equation (50) : Importance relative des sous-critères par rapport à l'objectif général (AHP).....	106
Equation (51) : Critère simple (AHP)	106
Equation (52) : Vecteur d'importance relative des critères et sous critères (AHP).....	107
Equation (53) : Matrice d'agrégation des alternatives par rapport aux indicateurs (AHP).....	107
Equation (54) : Matrice d'agrégation pour le cas de 3 critères (AHP).....	107
Equation (55) : Importance relative des alternatives par rapport aux critères (AHP).....	107
Equation (56) : Matrice d'agrégation (AHP)	107
Equation (57) : Vecteur d'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif général (AHP)	108
Equation (58) : Indicateur agrégé (AHP).....	108
Equation (59) : λ_{\max} (AHP)	109
Equation (60) : Nombre de passes axiales pour l'opération élémentaire n de la gamme m.....	121
Equation (61) : Profondeur de passe axiale pour l'opération n de la gamme m	121
Equation (62) : Engagement radial pour l'opération n de la gamme m.....	121
Equation (63) : Nombre de passes radiales pour l'opération élémentaire n de la gamme m.	121
Equation (64) : Avance à la dent pour l'opération élémentaire n de la gamme m (1 ^{ère} formule)	121
Equation (65) : Avance à la dent pour l'opération élémentaire n de la gamme m (2 ^{ème} formule)	121
Equation (66) : Epaisseur moyenne du copeau pour l'opération élémentaire n de la gamme m.	121
Equation (67) : Angle d'engagement de l'outil pour l'opération élémentaire n de la gamme m	122
Equation (68) : Avance à la dent pour l'opération n de la gamme m.utilisée.....	122
Equation (69) : Vitesse de rotation de broche pour l'opération élémentaire n de la gamme m.....	122
Equation (70) : Vitesse d'avance de l'outil pour l'opération élémentaire n de la gamme m.....	122
Equation (71) : Objectif multicritère de l'optimisation	123
Equation (72) : Minimisation multicritère	123
Equation (73) : Contrainte générale sur le diamètre de l'outil pour l'opération élémentaire n de la gamme m	123

Equation (74) : Contrainte sur la longueur de l'outil pour l'opération élémentaire n de la gamme m	123
Equation (75) : Contrainte sur le diamètre de l'outil pour l'opération élémentaire n de la gamme m pour les opérations de finition.....	123
Equation (76) : Contraintes dimensionnelles sur les opérations d'usinage selon l'axe principal	124
Equation (77) : Contraintes dimensionnelles sur les opérations d'usinage selon l'axe secondaire.....	124
Equation (78) : Contrainte d'antériorité sur les zones pour le séquençement	124
Equation (79) : Contrainte d'antériorité sur les opérations d'une même zone	124
Equation (80) : Temps de changement d'orientation au pire des cas.....	132
Equation (81) : Temps de changement d'orientation le plus élevé dans la base de données outils	132
Equation (82) : Temps de changement d'accessoires au pire des cas.....	132
Equation (83) : Temps de changement d'outils au pire des cas	132
Equation (84) : Temps d'usinage au pire des cas	133
Equation (85) : Temps de changement de plaquettes au pire des cas.....	133
Equation (86) : Coût carbure au pire des cas	133
Equation (87) : Temps de changement d'orientation normalisé de la gamme m.....	134
Equation (88) : Temps de changement d'accessoires normalisé de la gamme m	134
Equation (89) : Temps de changement d'outils normalisé de la gamme m.....	134
Equation (90) : Temps d'usinage normalisé de la gamme m	134
Equation (91) : Temps de changement de plaquettes normalisé de la gamme m.....	134
Equation (92) : Coût carbure normalisé de la gamme m	134

Liste des notations.

α_n	Angle de changement entre l'axe de l'opération $n - 1$ et l'axe de l'opération n .
$\theta_{m,n}$	Angle d'engagement de l'outil à l'opération $Op_{m,n}$
$Ae_{m,n}$	Engagement radial pour l'opération n de la gamme m .
$Ae_{out_k}^{min}$	Engagement radial minimal de l'outil k de la base de données outils
$Ae_{outil_{m,n}}^{min}$	Engagement radial minimal de $Outil_{m,n}$ dans la base de donnée outils
$Ae_{out_k}^{max}$	Engagement radial maximal de l'outil k de la base de données outils
Ant_{Zone_i}	Ensemble des zones qui sont obligatoirement à usiner au préalable de l'usinage de la $Zone_i$.
$Ap_{n,m}$	Profondeur de passe axiale pour l'opération n de la gamme m .
$Ap_{outil_{m,n}}^{max}$	Profondeur de passe axiale maximale autorisé de $Outil_{m,n}$ dans la base de donnée outils
$Ap_{out_k}^{max}$	Profondeur de passe axiale maximale autorisé de l'outil k de la base de données outils
$As_{outil_{m,n}}$	Section de copeau maximale admissible par $Outil_{m,n}$
As_{out_k}	Section de copeau maximale admissible par l'outil k de la base de données outils
$Axe_{Zone_i,1}$	Axe d'orientation de l'outil pour l'opération $Op_{m,n}$
$Axe_{Zone_i,1}$	Axe principal d'orientation de l'outil pour usiner la $Zone_i$.
$Axe_{Zone_i,2}$	Axe secondaire d'orientation possible de l'outil pour usiner la $Zone_i$.
$Axe_{Op_{m,n}}$	Axe d'orientation de l'opération $Op_{m,n}$
Cct_m	Coût carbure de la gamme m
Cct_{out_k}	Coût par arrête de l'outil k de la base de données outils
$Ccto_{n,m}$	Coût unitaire d'une plaquette de l'outil $Outil_{n,m}$.
$Cctref$	Coût carbure au pire des cas
$Cctnorm_m$	Coût carbure normalisé de la gamme m
$Cy_{p,n,m}$	Cycle de l'opération n de la gamme m .
Cy_{out_k}	Cycle d'usinage de l'outil k de la base de données outils.
D_{out_k}	Diamètre de l'outil k de la base de données outils.

$D_{outil_{n,m}}$	Diamètre de l'outil utilisé pour l'opération n de la gamme m .
$DDV_{outil_{n,m,p}}$	Durée de vie de l'outil $Outil_{n,m}$ pour le cycle $Cy_{p,n,m}$.
DDV_{out_k}	Durée de vie de l'outil k de la base de données outil.
$Defaut(Zone_i)$	Défaut de forme maximale admissible sur la $Zone_i$
$f_{m,n}$	Flexion induite sur l'outil pour l'opération n de la gamme m .
$Fc_{m,n}$	Effort de coupe lors d'une opération n de la gamme m .
$Fz_{m,n}$	Avance à la dent pour l'opération n de la gamme m .
$Fz_{out_k}^{min}$	Avance à la dent minimale de l'outil k de la base de données outils
$Fz_{out_{m,n}}^{min}$	Avance à la dent minimal de l' $Outil_{m,n}$
$Fz_{out_k}^{max}$	Avance à la dent maximale de l'outil k de la base de données outils
$Fz_{out_{m,n}}^{max}$	Avance à la dent maximale de l' $Outil_{m,n}$
G_m	Gamme d'usinage m
$\overline{h_{m,n}}$	Epaisseur moyenne du copeau à l'opération $Op_{m,n}$
$H_{m,n}$	Hauteur à usiner pour l'opération $Op_{m,n}$.
$\overline{H}_{Zone_i,1}$	Hauteur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,1}$.
$\overline{H}_{Zone_i,2}$	Hauteur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,2}$
$I_{outil_{n,m}}$	Moment quadratique de l'outil utilisé pour l'opération n de la gamme m .
$Indicateur_i$	Indicateur de performance élémentaire i
$IRop_{m,n}$	Indice de risque de l'opération n pour la gamme m .
IRg_m	Indice de risque d'une gamme m .
Kc	Force de coupe spécifique du matériau usiné.
$L_{unit\ m,n}$	Longueur du trajet élémentaire de l'opération élémentaire n de la gamme m .
$L_{outil_{n,m}}$	Longueur de l'outil utilisé pour l'opération n de la gamme m .
$la_{m,n}$	Largeur à usiner pour l'opération $Op_{m,n}$.
$\overline{la}_{Zone_i,1}$	Largeur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,1}$
$\overline{la}_{Zone_i,2}$	Largeur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,2}$

$\overline{long}_{Zone_i,1}$	Longueur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,1}$
$\overline{long}_{Zone_i,2}$	Longueur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,2}$
L_{out_k}	Longueur de l'outil k de la base de données outils
$L_{outil_{min}}(Zone_i)$	Longueur minimale de l'outil utilisable pour la $Zone_i$
M_α	Matrice de changement d'angle entre deux axes
M_{acc}	Matrice de changement d'accessoire pour le passage d'un axe à un autre
MCP_m	Macro-indicateur de performance de la gamme m
$N_{m,n}$	Vitesse de rotation de broche pour l'opération $Op_{m,n}$
$Nb_{indicateur}$	Nombre total d'indicateurs de performance
Nb_{it}	Nombre d'itérations maximal de l'algorithme génétique
$Nb_{max Op GE}$	Nombre maximal d'opérations comprises dans une gamme enveloppe
$Nb_{meilleurs}$	Nombre de meilleurs individus conservés dans une génération
$Nb_{out_k}^{pla}$	Nombre de plaquettes de l'outil k de la base de données outils
Nb_{init}^{pop}	Taille de la population initiale
Nb_{outils}	Nombre d'outils que contient la base de données
Nb_{Sol}	Nombre de solutions présentées par l'algorithme.
Nb_{Zones}	Nombre de zones à usiner sur la pièce.
$Nb_{po_{n,m}}$	Nombre de plaquettes de l'outil utilisées pour l'opération élémentaire n de la gamme m .
Nb_{gammes}	Nombre de gammes dans l'instance du problème
Nb_{op_m}	Nombre d'opérations de la gamme m .
$Npax_{m,n}$	Nombre de fois où l'outil se déplacement axialement pour l'opération élémentaire n de la gamme m .
$Nprad_{m,n}$	Nombre de fois où l'outil se déplacement radialement pour l'opération élémentaire n de la gamme m .
$Op_{m,n}$	Opération élémentaire n de la gamme m .
Out_k	$k^{ième}$ outil de la base de données outils

$Outil_{m,n}$	Outil utilisé pour l'opération élémentaire n de la gamme m .
p_i	Poids d'importance associé à $Indicateur_i$
$P_{tournoi}$	Pourcentage d'individus gardés après la sélection par tournoi
P_c	Probabilité de croisement de l'algorithme génétique
P_{init}^{seq}	Pourcentage de changement de séquençement dans la population initiale
P_m	Probabilité de mutation globale
$P_{\bar{m}}$	Probabilité de ne pas muter
P_{ms}	Probabilité de mutation par séquençement
P_{mGE}	Probabilité de mutation par zone
P_{mo}	Probabilité de mutation d'outil
P_i	Probabilité de muter d'un individu i
P_{Tcho}	Poids décisionnel du Temps de changements d'orientation
P_{Tcha}	Poids décisionnel du temps de changement d'accessoire
P_{Tcht}	Poids décisionnel du temps de changement d'outils
P_{Tcp}	Poids décisionnel du temps de changement de plaquettes
P_{Tc}	Poids décisionnel du temps d'usinage
P_{Cct}	Poids décisionnel du coût carbure
P_{Eff}	Poids décisionnel de l'efficacité
$R_{seuil\ n,m}$	Risque maximal admissible de l'opération n pour la gamme m .
R_{Cout_k}	rayon de bec de l'outil k de la base de données outils
$R_{conv_{min}(Zone_i)}$	Rayon concave minimum pour la $Zone_i$
$R_{ressaut_{n,m}}$	Ressaut maximal admissible pour l'opération n pour la gamme m .
$R_{ressaut}(Zone_i)$,	Ressaut maximal admissible entre passe sur la $Zone_i$
$ReTech_{Zone_i}$	Ensemble des autres zones qui peuvent être usinées de manière similaire à la $Zone_i$
$R_{op_{n,m}}$	Risque de l'opération n pour la gamme m .
$R_{outil_{max}(Zone_i)}$	Rayon outil maximal utilisable pour la $Zone_i$

$Tc_{m,n}$	Temps d'usinage de l'opération élémentaire n de la gamme m .
Tc_m	Temps d'usinage de la gamme.
$Tc'_{i,j,k}$	Temps de cycle de l'opération élémentaire k de la gamme enveloppe j pour la zone i
$Tcref$	Temps d'usinage au pire des cas
$Tcnorm_m$	Temps d'usinage normalisé de la gamme m
$Tcha_{tot m}$	Temps de changement d'accessoire de la gamme m .
$Tcha_{unit}$	Temps unitaire de changement d'accessoire.
$Tcharef$	Temps de changement d'accessoires au pire des cas
$Tchanorm_m$	Temps de changement d'accessoires normalisé de la gamme m
$Tcho_{tot m}$	Temps total dû aux changements d'orientation d'une gamme m .
$Tcho_{unit \alpha}$	Vecteur du temps de changement d'orientation outil unitaire en fonction de l'angle α .
$Tchomax$	Temps de changement d'orientation le plus élevé dans la base de données outils
$Tchoref$	Temps de changement d'orientation au pire des cas
$Tchonorm_m$	Temps de changement d'orientation normalisé de la gamme m
$Tcht_{tot m}$	Temps de changement d'outil de la gamme .
$Tcht_{unit}$	Temps unitaire de changement d'outil.
$Tchtref$	Temps de changement d'outils au pire des cas
$Tchtnorm_m$	Temps de changement d'outils normalisé de la gamme m
Tcp_{unit}	Temps de changement unitaire de plaquette.
$Tcp_{m,n}$	Temps de changement de plaquettes pour l'opération n de la gamme m .
Tcp_m	Temps de changement de plaquettes pour la gamme m .
$Tcpref$	Temps de changement de plaquettes au pire des cas
$Tcpnorm_m$	Temps de changement de plaquettes normalisé de la gamme m
$Top_{m,n}$	Type de l'opération $Op_{m,n}$.
Top_{out_k}	Ensemble des types d'opération pour lesquels l'outil k de la base de données outils peut être utilisé. Les types d'opération sont : <i>Ebauche, Reprise, Demi-finition, Finition, Super finition</i>

$Vc_{m,n}$	Vitesse de coupe pour l'opération $Op_{m,n}$.
Vc_{out_k}	Vitesse de coupe maximale de l'outil k de la base de données outils.
$Ve_{rad}(Zone_i)$	Variation d'engagement radial pour la $Zone_i$
$Vect_{\alpha,n}$	Vecteur de changement d'orientation pour l'opération n .
$Vf_{m,n}$	Vitesse d'avance de l'outil pour l'opération élémentaire n de la gamme m
X_{Zone_i}	la dimension englobante de la $Zone_i$ suivant l'axe X du repère pièce
$Xacc_{n,\alpha}$	Variable représentant un changement d'accessoire pour l'opération n
$Xacc_{n,m}$	Variable représentant un changement d'outil entre l'opération élémentaire n et l'opération élémentaire $n - 1$ de la gamme m
Y_{Zone_i}	Dimension englobante de la $Zone_i$ suivant l'axe Y du repère pièce
Z_{out_k}	Nombre de dents de l'outil k de la base de données outils
$Z_{out_{n,m}}$	Nombre de dents de l'outil utilisé pour l'opération n de la gamme m
Z_{Zone_i}	Dimension englobante de la $Zone_i$ suivant l'axe Z du repère pièce
$Zone_i$	$i^{ème}$ zone de la pièce à usiner
$Zone_{op_{m,n}}$	Zone de la pièce usinée par l'opération $Op_{m,n}$

Chapitre 1 : Problématique Industrielle

1. Contexte et problématique industrielle

Actuellement, le marché aéronautique est en plein essor, et les prévisions font état d'un trafic aérien en augmentation, qui devrait continuer à doubler en 15 ans, si nous suivons le revenu kilomètres-passagers (RPK) (Figure 1 à gauche). Cette augmentation engendre une augmentation du nombre d'avions commercialisés. Ainsi, sur la figure de droite, Airbus estime à plus de 30 000, le nombre de nouveaux avions à produire, d'ici 2033. Pour faire face à cette augmentation, les avionneurs mondiaux se doivent d'augmenter leur cadence de production et par conséquent celle de leurs sous-traitants. Dans le cas d'un aéronef comme l'Airbus A350, il est question d'une cadence de 10 avions par mois d'ici à 2018 tandis que pour l'Airbus A320, c'est une cadence augmentée de 42.5% d'ici 2019 qui est visée. L'augmentation du besoin offre de nouvelles opportunités pour les entreprises sous-traitantes, pour péreniser leur activité avec des produits à forte valeur ajoutée. Mais, actuellement, le marché aéronautique est devenu un marché très concurrentiel, où les marges se réduisent et, qui attire des concurrents potentiels de plus en plus nombreux.

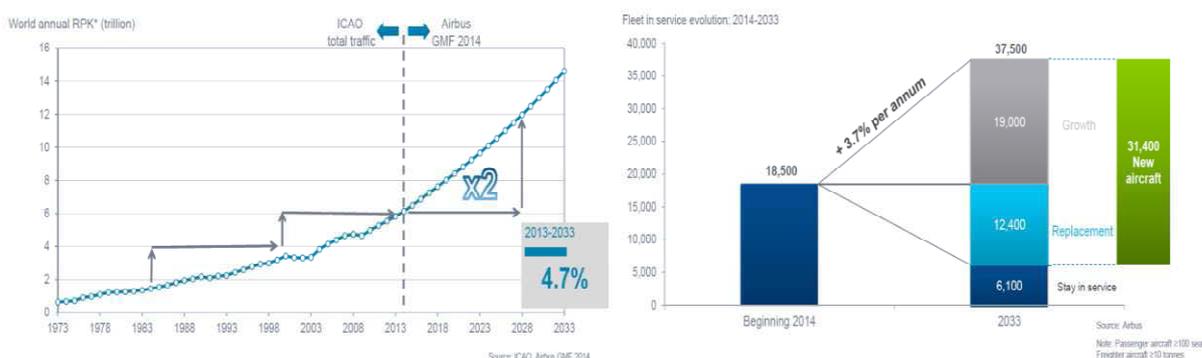


Figure 1 : Augmentation prévisionnelle du nombre de passagers aériens (Airbus, 2014)

Ces augmentations de cadence ont des répercussions sur la totalité de la chaîne de logistique et notamment sur la fabrication de l'ensemble des pièces d'avion.

Les pièces de structure de l'avion obtenues par forgeage ou laminage, sont aussi impactées. Ces pièces jouent un rôle critique dans l'avion, car elles participent à la tenue mécanique de l'avion. Les sollicitations subies par l'avion imposent l'emploi de matériaux de hautes caractéristiques, utilisés en limites de performance pour limiter les poids. Le processus d'élaboration suit une gamme de fabrication complexe qui comprend :

- une phase d'élaboration de l'alliage en phase liquide, par élaboration sous vide et refusion ;
- une phase de forgeage ou de matriçage pour mettre en forme la pièce à des dimensions proches de la géométrie finale tout en contrôlant le fibrage du matériau et donc sa tenue mécanique ;
- une phase d'usinage (ébauche et finition) pour atteindre la géométrie finale requise.

Ce processus est particulièrement long et complexe. De plus, il impose un contrôle qualité très serré pour atteindre le niveau d'exigence requis. La production de ces pièces est donc coûteuse. Pour rester compétitif, il est nécessaire de maîtriser les coûts sur tout le processus et en particulier de contrôler à chaque étape le volume de matériau nécessaire, car le ratio « buy to fly » reste important.

Ces pièces subissent aussi une évolution forte au niveau du matériau utilisé. Généralement, elles sont fabriquées en alliages métalliques comme les alliages d'aluminium, les aciers ou plus récemment les alliages de titane ou de nickel. La figure 2 illustre l'augmentation de la part de nouveaux matériaux pour les deux nouveaux avions qui deviendront les fers de lance du transport aérien et souligne ainsi l'importance prise par le titane.

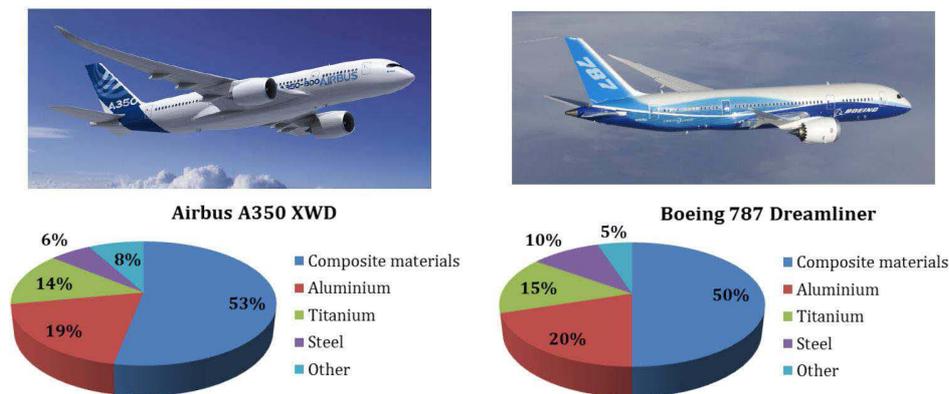


Figure 2 : Part des divers matériaux composant un aéronef (Airbus, 2014; Boeing, 2006)

Le titane est appelé à se développer dans les prochaines générations d'aéronef. Traditionnellement, cet alliage est utilisé car il présente un rapport résistance / poids particulièrement intéressant et un excellent comportement à haute température. Mais aujourd'hui son emploi est aussi renforcé du fait de ses qualités de résistance à la corrosion et de la compatibilité de son comportement mécanique avec les matériaux composites de plus en plus utilisés dans les avions modernes.

Leur industrialisation est particulièrement complexe, car ces matériaux présentent de hauts niveaux de résistance mécanique, notamment à chaud, qui les rendent difficilement usinables. Ainsi, les sous-traitants de l'aéronautique doivent faire face à une exigence très forte, qui est d'accompagner la montée en cadence des nouveaux programmes et donc de gagner en productivité en usinant des matériaux peu connus ou particulièrement difficiles à travailler. Les sous-traitants ont alors l'obligation d'être rapidement au plus haut niveau de performance, tout en ayant peu d'expérience sur l'usinage de ce type de matériau.

Pour obtenir rapidement des gains de productivité, les entreprises doivent maîtriser le processus complet de mise en œuvre de ce type de matériau. La question de la productivité de l'usinage devient alors critique et il est ainsi pertinent de reposer le problème de l'usinage de ce type de pièce, pour proposer une nouvelle voie d'optimisation des gammes d'usinage. L'optimisation doit conduire à des processus plus rapides et plus économiques, tout en respectant les exigences de qualité de l'aéronautique.

C'est pourquoi, dans le cadre de la fabrication de pièces de structure en alliage de titane ou en acier, obtenues par forgeage ou matriçage, spécifiquement étudiées dans ce mémoire, notre objectif est de diminuer le temps de fabrication réel de ces pièces :

- en proposant des gammes d'usinage innovantes pour gagner en productivité et sortir d'une zone de sécurité trop conservatrice ;
- tout en contrôlant les risques liés à l'usinage de ces nouveaux matériaux dans un contexte de forte productivité et de haute valeur ajoutée ;
- en tenant compte d'un environnement de fabrication contraint.

Une gamme d'usinage décrit un processus d'usinage. Elle est la suite ordonnée d'un ensemble d'opérations d'usinage à appliquer sur la pièce pour atteindre l'état géométrique conforme aux spécifications. Pour décrire une opération d'usinage, il est nécessaire de définir l'outil, ses conditions de coupe, ainsi que la stratégie de mise en œuvre à lui appliquer. L'établissement de la gamme d'usinage d'une pièce de structure aéronautique est alors particulièrement long du fait de la complexité de la pièce et de la recherche de performance attendue. Ainsi par exemple, un train d'atterrissage d'avion long-courrier est un assemblage de pièces de taille importante, massives, réalisées dans des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques. De plus les principaux composants d'un train d'atterrissage peuvent avoir des géométries complexes. L'interaction de toutes ces caractéristiques imposent de passer plusieurs dizaines voire centaines d'heures d'usinage pour la fabrication d'un train.

Lors de la création d'une gamme d'usinage, le nombre de paramètres à définir ainsi que la complexité de leur influence sur les performances globales de la gamme de fabrication font que le travail d'optimisation reste difficilement appréhendable dans sa globalité par l'esprit humain. Le méthodiste procède souvent par adaptation du savoir-faire existant, par itération et simulation, de manière à minimiser le niveau de risque. Cette méthode rend le travail long et coûteux, sans qu'il soit possible de garantir le respect de toutes les contraintes. Ainsi la gamme de fabrication proposée n'est pas forcément optimale dans son ensemble, même si la personne atteint une marge de progrès intéressante sur les indicateurs. De plus, le coût d'élaboration de la gamme est prohibitif, ce qui n'invite pas à la faire évoluer tout au long de la fabrication de la pièce. La gamme figée engendre, ainsi, une perte de productivité continue du fait des gains en performance des concurrents. Malheureusement, les attentes des avionneurs ne permettent plus de figer les gammes d'usinage.

Pour une pièce, il est donc aujourd'hui nécessaire de procéder à une optimisation du processus d'usinage, en prenant en compte toutes ces caractéristiques pour atteindre le niveau économique de productivité attendu. L'élaboration d'une gamme consiste à :

- Pour chaque zone usinée de la pièce :
Définir l'ensemble des opérations d'usinage.

Pour chacune de ces opérations, déterminer l'outil le plus performant et optimiser ces conditions de coupe (profondeur de passe axiale et radiale, avance, vitesse de coupe) et la stratégie d'usinage (ou cycle d'usinage, contenant l'ensemble des données technologiques nécessaires au calcul du trajet d'usinage en complément des conditions de coupe) ;

- Séquencer l'ensemble des opérations.

Classiquement, l'optimisation de la gamme doit, d'une part, nécessairement respecter le niveau de conformité des pièces fabriquées. D'autre part, elle a pour but de maximiser (ou minimiser) différents critères liés à la productivité et au coût de ces pièces. Ces critères ne se résument pas uniquement au temps de coupe et au coût horaire machine, du fait de la complexité des pièces et du processus. Ils seront détaillés dans la suite du mémoire.

L'optimisation d'une gamme est aussi un facteur de risque. En effet, elle est le résultat d'un processus d'optimisation basé sur des modèles relativement simplifiés des comportements mécaniques liés à la coupe du matériau. Selon ses modèles et son expérience, le methodiste conduit des choix au regard des gains en performance attendus. Mais la mise en œuvre peut aussi aboutir à des échecs ou à une augmentation du taux de risque et de stress dans l'atelier. En effet, le processus d'optimisation est conduit pour un domaine d'équipements et un ensemble de personnels figés. Pour que la performance soit obtenue, il est nécessaire que les conditions optimisées soient compatibles à la fois avec les machines mais aussi avec l'environnement de l'atelier. Par exemple, l'augmentation des conditions de coupe peut engendrer des usures plus rapides, des bruits, des vibrations ou des ruptures aléatoires, dont l'impact n'annule pas le gain de performance attendu mais dégrade l'environnement de l'atelier et la confiance de l'opérateur. Il s'en suit une recherche par l'opérateur d'une situation plus stable et donc de la perte de la performance attendue. Pour apporter un gain, l'optimisation doit proposer des conditions admissibles par l'atelier tant au niveau des conditions de mises en œuvre que des compétences à solliciter.

2. Créer une gamme par une méthode d'ingénierie classique

Afin de pouvoir justifier de la pertinence de l'approche proposée dans ces travaux, un cas industriel de référence a été traité au préalable. Après une présentation du cas d'application, l'objectif est d'exposer les méthodes classiquement utilisées en ingénierie pour l'optimisation d'une fabrication par processus usinant et les limites associées à leur utilisation.

2.1 Présentation du cas d'application

L'étude concerne une partie de l'atelier d'usinage d'Aubert et Duval dédié à l'usinage de pièces en alliages de titane de grandes dimensions. Le parc machine comprend en particulier une fraiseuse à 3 axes pouvant être équipée d'accessoires permettant un usinage à 4 axes positionnés. La broche de la machine a les caractéristiques suivantes :

- Puissance maximale : 100 kW

- Fréquence de rotation maximale : 1500 tr/min
- Couple maximal : 1100 Nm

La machine peut être équipée d'accessoires comme des têtes à renvoi d'angle pour augmenter l'accessibilité des outils. Du fait de la dimension de la machine et de l'investissement associé, le processus d'optimisation de la gamme n'envisage pas de changer de machine d'usinage, ni de posages.

Dans le cadre du processus d'industrialisation, le technicien méthodiste élabore la gamme d'usinage, les documents de fabrication et les programmes d'usinage associés. Un régleur assure le réglage de la machine et le lancement de la première pièce. Par la suite, un opérateur expérimenté conduit la machine. En particulier, il intervient lors des changements d'accessoires et des changements d'outils en identifiant les usures excessives et les éventuelles ruptures d'outil, en changeant les outils et en les mesurant. L'opérateur assure ainsi la conduite complète de la machine en situation de production pour des séries renouvelables de quelques pièces.

Pour élaborer sa gamme, le méthodiste s'appuie sur les données issues de la pièce à fabriquer et sur les ressources de l'atelier d'usinage. Le processus d'élaboration de la gamme se déroule comme suit :

- Analyse du modèle géométrique de la pièce et des plans contractuels pour identifier les zones à usiner et leurs particularités ;
 - choix de la machine d'usinage à utiliser ;
 - Choix des posages et pré-conception des montages d'usinage ;
 - pour chaque zone à usiner, choix des outils de coupe à partir de la base d'outils connus dans l'atelier ou sur des catalogues de fournisseurs le cas échéant ;
 - reprise des conditions de coupe si les outils sont connus ou calcul des conditions de coupe à partir de catalogues ou de conseils de fournisseur le cas échéant ;
 - programmation FAO des opérations ;
 - simulation et validation des trajectoires ;
 - préparation des programmes d'usinage ;
 - réalisation d'une première pièce.

Il faut remarquer que généralement, les choix effectués aux différentes étapes ne sont pas remis en cause ultérieurement pour gagner en efficacité. De plus, les conditions d'usinage sont choisies conformément à l'usage dans l'atelier.

Le cas industriel d'application est une pièce de structure aéronautique de grande dimension en alliage réfractaire, composant d'un train d'atterrissage. La Figure 3 présente la géométrie générale de la pièce considérée. Deux zones distinctes sont définies :

- Le fût, qui correspond à la partie cylindrique (en rouge sur la Figure 3)
- La tête, qui correspond à la partie massive à l'extrémité.

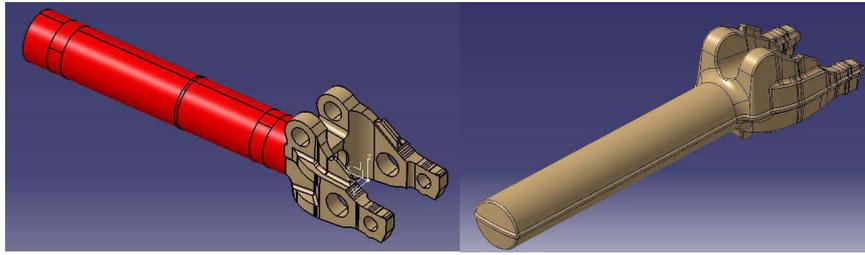


Figure 3 : Géométrie de la pièce d'étude, à gauche : forme finale, à droite : forme brute

L'usinage du fût se fait au moyen d'un tour à commande numérique à 2 axes et l'usinage de la tête se fait au moyen d'une fraiseuse à 3 axes.

Le processus complet de fabrication d'une pièce comprend les opérations suivantes :

- Elaboration du lopin ;
- Matriçage ;
- Traitements thermiques ;
- Usinage du profil ébauche ;
- Traitements thermiques si nécessaires ;
- Usinage du profil semi-fini à livrer au client;
- Contrôle métallurgique et dimensionnel ;
- Usinage du profil fini chez le client ;
- Contrôle dimensionnel.

Les travaux présentés ci-après concernent les opérations d'usinage après matriçage. Le matriçage permet d'obtenir la forme brute pour l'usinage (figure 3, à droite). L'état de la pièce considéré ici comme état final est un état intermédiaire par rapport au profil fini usiné par le client. L'objectif de cet état intermédiaire est d'enlever le plus de matière possible après matriçage en s'approchant des formes finies, pour que le client réalise uniquement les opérations de finition.

L'objectif de l'optimisation est de partir d'un système {Pièce ; Matériau ; Machine} pour arriver au système {Outils ; Conditions de coupe ; trajectoires ; Temps de fabrication ; Coût de fabrication} permettant d'usiner au mieux la géométrie considérée. Le système de départ s'explique ainsi :

- Pièce : Géométrie et tolérancement définis en accord avec le client.

- Matériau : Nuance de matière composant la pièce à fabriquer, généralement définie par - le client.
- Machine : il est considéré pour le reste des travaux que l'atelier fonctionne avec un parc machine fini. Par conséquent, la machine associée à une étape de fabrication est fixée au préalable par le bureau des méthodes de l'atelier.

2.2 Méthodologie utilisée

Dans un premier temps, le méthodiste définit une première gamme de fabrication à partir des ressources disponibles et des contraintes associées (pièce, matériau, machine, outils de coupe).

Une gamme d'usinage est une liste ordonnée d'opérations d'usinage élémentaires, décrivant les ressources, les outils coupant, les conditions de coupe. Cette gamme d'usinage est évaluée en estimant le temps d'usinage et le coût de production de la pièce.

Pour cela, (Martin, 2002) définit 4 étapes :

- Choisir les ressources de production
- Déterminer le processus d'usinage
- Choisir les outils et les conditions de coupe
- Calculer et simuler les trajectoires de manière à évaluer le temps et donc en déduire le coût.

Cette démarche est fortement influencée par les compétences et le savoir-faire du méthodiste qui détermine la gamme et l'historique des pièces de fabrication.

Dans le contexte de recherche de gisement de productivité, cette première gamme doit être retravaillée. Afin d'optimiser la fabrication actuelle de la pièce considérée, plusieurs étapes sont nécessaires pour bien situer les gisements de performance ainsi que la forme sous laquelle cette performance peut être récupérée. Généralement, l'optimisation se focalise sur les outils de coupe pour en augmenter la performance. On cherche des outils ayant si possible une vitesse de coupe ou une avance à la dent plus importante pour ne pas modifier le programme d'usinage. Dans un second temps, on envisage des modifications de programmes au niveau des profondeurs de passe axiales et radiales. La remise en cause de la gamme complète n'est pas possible, car trop coûteuse.

Analyse de la gamme existante.

Dans un premier temps, un audit de la fabrication actuelle est mené de manière à mieux comprendre la philosophie de la fabrication. Cet état des lieux permet de définir les contraintes liées à la fabrication de la pièce. Voici celles qui ont été définies :

- Définition du nombre de posage en fonction de la géométrie de la pièce et de l'accessibilité des outils. Ici, un usinage en deux posages différents : Du fait des dimensions de la pièce au regard des

longueurs outils utilisables de manière réaliste, l'opération du fraisage de la tête est faite en deux posages différents de la pièce sur le même montage, appelé usinage à la retourne.

- Prise en compte du tolérancement géométrique : Ces informations sont à prendre en considération de manière à éviter les problèmes de sous – qualité ou de sur – qualité qui rendraient la pièce non conforme ou trop chère à fabriquer.

Analyse des outils utilisés.

Dans un second temps, nous menons une analyse de la diversité des outils et de leur utilisation dans la gamme de manière à identifier les outils les plus utilisés ou ceux qui doivent être optimisés Par exemple, la Figure 4 présente toutes les opérations prévues initialement sur notre cas d'étude pour usiner la tête, les outils associés ainsi que le pourcentage du temps total simulé.

Numéro opération	Outil	% du temps / opé	% temps cumulé
Opération 1	Outil 1	6,0%	6%
Opération 2	Outil 2	3,5%	9%
Opération 3	Outil 3	4,3%	14%
Opération 4	Outil 2	7,5%	21%
Opération 5	Outil 4	7,6%	29%
Opération 6	Outil 5	2,2%	31%
Opération 7	Outil 3	4,8%	36%
Opération 8	Outil 2	0,5%	36%
Opération 9	Outil 1	5,9%	42%
Opération 10	Outil 1	5,7%	48%
Opération 11	Outil 2	9,4%	57%
Opération 12	Outil 4	5,6%	63%
Opération 13	Outil 6	3,6%	67%
Opération 14	Outil 1	2,8%	70%
Opération 15	Outil 2	5,4%	75%
Opération 16	Outil 7	1,0%	76%
Opération 17	Outil 8	5,0%	81%
Opération 18	Outil 9	0,4%	81%
Opération 19	Outil 10	0,3%	82%
Opération 20	Outil 11	1,8%	83%
Opération 21	Outil 2	2,5%	86%
Opération 22	Outil 2	2,5%	88%
Opération 23	Outil 8	7,9%	96%
Opération 24	Outil 12	1,1%	97%
Opération 25	Outil 13	1,4%	99%
Opération 26	Outil 14	0,7%	99%
Opération 27	Outil 15	0,5%	100%

Figure 4 : Extrait de la gamme d'usinage initiale de la pièce d'étude

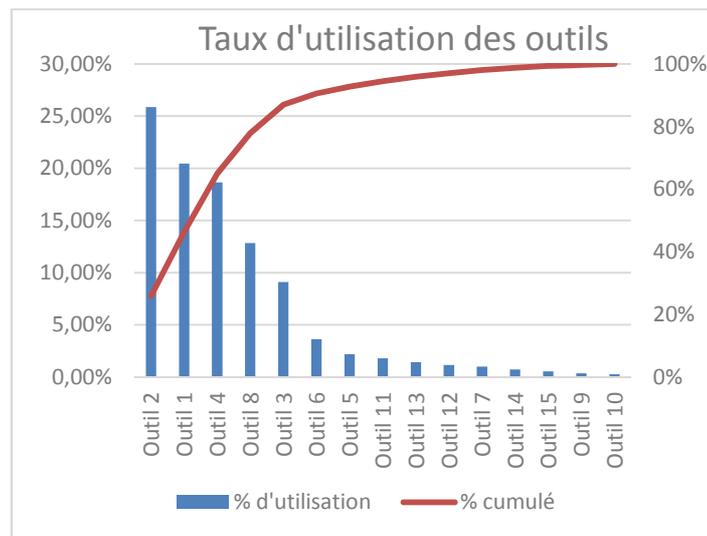


Figure 5 : diagramme de Pareto de l'utilisation des outils de la gamme initiale

De ce tableau, nous pouvons extraire les taux d'utilisation de chaque outil utilisé, représentés sur la Figure 5. Le taux d'utilisation cumulé, matérialisé par la courbe rouge montre que pour optimiser rapidement le temps de coupe de l'usinage, l'étude doit se concentrer sur les outils 1, 2, 3, 4 et 8 qui représentent 87 % du temps total de fabrication. Par la suite les outils 1 et 3 sont regroupés, ainsi que les outils 2 et 4, car ils disposent d'une géométrie de partie coupante identique. Seule la longueur diffère. L'optimisation se concentre donc sur les opérations associées à ces outils.

Une fois ces informations obtenues, il est possible de débiter une phase de recherche dans le but de remplacer ces outils, que ce soit en lieu et place par des outils plus performants, ou bien en cherchant des outils de géométrie différente nécessitant une reprogrammation des trajectoires.

Recherche de nouveaux outils à géométrie identique

Un essai dit « en lieu et place » correspond au changement de la partie coupante d'un outil par une partie coupante dotée des mêmes caractéristiques géométriques suivantes :

- diamètre de coupe identique ;
- géométrie des plaquettes identique (principalement en ce qui concerne les rayons de coin) ;
- longueur de la partie coupante ;
- système d'attachement identique.

Une géométrie identique entre deux parties coupantes (principalement le diamètre de coupe et la géométrie des plaquettes) est indispensable pour simplifier ou supprimer la reprogrammation des trajets d'usinage nécessaire au test d'un nouvel outil. La longueur de la partie coupante influe sur la longueur totale de l'outil en fonctionnement. Ainsi si la différence reste faible (< 5mm), nous pouvons considérer qu'aucune vérification des possibles collisions est nécessaire avant de pouvoir valider le protocole d'essais. La similitude du système d'attachement de l'outil permet d'assurer la compatibilité de l'outil à tester avec les porte-outils déjà en utilisation dans la fabrication, et donc de simplifier la mise en place des tests. Les essais en lieu et place sont très intéressants du point de vue de la facilité de mise en œuvre. En effet, ils n'impliquent pas de reprogrammation donc un gain de temps de préparation important ainsi qu'une absence d'investissements autre que du temps machine.

Recherche de nouveaux outils à nouvelle géométrie

Les essais nécessitant une reprogrammation de la pièce sont généralement menés suite à des réflexions visant à remplacer les outils les moins productifs et/ou les moins fiables par des outils plus performants et de géométrie différente. Dans notre cas, une étude de la géométrie de la pièce et des outils restants sur lesquels aucun travail d'optimisation n'avait été effectué ont permis de proposer un outil pouvant remplacer plusieurs références. Cet outil a permis d'en remplacer 5 autres et ainsi de simplifier grandement la gestion de la gamme et de diminuer les risques de confusion dans les outils, notamment entre les versions longues et courtes.

Génération d'une nouvelle gamme

Suite à ces divers essais, une nouvelle liste, comportant non plus 15 mais 12 outils, est proposée. Il est, alors, décidé de reprogrammer en intégralité l'usinage de la tête. Ce projet a pour but d'assurer la parfaite interaction entre les opérations qui n'avaient pas été reprogrammées initialement lors des essais de nouveaux outils et celles qui ont nécessité une reprogrammation. Suite à cette étape, une nouvelle gamme complète pour l'usinage de la tête a pu être proposée. La Figure 6 détaille la nouvelle gamme d'usinage, les outils associés ainsi que le pourcentage du temps total simulé que représente chaque opération. La Figure 7 montre les pourcentages d'utilisations des différents outils.

Numéro opération	Outil	% du temps / opé	% du temps cumulé
Opération 1	Outil 1.2	0,41%	0,41%
Opération 2	Outil 2.2	7,59%	8,00%
Opération 3	Outil 1.2	0,26%	8,26%
Opération 4	Outil 1.2	9,21%	17,47%
Opération 5	Outil 2.2	4,56%	22,04%
Opération 6	Outil 4.2	3,52%	25,55%
Opération 7	Outil 3.2	5,08%	30,63%
Opération 8	Outil 5	4,03%	34,66%
Opération 9	Outil 1.2	7,70%	42,36%
Opération 10	Outil 2.2	3,29%	45,65%
Opération 11	Outil 4.2	15,82%	61,47%
Opération 12	Outil 3.2	4,43%	65,90%
Opération 13	Outil 7	0,80%	66,70%
Opération 14	Outil 8	8,81%	75,51%
Opération 15	Outil 1.2	5,04%	80,55%
Opération 16	Outil 8	9,49%	90,04%
Opération 17	Outil 11	4,54%	94,58%
Opération 18	Outil 12	1,61%	96,19%
Opération 19	Outil 13	2,00%	98,19%
Opération 20	Outil 14	1,03%	99,23%
Opération 21	Outil 15	0,77%	100,00%

Figure 6 : Détail de la gamme d'usinage optimisée de la pièce d'étude.

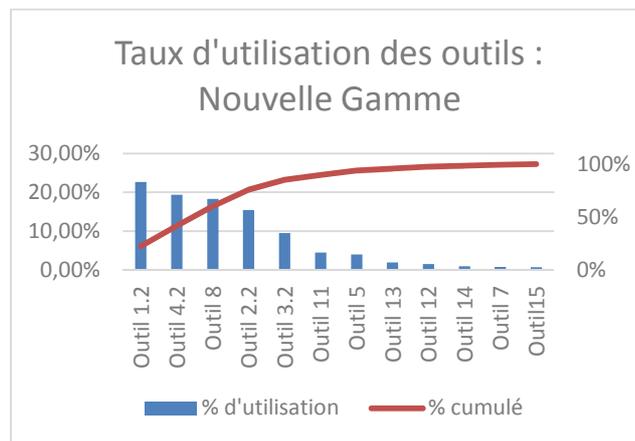


Figure 7 : Diagramme de Pareto d'utilisation des outils de la gamme optimisée.

Les diverses optimisations effectuées ont permis d'obtenir un gain de 30% du temps de fabrication mais aussi une simplification de la gamme, notamment par la diminution du nombre d'outils différents utilisés, ainsi que par l'utilisation d'outils coupants plus performants que ceux utilisés précédemment.

Analyse des temps à non-valeur ajoutée

La méthode SMED (Single Minute Exchange of Die, changement de fabrication en une minute) est une méthode d'amélioration continue utilisée pour l'analyse et la définition des temps de la fabrication pendant lesquels la machine ne produit pas de valeur sur la pièce. Cette méthode est appliquée sur notre cas de fabrication afin de déterminer la part d'importance de ces temps à non-valeur ajoutée ainsi que leur nature (Figure 8, Figure 9).

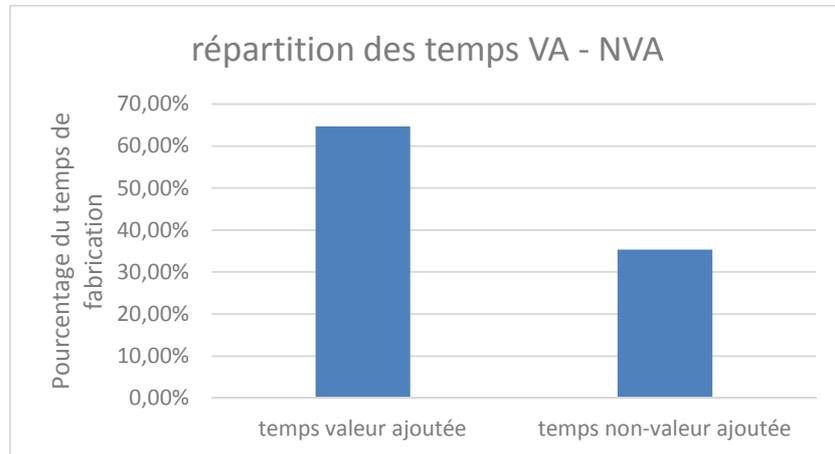


Figure 8 : Répartition des temps VA et NVA pour le cas d'application

La Figure 8 montre que sur le temps total de fabrication, près de 40% de ce temps n'apporte pas de valeur à la pièce.

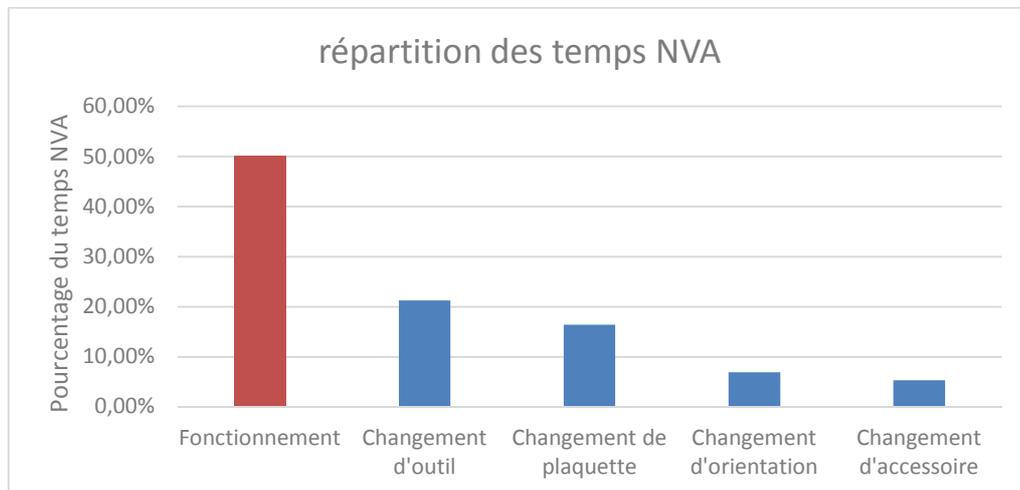


Figure 9 : Répartition des temps NVA liés au cas d'application

Plusieurs temps distincts ont pu être mis à jour grâce à cette méthode et leurs importances relatives mises en avant (Figure 9) :

- Les temps liés au fonctionnement de l'atelier. Ce sont les temps pris par les opérateurs pour les repas, les nettoyages de leur zone de travail nécessitant un arrêt machine ou encore les changements de postes et les passages de consignes entre opérateurs. Ces temps ne sont pas liés au fonctionnement d'une gamme d'usinage et ne peuvent donc pas être utilisés comme indicateur de performance ;

- Les temps liés aux changements d'outils : ces temps regroupent les temps nécessaires à la machine pour se déplacer jusqu'au point de changement d'outil, ainsi que le temps de changement d'outil en lui-même. Cette mesure permet d'établir une valeur de temps unitaire pour le changement d'un outil. Le temps de changement d'outil étant lié au fonctionnement d'une gamme, il est important de pouvoir le considérer lors de l'optimisation ;
- Les temps liés aux changements de plaquettes : lorsqu'un outil s'use et qu'une stratégie utilisant des outils frères n'est pas mise en place sur la fabrication, l'opérateur doit arrêter la machine pour préparer un outil avec des nouvelles arêtes de coupe. Le temps de changement de plaquettes étant lié au fonctionnement d'une gamme et des outils choisis, il est important de pouvoir le considérer lors de l'optimisation ;
- Les temps liés aux changements d'accessoires : Ces temps sont les temps nécessaires pour que la machine soit équipée d'un accessoire, comme une tête à renvoi d'angle offrant un ou deux axes de positionnement supplémentaire de l'outil. Ces temps sont à prendre en compte dans l'optimisation d'une gamme ;
- Les temps liés au changement d'orientation : Ces temps correspondent aux temps où la machine doit modifier l'orientation de l'axe outil pour pouvoir usiner la zone souhaitée lorsqu'elle est équipée d'un accessoire, une tête à renvoi d'angle par exemple. Ces temps sont donc décorrélés du temps de changement d'accessoires et sont à prendre en considération dans l'optimisation d'une gamme.

Ces temps représentent environ 20% du temps total de la fabrication. Par conséquent, ils doivent être considérés comme faisant partie intégrante du processus de génération et d'optimisation de gammes.

Les contraintes de délais lors de l'industrialisation d'une fabrication ou bien dictées par l'amélioration continue de la productivité posent une contrainte économique sur le temps dédié à l'optimisation du processus et donc sur la recherche de la solution optimale par les méthodes classiques. Pour le cas traité ici, les gains obtenus sur le temps d'usinage (30%) sont le résultat de plusieurs mois d'activité pour un méthodiste dédié quasi exclusivement à ce travail et partant d'une première solution existante. En analysant la fabrication depuis le début, il apparaît qu'il aura fallu produire plusieurs pièces pour diminuer sensiblement le temps d'usinage. Les cadences étant faibles en début de production, cela correspond à plusieurs années pour diminuer progressivement et stabiliser le temps de fabrication, compte tenu des flux de production.

Il faut remarquer, que la mise en place d'une nouvelle gamme de fabrication implique un changement important des habitudes des opérateurs et des méthodistes sur une fabrication donnée. Il se produit alors des retards qui ne permettent pas d'atteindre le niveau de productivité optimal dès la première pièce usinée. Plusieurs causes sont envisageables :

- Apprentissage de nouvelles habitudes lors des installations des outils et du passage de consignes.

- Ajustement arbitraire des conditions de coupe par les opérateurs, permettant de mieux appréhender les nouvelles conditions d'usinage.
- Ajustement des conditions de coupe, au vu de situations spécifiques non prises en compte par l'optimisation

Ainsi, le processus d'optimisation suppose plusieurs allers-retours entre les méthodes et la production.

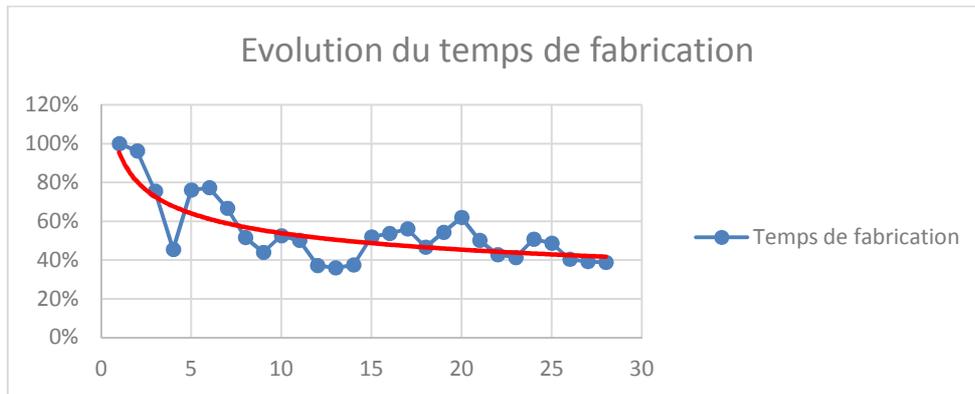


Figure 10 : Evolution du temps de fabrication de la pièce d'étude.

La courbe rouge de la Figure 10 donne la tendance à l'amélioration au fur et à mesure des itérations de fabrication, ainsi que l'asymptote atteignable. Elle illustre la montée en compétence de l'ensemble des acteurs intervenant sur la pièce, des méthodes à la production. Si une amélioration rapide est possible au début de l'industrialisation, il devient difficile de continuer l'optimisation avec une vitesse similaire. Si on souhaite effectuer un gain significatif, il est alors nécessaire de mettre en œuvre une nouvelle approche permettant la génération de gammes de fabrication optimisées au démarrage de la production de manière à pouvoir accélérer cette vitesse d'optimisation tout en proposant un optimum atteignable plus performant que ceux existants.

2.3 Limites de l'ingénierie classique

Il est d'importance de pouvoir mettre en perspective les résultats d'optimisation que nous venons de présenter avec les efforts consentis pour y arriver. Ainsi, le paragraphe suivant présente les diverses limites identifiées de la méthodologie d'ingénierie utilisée ci-avant.

Une des premières critiques que l'on peut formuler est le caractère chronophage de ces méthodes. Pour arriver à ces gains après optimisation, plusieurs mois de travail ont été nécessaires, mobilisant plusieurs collaborateurs au sein d'une même équipe ainsi que des compétences diverses. De plus, les divers tests nécessaires pour la sélection des outils coupants et la définition de conditions de coupe consomment un temps machine non négligeable qui ne peut être réellement dédié à de la production, du fait des essais de validation à réaliser sur le cas spécifique de la pièce à usiner en situation réelle. En effet, les spécificités des matériaux usinés et les niveaux de productivité attendus font qu'il n'est pas possible de se baser uniquement sur les données des fournisseurs des outils. Il est nécessaire de conduire des essais de type Couple-Outil-Matière qui n'aboutissent pas nécessairement. Ces essais doivent être reconduits pour chaque nouvel outil, pour chaque

nouvelle géométrie d'outil et pour chaque nouvelle nuance de matériau outil (AFNOR NF E 66-520, 1994). Ce constat induit plusieurs autres limites, la première d'entre elles étant le coût nécessaire à la mise en place de cette optimisation, qui augmente de façon exponentielle avec le niveau de performance demandé.

De fait, pour la même raison, seule une étroite partie du domaine des solutions possibles peut être explorée. Un processus usinant est un système éminemment complexe, de par le nombre de composants ainsi que par les interactions possibles entre ces composants. Ainsi, il n'y a qu'un faible niveau d'optimisation du système et il paraît difficile de l'augmenter dans un contexte de production sans pénaliser lourdement la productivité de l'atelier.

Un autre aspect non traité lors de l'utilisation de méthodes classiques est la modélisation du risque induit par l'utilisation de telle ou telle gamme d'usinage. En effet, une solution peut être très performante théoriquement, mais ne jamais atteindre la performance annoncée en réalité à cause des altérations du processus d'usinage. Ces altérations sont liées à la méconnaissance des valeurs optimales effectives des paramètres de fonctionnement de l'outil dans le matériau spécifiquement usiné ainsi qu'à l'absence d'anticipation correcte des interactions entre ces divers paramètres, via des modèles particuliers. Du fait de la modélisation incomplète ou imprécise du système global usinant, il est difficile d'appréhender la réaction du système aux variations des données d'entrée. Il devient ainsi difficile d'évaluer la pertinence et l'impact d'une nouvelle solution ou d'une nouvelle donnée, ce qui n'accélère pas la recherche et l'innovation pour l'amélioration de performances. Ceci peut engendrer un climat de méfiance quant à la modification d'un processus existant. Ainsi, la prise de risque dans la recherche de solutions est donc quasi-inexistante.

3. Evolution de la problématique et enjeux industriels

Au regard des prévisions sur l'augmentation de cadence de fabrication des avions ainsi que la part de plus en plus importante de matériaux difficiles à mettre en forme dans la composition d'un aéronef, les problématiques d'optimisation et de compétitivité deviennent critiques pour le processus d'usinage des pièces de structure matricées. L'analyse d'une méthode d'ingénierie usuelle montre qu'il est nécessaire de reposer la problématique d'élaboration et d'optimisation d'une gamme d'usinage.

Initialement, un processus d'obtention de pièces par usinage est considéré comme le résultat de la mise en œuvre d'une gamme d'usinage, qui regroupe les divers paramètres gérant les trajets des outils permettant d'usiner la géométrie voulue, dans le cadre de l'obtention d'une pièce, pour laquelle le comportement de la matière à l'usinage est spécifique. Ce comportement est formalisé dans le cadre de la coupe des métaux, qui consiste à définir à une échelle mésoscopique (de l'ordre du millimètre) les divers phénomènes thermomécaniques impliqués par le passage d'un outil de géométrie donnée dans la matière. Elle permet de comprendre, en particulier, les mécanismes d'usure des outils, cruciaux pour l'anticipation de leur durée de vie, et de déterminer des modèles d'efforts de coupe et de puissance, pour définir les conditions de coupe a priori optimales.

L'optimisation d'une gamme suppose de définir des critères de performance. Les critères usuels de performance d'un processus d'usinage sont la productivité (temps global d'usinage), le coût de fabrication ainsi que la qualité obtenue après fabrication (Taylor, 1907). La gamme optimale peut, ainsi, être considérée comme le meilleur compromis obtenu entre ces trois critères (Figure 11).

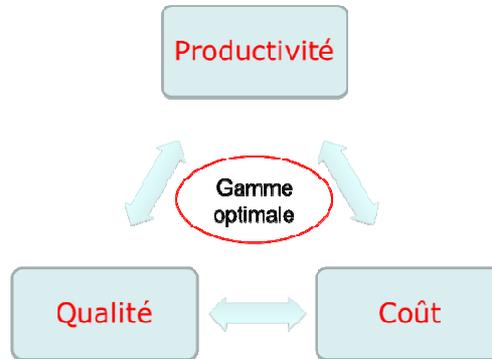


Figure 11 : Définition de la gamme optimale au regard des critères usuels de performance en usinage

L'exemple traité précédemment a permis de détailler les problématiques de compétitivité liées à la fabrication par enlèvement de copeaux et notamment la complexité et la multitude des interactions entre les divers paramètres influant sur la performance d'une gamme. Il n'est donc pas possible de procéder à l'optimisation d'une gamme en suivant la démarche usuelle proposée par la littérature.

En effet, si les paramètres d'entrée ou les paramètres calculés au cours du cheminement sont des paramètres considérés comme fixes, il apparaît que certains résultats finaux tels que les coûts et les temps liés à la fabrication ne sont que des estimations dont la précision est faible. Ainsi un écart peut donc être constaté sur une production réelle. Une distance plus ou moins importante peut ainsi apparaître entre l'attendu et le réalisé qui peut provenir d'une optimisation non robuste ou d'un processus de production non maîtrisé. Ceci implique de ne plus considérer le processus d'usinage comme l'interaction entre une stratégie d'usinage et des conditions de coupe définies par des modèles. En effet, les modèles ne sont pas assez précis et complets pour que les écarts de performance liés à la mise en œuvre réelle du processus soient minimisés ou même contrôlés.

Dans la suite de ces travaux, un processus d'usinage est considéré comme un système complexe intégrant, outre la stratégie d'usinage et la coupe des métaux, nécessaires à l'évaluation de la performance, des aspects liés à la prise de risques par rapport à l'introduction d'un nouvel outil ou bien par rapport au niveau de qualité atteint lors de la modification des conditions de coupe. Un processus d'usinage peut donc être considéré comme un système complexe dont la performance se décrit nécessairement par un jeu de critères quantitatifs et qualitatifs, conceptuellement différents et non plus comme une procédure purement quantitative. L'optimisation est par conséquent multicritère. La Figure 12 illustre l'ensemble des paramètres qu'il faut prendre en compte durant le processus d'optimisation global d'une fabrication. Les phénomènes de coupe et la stratégie d'usinage sont intégrés à un ensemble plus large qui comprend tous les phénomènes pouvant impacter les délais de fabrication, les coûts de fabrication ou bien augmenter ou réduire le niveau de risque pris durant l'usinage. Les indicateurs de performance doivent intégrer des aspects économiques, de

productivité, de qualité mais aussi de risque lié à l'introduction de modifications ou d'évolutions dans une nouvelle gamme, dans un environnement de production défini.

Un méthodiste expérimenté, avec une connaissance suffisante de l'atelier et de l'environnement de production, cible plus rapidement et plus efficacement les zones critiques de la pièce à fabriquer qu'un méthodiste inexpérimenté (Ihara & Ito, 1991). Or, le processus d'optimisation ne doit pas s'appuyer uniquement sur les compétences et le savoir-faire présents au sein du bureau des méthodes. En effet, ce savoir-faire permet d'assurer la fabrication des pièces par similitude mais tend à inhiber l'innovation dans la fabrication de nouvelles pièces, au profit de la sécurité. Ainsi, le processus d'optimisation doit permettre d'évaluer la performance d'un nombre significatif de gammes différentes construites à partir du savoir-faire du bureau des méthodes mais doit pouvoir générer de l'innovation en proposant des gammes que les méthodistes n'auraient pas intuitivement proposées.

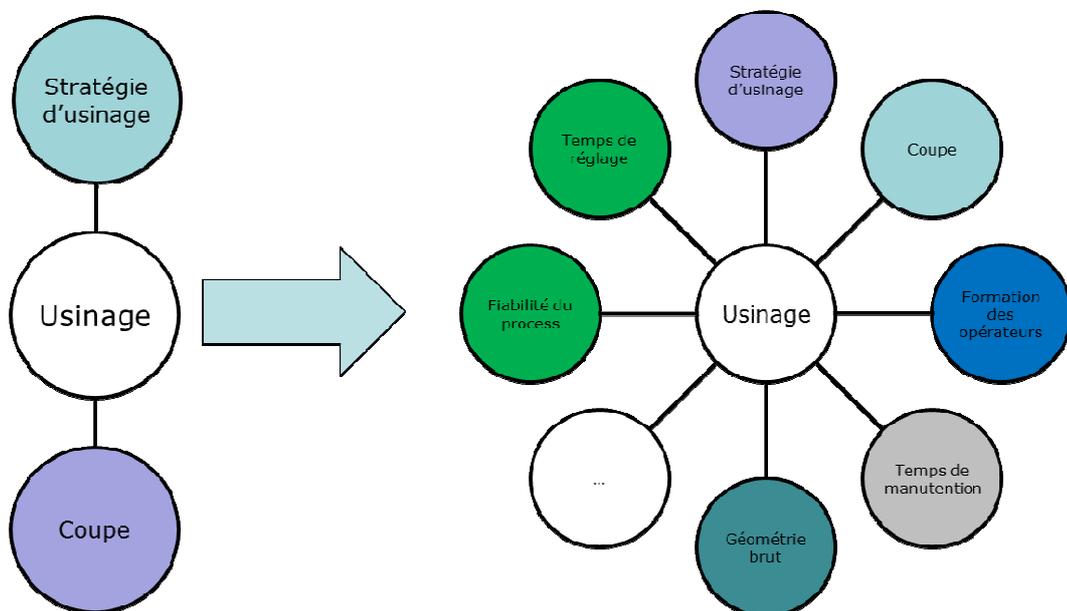


Figure 12 : Définition d'un processus usinant complexe

En conclusion, il existe un enjeu très important pour la performance globale d'un atelier de production par usinage dans la compréhension systémique d'une fabrication par enlèvement de copeaux. Cette compréhension permet une optimisation multicritère de la performance par la recherche de valeurs optimisées des paramètres opérationnels de processus usinant.

3.1 Objectifs de la thèse et verrous scientifiques.

La problématique principale de ces travaux de recherche porte sur la proposition d'un outil d'aide à la décision multicritère pour la génération automatique de gammes de fabrication afin d'accompagner le bureau des méthodes dans la phase de définition de la gamme. Cet outil devra proposer plusieurs gammes pertinentes par rapport au triptyque {Pièce, Matériau, Machine} et fournir des indicateurs de performance, intégrant des aspects liés à la prise de risques techniques, et de nouveaux critères de comparaison, en plus des indicateurs classiques liés aux coûts par opération et à la durée globale de l'opération élémentaire. Le choix de la gamme finale reste à la discrétion du préparateur de gamme.

Aujourd'hui, il n'existe pas de solutions industrielles permettant de répondre au besoin d'optimisation prenant en compte les aspects évoqués précédemment. Les outils informatiques de préparation sont seulement axés sur la description des opérations d'usinage et sur le calcul des trajets d'usinage pour programmer les machines à commande numérique. Le coût de cette activité est trop important pour qu'elle participe à l'élaboration de la gamme à travers un schéma de simulation de différents scénarii et d'estimation de la performance.

La littérature, comme nous le verrons dans l'état de l'art du chapitre suivant, a fourni un certain nombre de modèles théoriques pour appréhender ce problème. Néanmoins, ces modèles sont macroscopiques et imprécis car ils sont génériques ou bien trop rigides et dédiés à une application. Enfin ils reposent sur des informations souvent biaisées ou imprécises. Ces modèles se sont généralement orientés sur :

- la reconnaissance d'entités géométriques et l'application d'un processus d'usinage donné, soit une suite d'opération d'usinage figées et préétablies pour l'entité visée ;
- les moteurs d'intelligence artificielle ou de logique floue pour prendre des décisions ou rechercher des solutions optimales.

L'état de l'art du chapitre suivant montre que les solutions développées en laboratoire ou industriellement dans les années 1990-2000, n'ont pas connu un succès conséquent. En effet, elles se sont révélées lourdes à paramétrer, rigides et peu adaptables. Un conflit récurrent apparaissait entre le savoir-faire de l'entreprise et les résultats de la solution informatique. Une autre voie basée sur l'apprentissage de l'existant a aussi été abandonnée du fait de sa lourdeur d'apprentissage et de sa faible adaptation à l'évolution ou à l'innovation.

Aujourd'hui le problème reste crucial du fait de l'augmentation des exigences de performances attendues et de l'évolution des compétences des préparateurs de gamme de fabrication.

Pour y répondre, nous souhaitons proposer une approche originale basée à la fois sur la formalisation du savoir-faire acquis par l'équipe tout en introduisant l'innovation (nouvel outil, nouvelle stratégie d'usinage, etc.). L'apport concerne les outils méthodologiques de modélisation du problème ainsi que la modélisation des préférences du bureau des méthodes et son processus décisionnel.

La cible est de développer un outil d'aide à la décision qui permette, sans pour autant programmer en détail toutes les gammes de fabrication envisageables, de déterminer, pour une nouvelle pièce, sa gamme d'usinage et d'estimer les différents indicateurs de performance en quantifiant la prise de risques techniques associée aux gammes de fabrication proposées par l'outil et en réduisant le temps d'action du préparateur de gamme.

Le premier verrou scientifique concerne la modélisation géométrique et technologique des différentes zones à usiner. Cela implique le référencement des informations nécessaires à l'élaboration d'une gamme. La levée de ce verrou repose en grande partie sur la formalisation de la bibliographie et de l'expérience acquise par l'équipe en utilisant un modèle spécifique. Pour chaque paramètre, nous proposons un modèle permettant d'évaluer sa performance.

Le second verrou scientifique concerne l'aspect multicritère de la décision ainsi que la modélisation des préférences des méthodistes et de leur processus décisionnel. Pour cela, la théorie de la Décision (Denis Bouyssou, Dubois, Pirlot, & Prade, 2006a, 2006b) propose un ensemble d'outils mathématiques. Ces approches théoriques ont pu être appliquées dans d'autres domaines depuis longtemps comme les problématiques d'investissement ou plus récemment sur les problématiques du génie industriel. Elles peuvent donc potentiellement être utiles à nos différentes problématiques.

Le troisième verrou scientifique concerne la modélisation des risques liés à la mise en œuvre d'une gamme d'usinage. La levée de ce verrou repose sur l'identification et la définition des principaux risques inhérents à l'utilisation d'un processus d'usinage. Nous devons proposer une modélisation pour chacun des risques identifiés.

Le quatrième verrou scientifique porte sur l'intégration globale des modèles et sur la proposition d'une stratégie de recherche de la gamme optimale. Pour cela, la Recherche Opérationnelle propose plusieurs métaheuristiques qui ont été éprouvées dans de nombreux domaines de recherche, notamment au sein du laboratoire pour des problématiques de Génie Industriel.

Enfin le dernier verrou scientifique porte sur le développement d'un outil d'aide à la décision qui permette au décideur, à partir des indicateurs de performance détaillés de chaque gamme proposée par l'outil et de l'évaluation des risques techniques associés de sélectionner et finaliser la gamme de fabrication qui sera par la suite industrialisée.

Un processus d'optimisation a pour but de proposer une gamme d'usinage dont la performance globale est meilleure selon un point de vue multicritère, tout en engendrant un niveau de risque acceptable par l'atelier.

4. Conclusion et articulation du mémoire

Dans ce chapitre, une présentation du contexte industriel de ces travaux a permis de mettre en évidence les problèmes de compétitivité auxquels doivent faire face les sous-traitants de l'industrie aéronautique. Une étude d'optimisation utilisant les méthodes d'ingénierie classiques a souligné les difficultés posées par l'optimisation des processus usinant et permis de détailler les difficultés liées à ces problèmes de compétitivité. Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour répondre à ces problématiques, néanmoins peu ont tenté d'unifier ces modèles et d'y répondre globalement. De plus, les outils proposés sont dans les faits peu implantés en milieu industriel.

Nous avons ensuite exprimé la problématique de recherche ainsi que les différents verrous scientifiques associées. Nos travaux ont pour but de proposer un outil d'aide à la décision multicritère qui permette de générer automatiquement quelques gammes de fabrication proches de l'optimal tout en intégrant les risques techniques associés et en modélisant les préférences et le processus décisionnel du bureau des méthodes.

Dans la suite de ce document, nous réalisons dans une première partie, un état de l'art sur ces méthodes de génération de gammes d'usinage ainsi qu'une analyse critique.

Dans une deuxième partie, nous identifions les indicateurs de performance pour un processus d'usinage au regard de la littérature et nous définissons des estimateurs pour ceux-ci. Par la suite, une présentation des études menées sur les risques dans le domaine de la fabrication est réalisée. Nous formalisons ensuite un ensemble de critères de risques techniques liés aux gammes d'usinage, utilisés par la suite.

Dans une troisième partie, nous nous intéressons à la théorie de la décision et nous présentons quelques méthodes d'aide à la décision multicritères. Nous identifions les avantages et les inconvénients de ces méthodes par rapport à notre problématique et explicitons l'approche choisie.

Dans une quatrième partie, nous formalisons, dans un premier temps, mathématiquement notre problématique. Nous présentons, dans un second temps, l'approche proposée.

Enfin dans une dernière partie, nous exposons l'outil informatique développé et appliquons notre approche à un cas industriel.

Chapitre 2 : Méthodes de génération de gammes d'usinage

1. Formalisation du concept de gamme d'usinage

Dans le processus de conception et de fabrication d'un produit, la génération de la gamme de fabrication est un sous-processus responsable de la conversion des données de conception en instructions techniques de réalisation. Sa création est un processus de détermination des moyens et du séquençement de l'usinage d'une pièce pour fabriquer un produit fini en accord avec les spécifications fonctionnelles demandées (Weill, Spur, & Eversheim, 1982).

Son objectif est donc de définir l'ordre des différentes opérations mises en place pour mener à bien la réalisation du produit à la qualité attendue ainsi que les valeurs des paramètres permettant de réaliser ces opérations (conditions de coupe, référence outil, trajectoires d'usinage etc.). La place de la génération de la gamme d'usinage dans notre contexte d'étude est présentée par la suite, puis une analyse des différentes méthodes de générations de gamme est proposée.

1.1 Positionnement de la gamme d'usinage

Dans le contexte de l'étude, les pièces principalement abordées sont des pièces de structure aéronautique de grande dimension, et dont la cadence excède rarement 200 pièces/an. Ces pièces ont une gamme de fabrication comprenant, généralement, une partie « mise en forme » à distinguer de la partie élaboration de la nuance de métal. La mise en forme induit une gamme de forgeage, permettant l'obtention de la préforme, et une gamme d'usinage pour obtenir la forme finale. La gamme d'usinage d'une pièce est donc une partie de la gamme de fabrication de celle-ci. Elle est d'une importance certaine, car elle permet d'obtenir les formes géométriques fonctionnelles ou requises dans le cas de l'obtention d'un état intermédiaire.

Les améliorations apportées en terme d'automatisme et d'électrotechnique ayant permis de supplanter les opérateurs humains dans de nombreux cas, les étapes chronophages se sont déplacées vers les départements de préparation des fabrications (qui comprend la génération de la gamme et la génération des phases d'usinage, comprenant le calcul des trajectoires outils), tel que les services méthodes usinage. Dans ces derniers, le travail de préparation de fabrication est peu automatisé. Ainsi, la création d'une gamme d'usinage et des phases associées peut représenter jusqu'à 40% du temps de préparation de fabrication dans le cas de pièces complexes (Weill et al., 1982). De plus, les gammes générées ainsi ne sont pas forcément optimales et font appel principalement à l'expérience des methodistes et des opérateurs de l'atelier. C'est pourquoi un intérêt est depuis longtemps porté par la communauté scientifique sur les problématiques liées à la génération automatique de gammes de fabrication, et en particulier de gammes d'usinage.

2. La génération automatique de gamme de fabrication

L'idée d'utiliser la puissance de calcul offerte par les systèmes informatiques afin de générer des gammes de fabrication est attribuée à (Niegel, 1965). Mais son développement a réellement eu lieu dans les années 1980-1990, quand les ordinateurs ont eu la puissance de calcul suffisante.

Chapitre 2 : Méthodes de génération de gammes d'usinage

La génération automatique de gammes de fabrication est ainsi depuis une trentaine d'années un sujet de recherche important ainsi qu'une grande préoccupation de la part des entreprises orientées vers les domaines de la mécanique. Comme expliqué ci-dessus, le temps actuel de génération d'une gamme ou d'un processus de fabrication peut représenter un temps important dans la phase d'avant production. Ainsi, l'automatisation permet non seulement de réduire de manière importante les temps précédant le lancement de la fabrication mais aussi de permettre aux entreprises de capitaliser leur savoir-faire afin de pouvoir l'utiliser de manière pérenne.

La diversité des pratiques et des types de fabrication rend néanmoins ces travaux de recherche, universitaires ou industriels, complexes, vis-à-vis de leur généralité. Ces sujets sont traités depuis le début des années 1970, et si divers systèmes de gammes automatiques, ou CAPP pour *Computer-Aided Process Planning*, ont été conçus et testés par les chercheurs (55 systèmes différents existants en 1986 (Giusti, Santochi, & Dini, 1986)), la communauté s'accorde pour leur attribuer les tâches suivantes (Denkena, Shpitalni, Kowalski, Molcho, & Zipori, 2007; Eskicioglu & Davies, 1981; Ham & Lu, 1988) :

- Sélection des procédés de fabrication et des outils ;
- Sélection des machines-outils et des moyens de mise en œuvre;
- Séquencement des opérations ;
- Groupement des opérations (phases, sous-phases) ;
- Sélection des systèmes de bridage, des faces d'appuis ;
- Sélection des modes et instruments de contrôle ;
- Détermination des tolérances de production ;
- Détermination des conditions de coupe ;
- Calcul des temps d'usinage et hors usinage, calcul des coûts associés ;
- Génération des documents descriptifs de la gamme, des opérations.

Dans le contexte industriel étudié dans ces travaux, le choix des machines-outils et des modes de contrôle sont prédéfinis par les moyens mis en œuvre au sein de l'atelier. De plus, les travaux se focalisent essentiellement sur des opérations d'ébauche pour des géométries simples dans le but de livrer un produit selon un état intermédiaire spécifique des pièces fabriquées. Ainsi le calcul des tolérances d'usinage n'est pas critique, tout comme celle des zones de bridages et d'appuis.

Voici donc les étapes à mettre en œuvre afin de générer avec un système CAPP, pour les gammes d'usinage dans le contexte industriel étudié :

- Sélection des outils de coupe ;
- Sélection des stratégies d'usinage ;

- Détermination des conditions de coupe ;
- Séquencement des opérations ;
- Calcul des temps d'usinage Calcul des coûts.

Comme vu précédemment, les coûts associés seront déterminés une fois que les autres éléments nécessaires à leur calcul, le sont. Le paragraphe suivant détaille les diverses possibilités de choix des outils de coupe, du séquencement des opérations, ainsi que la détermination des conditions de coupe.

3. Sélection des outils et conditions de coupe

La sélection des outils et des conditions de coupe est une problématique complexe dans laquelle interfèrent plusieurs éléments provenant du dessin de la pièce ou de la productivité nécessaires à la compétitivité ainsi que de l'expérience et des connaissances importantes (Arezoo, Ridgway, & Al-Ahmari, 2000). En effet, pour faire un choix éclairé, le méthodiste doit prendre en compte :

- Le matériau à usiner et ses caractéristiques physiques et mécaniques ;
- Le matériau de l'outil de coupe ;
- L'interaction matériaux usinant / usiné ;
- La puissance de coupe et le couple maximaux transmis par la broche ;
- Les vitesses minimales et maximales de rotation de broche ;
- La géométrie de la zone à usiner ;
- L'effort maximal admissible par la machine d'usinage ;
- La forme du brut ;
- D'autres paramètres intervenant spécifiquement dans le cas à traiter.

La sélection d'un outil ou de conditions opératoires non appropriés (en termes de durée de vie, débit copeau, temps d'usinage, coût de la pièce, état de surface, ressauts, marques sur la pièce, rupture de l'outil, etc.) entraîne non seulement un surcoût mais également un augmentation du risque de non qualité de la surface usinée ou de la pièce (Y. Chen, Hui, & Du, 1995).

Hupman a proposé une schématisation du problème de choix d'outils de coupe dans la Figure 13 (Hupman, Abbas, & Schmitz, 2015) :

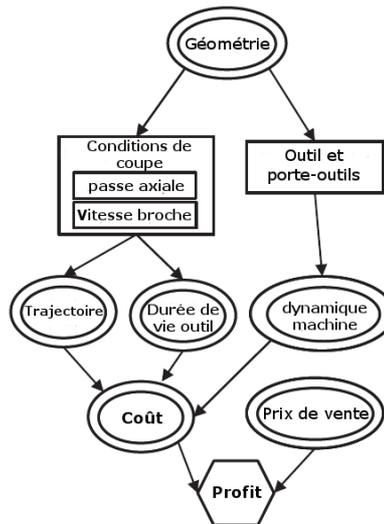


Figure 13 : méthode de choix d'un outil de coupe (Hupman et al. 2015)

Dans la Figure 13, les paramètres entourés d'ovales sont issus de calculs déterministes à partir de modèles plus ou moins complexes, les rectangles représentent les décisions que doivent prendre les méthodistes et l'hexagone représente une valeur finale permettant de juger partiellement de la performance de l'opération d'usinage. Les paramètres de coupe influent sensiblement sur le coût d'une opération d'usinage car ils définissent en partie les trajectoires outils permettant d'usiner la géométrie attendue, mais également la durée de vie d'un outil de coupe. De plus, le choix d'un type d'attachement de l'outil influence la rigidité globale du système usinant, et donc sa performance. Ces choix entraînant un coût de fonctionnement variable, Hupman évalue le profit généré lors de l'opération d'usinage plutôt que son coût direct, liés à l'utilisation des outils et à leurs changements (Hupman et al., 2015).

Pour générer une gamme, le problème s'appuie sur 3 processus (Hassini, 2015) :

- Un processus géométrique : une analyse de la géométrie de la zone à usiner qui permet de définir les dimensions limites des outils à utiliser afin d'assurer le respect de la géométrie à usiner finale ;
- Un processus technologique : l'analyse de l'interaction entre l'outil, la géométrie et le matériau à usiner, qui permet de déterminer les conditions de coupe usuelles associées ;
- Un processus d'optimisation : une pièce ou une zone comporte généralement plusieurs opérations d'usinage avec des outils différents, il est nécessaire d'optimiser la sélection de différents outils de manière à obtenir la meilleure suite d'outils.

3.1 Processus géométrique : définition des géométries outils

Les recherches sur la sélection automatisée des géométries d'outils ont débutées en même temps que les recherches sur les premiers systèmes CAPP complets. Néanmoins, les motivations peuvent être différentes. Si beaucoup recherchent la performance en terme de temps d'usinage ou de durée de vie (Arezoo et al., 2000), d'autres sont motivés par des considérations plus écologiques en intégrant dans la mesure de performance

d'une opération la consommation de puissance des axes lors des déplacements ainsi que celle de la broche (Campatelli, Scippa, & Lorenzini, 2014).

Plusieurs méthodologies de choix d'outils ont été développées utilisant les systèmes experts (S. J. Chen, Hinduja, & Barrow, 1989; Dhage & Usher, 1993; Giusti et al., 1986), les arbres de recherche (Bley & Stadelmeyer, 1993), les méthodes dites de recherche opérationnelle (Heo, Kim, Lee, Lee, & Frank Chen, 2011) ou encore la logique et les ensembles flous (S. J. Chen et al., 1989; Y. Chen et al., 1995; M.-J. J. Wang, 1995). Néanmoins, la plupart de ces auteurs font l'hypothèse d'un outil unique pour usiner la zone étudiée. Or, la gamme optimale comporte souvent plusieurs outils pour une même zone à usiner, qui doivent s'enchaîner pour assurer la qualité géométrique. Ainsi, une relation est à définir entre les caractéristiques géométriques d'un outil et celles de la surface usinée par cet outil. Ceci doit permettre d'assurer et de formaliser la compatibilité entre deux opérations d'usinage sur une même zone avec deux outils capables.

3.2 Processus Technologique : Définition des conditions de coupe

La définition des conditions de coupe associées à un outil de coupe est encore aujourd'hui un problème complexe et difficilement formalisable de manière universelle. L'objectif est de déterminer pour une opération d'usinage et un outil donnés le domaine de variations possible des conditions de coupe et de déterminer, au sein de ce domaine, les valeurs les plus appréciables au regard d'un objectif d'optimisation (temps, coût, etc.). Suivant les caractéristiques de la matière à usiner, le domaine de variation des conditions de coupe est défini par l'expression des contraintes technologiques limites telles que la puissance et le couple disponibles à la broche, l'effort maximal admissible par la machine d'usinage, pour éviter les ruptures d'outil, de la pièce ou du montage, l'usure maximale limite, la durée de vie maximale, l'état de surface, etc. Ces limites technologiques sont le plus souvent définies par des modèles mathématiques partagés par la communauté scientifique

Plusieurs travaux ont concentré leurs efforts dans le but de déterminer les conditions de coupe permettant d'optimiser le temps d'usinage. Lopez utilise une méthode purement empirique à base d'essais dans des conditions établies pour déterminer les meilleures conditions de coupe dans l'usinage de matériaux aéronautiques réfractaires (Ta6V et inconel 718) (Lopez De Lacalle, Perez, Llorente, & Sanchez, 2000). Wang et D'Addona utilisent pour l'optimisation, des algorithmes génétiques permettant de prendre en compte les diverses contraintes liées à l'opération (D'Addona & Teti, 2013; Z. G. Wang, Rahman, Wong, & Sun, 2005). D'autres auteurs, comme Zuperl ou Lee utilisent également des algorithmes polynomiaux ou des réseaux de neurones dans le but d'optimiser conjointement le temps et le coût de l'opération d'usinage (B. Y. Lee & Tarng, 2000; Zuperl & Cus, 2003). Arezoo utilise un système expert pour faire cette optimisation commune, tout comme Wang (Arezoo et al., 2000; H.-P. (ben) Wang & Wysk, 1986).

D'autres auteurs préconisent de ne se concentrer que sur l'optimisation du coût car le temps d'usinage peut être inclus dans la fonction objectif de minimisation du coût (Y. Chen et al., 1995). Yildiz présente un algorithme d'évolution pour l'optimisation du coût seulement (Yildiz, 2013), là où Karandikar propose une méthode basée sur les plans d'expériences (Karandikar & Kurfess, 2015). Alberti présente une méthode en deux parties dont la première est basée sur des essais empiriques permettant de définir une base de

connaissances organisée par groupes technologiques (Alberti, Ciurana, & Casadesús, 2005). Une comparaison de ces diverses méthodes montre qu'il est possible d'optimiser les conditions opératoires, même pour des matériaux réputés difficiles à usiner. Si les conséquences sur le temps de fabrication peuvent être intéressantes, comme des gains jusqu'à 33% (Alberti et al., 2005), les gains les plus flagrants sont ceux fait sur le temps de préparation de la gamme d'usinage, grâce à la génération automatique de la gamme. Néanmoins ces gains sont difficiles à quantifier par manque de recul quant aux cas tests traités dans la littérature. Il est malgré tout possible de distinguer deux grandes familles de méthodes de définition des conditions de coupe :

- Les méthodes empiriques, sont généralement difficilement programmables. Elles utilisent des bases de données issues d'essais pour définir les meilleures conditions de coupe à utiliser dans un nouveau cas de production ;
- Les heuristiques ou métaheuristiques, tels que les algorithmes génétiques, qui utilisent des relations mathématiques pour définir des conditions de coupe optimisées.

Les méthodes empiriques permettent en général d'obtenir des solutions plus performantes comparativement à celles données par un méthodiste et ne nécessitent pas de temps de calcul pénalisants. Ces méthodes reposent sur la formalisation du savoir-faire du bureau des méthodes, le domaine de solution observé reste relativement étroit et génère peu de solutions contre intuitives puisque créées d'après les connaissances acquises. A contrario, les heuristiques ou métaheuristiques exigent des temps de calculs machine pouvant aller jusqu'à plusieurs heures mais permettent une exploration bien plus importante du domaine des solutions possibles, tout en étant plus rapides que des méthodes exactes (Porumbel, 2009). Mais il est nécessaire pour cela de déterminer les relations mathématiques liant les différents paramètres et de les implémenter dans un système informatique intuitif à utiliser, indispensable pour percer efficacement dans un atelier.

Le temps et le coût ne sont cependant pas les seuls critères d'optimisation d'une opération d'usinage. Certains secteurs industriels, comme celui des moules et matrices, considèrent avec plus d'importance les problématiques de durée de vie de l'outil, liées au respect dimensionnel ainsi qu'aux états de surface générés (Vivancos, Luis, Costa, & Ortiz, 2004). Ainsi, Choudhury présente un plan d'expériences permettant l'optimisation des paramètres de coupe pour optimiser l'usure outil et l'état de surface dans le tournage de matériaux réfractaires (Choudhury & El-Baradie, 1999). La même problématique est abordée pour des aciers traités par Iqbal en utilisant un système expert couplé à la logique floue, et par Wang avec l'utilisation d'un réseau de neurones adapté (Iqbal, He, Li, & Dar, 2007; X. Wang, Wang, Huang, Nguyen, & Krishnakumar, 2008).

La majorité des publications traitant de la détermination et de l'optimisation des conditions de coupe sont appliquées à des cas d'usinage de matériaux ferreux (acier ou fonte) dont les nuances font partie du domaine de la mécanique générale. Peu de publications traitent de la détermination des conditions de coupe pour les matériaux aéronautiques comme les alliages de titane réfractaires, principalement à cause du fait que les domaines de variation possibles des paramètres de coupe sont extrêmement restreints (Wagner & Duc, 2014).

3.3 Système d'optimisation multi-outils.

Le problème de choix d'outils voit sa complexité augmenter lorsqu'il doit intégrer une suite d'outils potentiels pour usiner une zone (Yao, Gupta, & Nau, 2003). En effet, une zone d'usinage comporte le plus souvent plusieurs opérations et les outils et conditions de coupe utilisés pour ces diverses opérations sont souvent différents (D'Souza, Sequin, & Wright, 2004). Les verrous les plus importants portent sur l'identification des volumes ou des zones usinables et usinés et leur compatibilité avec ceux des outils précédents ou suivants. Cela repose sur une analyse géométrique de ces différentes zones et l'évaluation des intersections entre elles. Dans un second temps, il est nécessaire d'estimer la performance d'un enchaînement d'outils par rapport à d'autres solutions, en définissant un critère et un modèle de performance lié au coût ou au temps d'usinage.

3.4 Conclusion

Ainsi, comme nous avons pu le voir dans l'analyse de la littérature, la détermination des outils et des conditions de coupe pour une ou plusieurs opérations d'usinage est un problème qui reste complexe. Ces déterminations portent souvent sur des critères économiques mais elles sont dictées par des problématiques géométriques et technologiques qui entrent en interaction. Il est important de pouvoir maîtriser ces données car elles ont un impact direct sur les performances économiques et techniques de l'usinage.

4. Estimation des temps d'usinage

Le calcul et l'estimation des temps d'usinage reste encore aujourd'hui un verrou qu'il est nécessaire de lever. Ces estimations permettent de fournir des informations dans le but de prédire précisément la productivité attendue d'un poste d'usinage. La fiabilité de la prédiction du temps d'usinage est un indicateur de la maîtrise du processus de fabrication. Le temps d'une opération d'usinage dépend fortement des conditions de coupe et de la trajectoire de l'outil. La précision de l'estimation du temps d'usinage dépend, ainsi de la précision de l'estimation de la longueur de la trajectoire ainsi que de la prise en compte de la réponse cinématique de la machine au cours de l'usinage (Pateloup, 2005). Altintas propose de modéliser le comportement dynamique d'une machine-outil à partir de modélisations physiques, dans le but d'estimer un temps prenant en compte l'ensemble des trajectoires (Altintas & Tulsyan, 2015). D'autres modèles, comme ceux proposés par So et Monreal définissent de manière plus précise les comportements de la machine, en proposant un modèle géométrique du comportement cinématique, via le paramétrage de la direction de balayage, de l'angle de discontinuité en tangence, de la longueur de segments de trajectoire et des rayons de congés (Monreal & Rodriguez, 2003; So, Jung, Park, & Lee, 2007). L'ensemble de ces modèles atteignent une bonne approximation du temps réel d'usinage mais ils restent difficile à calibrer et ne peuvent être utilisés qu'une fois la gamme de fabrication déjà établie.

D'après Liu, il existe actuellement quatre types de méthodes permettant l'estimation des temps d'usinage (Liu, Li, Wang, & Shen, 2013) :

- Les estimations basées sur le débit copeau ;

- Les estimations basées sur le programme d'usinage généré ;
- Les estimations basées sur le programme d'usinage en prenant en compte les caractéristiques dynamiques de la machine ;
- Les estimations par intelligence artificielle.

Les estimations basées sur le débit copeau permettent de donner une estimation rapide du temps utilisé pour enlever la matière nécessaire. Néanmoins, ne prenant pas en compte la géométrie à usiner, ces approximations sont souvent grossières. C'est pourquoi Yang et Jung proposent des modèles basés sur les débit copeaux adaptés à chaque type d'entité d'usinage, en se basant sur un calcul précis de volume matière à usiner (Jung, 2002; C. Yang & Lin, 1997). D'autres méthodes prennent en compte l'état de surface demandé afin d'affiner la prédiction du temps d'usinage (Shehab & Abdalla, 2001). Ces méthodes ont l'avantage de prendre en compte les temps importants nécessaires à l'obtention de bons états de surface. En revanche, elles sont moins performantes lorsque l'usinage ne concerne que des opérations d'ébauche.

Les estimations basées sur les programmes d'usinage seuls sont les méthodes utilisées par les logiciels de vérification de FAO tel que Vericut[®] ou NC Simul[®]. Elles sont simples à implémenter mais n'utilisent pas les modèles de comportement dynamique des machines d'usinage, ce qui génère des erreurs dans l'estimation du temps d'usinage, principalement pour les cas d'usinage à grande vitesse où les variations de vitesse ne sont pas négligeables notamment dans les rayons de poches où les changements de direction sont importants.

La communauté a naturellement cherché à combler ce manque en intégrant à ces estimations des modèles des machines-outils. So propose un algorithme pour de l'usinage en 5 axes continu (So et al., 2007). Heo présente un simulateur qui adapte le calcul en fonction des caractéristiques du code CN étudié à savoir la répartition des blocs CN et leur interaction avec les caractéristiques machines (Heo, Kim, Kim, & Frank Chen, 2006). Néanmoins, ces simulateurs et estimateurs sont principalement utiles pour l'usinage 5 axes et pour des machines utilisées de manière dynamique comme pour l'usinage à grande vitesse.

L'analyse de la littérature montre que les travaux portant sur l'estimation des temps d'usinage se basent le plus souvent sur une approche très macroscopique utilisant le débit copeau par exemple, ou des approches très spécifiques, notamment pour des cas d'usinage à grande vitesse, où les problématiques de dynamique machine deviennent prépondérantes. De plus, ces approches se basent sur des programmes d'usinage déjà générés. Peu de travaux proposent des estimateurs de temps analytiques permettant d'estimer la durée d'une gamme d'usinage sans avoir à passer par la simulation FAO des opérations.

5. Processus de génération de gammes d'usinage : un état de l'art

Les processus précédents permettent de procéder à des choix ou des optimisations spécifiques aux opérations d'usinage. L'organisation de l'enchaînement des opérations relève de l'élaboration de la gamme, voire de son optimisation. La Figure 14 présente les différents travaux de recherche effectués par la communauté scientifique. Ces travaux ont permis de dégager plusieurs approches possibles pour la création de

systèmes CAPP (*Computer Aided Process Planning – Gamme Automatique*) (Villeneuve, 2002), que nous allons développer dans ce sous-chapitre.

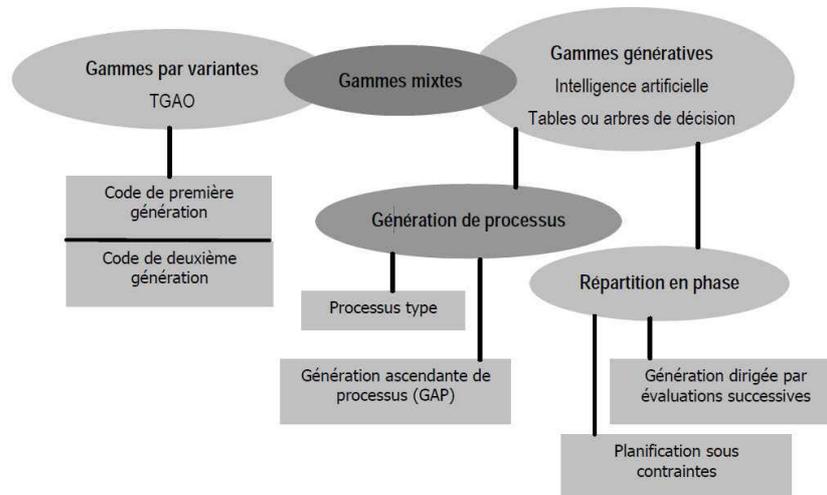


Figure 14 : Catégories des techniques de génération de gammes d'usage (Villeneuve 2002)

Deux approches principales sont développées. La première est basée sur le mimétisme par rapport à l'existant (gamme par variante), alors que la seconde concerne les méthodes qui construisent une gamme ex-nihilo (gamme générative).

- Gammes par variante (Alting & Zhang, 1989; Eversheim & Schneewind, 1993) ;
- Gammes génératives ou semi-génératives (Alting & Zhang, 1989; ElMaraghy, 1993; Eversheim & Schneewind, 1993) comprenant :
- Gammes par systèmes algorithmiques ;
- Gammes par systèmes experts (Krause, 1990; Ramsey, Reggia, Nau, & Ferrentino, 1986; Vant Erve & Kals, 1986)

5.1 Génération de gammes par variantes

Cette approche est la première développée pour la génération automatique de gammes, également connue sous le nom de systèmes TGAO (Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur). Elle peut être adaptée à un grand nombre de fabrications car elle se base sur les archives des fabrications passées d'une entreprise pour en déduire des familles de pièces, et proposer des gammes types pour chaque famille. Ceci permet, à terme, de standardiser la génération de gammes en fonctionnant par analogie à l'existant, ainsi que de créer des lignes de production adaptées à une famille de pièces. Deux étapes sont nécessaires à la mise en place de cette méthodologie (Llanes-Coronel et al., 2011).

La première est appelée étape préparatoire (Figure 15), et correspond au travail de capitalisation des expériences de l'entreprise, en terme de typologie de pièces fabriquées. Un classement entre les différentes gammes connues de l'entreprise est à faire, de manière à pouvoir créer des familles de pièces qui soient

suffisamment représentatives tout en permettant d'y regrouper un nombre suffisant de pièces différentes. Le paramétrage des gammes est donc une activité fondamentale mais fastidieuse. Une fois les familles de pièces générées, une gamme paramétrée type est faite et englobe une famille (Villeneuve, 2002).

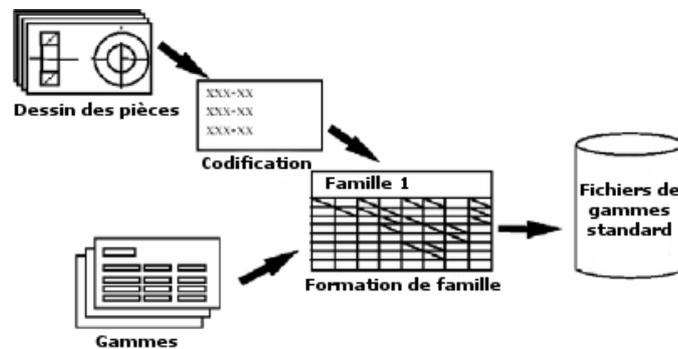


Figure 15 : Schéma de fonctionnement de l'étape préparatoire d'une méthode par variante (Chang, 1990)

La deuxième étape est appelée étape productive (Figure 16) et correspond à l'arrivée d'une nouvelle fabrication au sein de l'entreprise. Après analyse de la pièce, les methodistes l'associent à une famille de pièce et adaptent, si besoin est la gamme type de la famille concernée à la pièce.

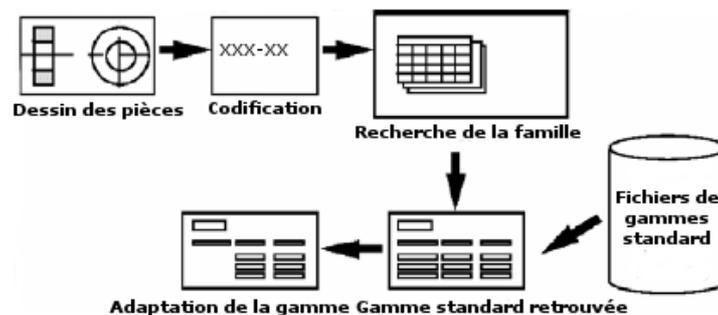


Figure 16 : Schéma de fonctionnement de l'étape productive d'une méthode par variante (Chang, 1990)

Les inconvénients principaux de cette approche viennent surtout de l'étape préparatoire qui, en plus d'être extrêmement chronophage, est soumise à la subjectivité du ou des opérateur(s) responsable(s) du paramétrage et de la création des différentes familles de pièces. De plus, le fait de créer des familles limite automatiquement la flexibilité du système et lorsqu'une pièce dont la typologie ne peut être référencée, le processus de génération de gamme est à déclencher depuis le début. Le système étant très rigide, la mise en cause des gammes proposées ainsi que la recherche d'amélioration n'est pas présente (Noël & Brzakowski, 1990).

5.2 Génération de gammes par approche générative

L'approche générative en génération de gammes est apparue plus tardivement que la génération par variantes (Villeneuve, 2002). Cette approche consiste à prendre en compte le savoir-faire de l'entreprise et à l'intégrer pendant le raisonnement de la génération de la gamme. L'approche générative a été abordée principalement de deux manières distinctes, l'une basée sur les systèmes algorithmiques et l'autre basée sur les techniques d'Intelligence Artificielle, via l'écriture d'une base de règles logiques que la gamme doit

satisfaire. Depuis les débuts de la recherche dans ce domaine plus d'une dizaine de systèmes différents aboutis ont été développés (ElMaraghy, 1993).

5.2.a Approche générative, systèmes algorithmiques

Les algorithmes utilisés pour ce type d'approche sont généralement associés à des bases de données importantes, relatives à tous les équipements et connaissances de l'atelier et des méthodistes et sont souvent très spécialisés dans tel ou tel processus (tournage, fraisage, etc...), pour être mieux adaptées au besoin et plus performantes.

La formalisation des connaissances se fait le plus souvent au moyen d'arbres ou de tables de décision, deux méthodes qui ont l'avantage d'être facilement traduisibles en langage informatique (Villeneuve, 2002). On y exprime les contraintes d'usinage formalisées par le méthodiste.

Une fois les connaissances et pratiques modélisées, les algorithmes de décision sont mis en place de manière à pouvoir déterminer le meilleur processus pour effectuer telle ou telle opération ou phase. En couplant ces décisions avec les données d'équipements renseignées auparavant, l'algorithme peut proposer une ou plusieurs gammes qui pourront être discriminées ou non suivant un critère de choix (temps, coût, etc...).

Cette approche ne permet pas de générer des gammes optimales à tout point de vue car l'utilisateur du système n'a que peu d'actions possibles sur la décision. Néanmoins, dans les entreprises où les fabrications sont principalement des pièces spéciales unitaires ou de petite série, la formalisation du savoir-faire permet d'accélérer la création des gammes (Alting & Zhang, 1989).

Le principal inconvénient de cette approche vient du fait que la connaissance et le savoir-faire sont souvent très éloignés, voire en opposition, d'un atelier de fabrication à l'autre. De plus, la formalisation de la connaissance et de l'expertise en vue de l'implémenter dans un code informatique est un handicap majeur du développement (Harik, 2007). Par conséquent, un système de gammes génératives est très souvent ciblé sur un procédé de fabrication ainsi que sur un atelier et les cas traités doivent rester assez simples.

Plusieurs systèmes ont néanmoins vus le jour, tels que APPAS (Wysk, 1977), AUTAP (Eversheim, Fucks, & Zons, 1980) ou encore LURPA TOUR (Anselmetti, 1994).

5.2.a.1 Approche générative, systèmes experts

Ce type d'approche très en vogue durant les années 1980 permet de combler ce manque de flexibilité des méthodes algorithmiques. Les systèmes basés sur de l'Intelligence Artificielle (IA), aussi appelés systèmes experts, sont caractérisés par une structure basée sur les trois items suivants :

- Une base de faits pour la connaissance de la pièce ;
- Une base de règles et de faits sur la génération de la gamme ;
- Un mécanisme d'inférence, qui construit la gamme pas à pas en fonction de la base de règles.

Chapitre 2 : Méthodes de génération de gammes d'usinage

Comme pour l'approche par algorithme, une formalisation des connaissances et des produits est nécessaire pour le fonctionnement du système. Mais l'intérêt principal de l'utilisation de systèmes experts est de pouvoir appréhender des relations plus complexes car définies plus précisément entre les différentes entités servant à la création de la gamme (pièce, montage, machines, outils, etc...) et de pouvoir étudier des cas plus complexes que ceux traités avec une approche algorithmique.

Par exemple, pour la présentation de son système XPLANE, Van't Erve propose l'exemple d'un trou et fait apparaître qu'il faut 19 paramètres pour pouvoir généraliser sa fabrication (Vant Erve & Kals, 1986). Chacun des paramètres pouvant prendre un certain nombre de valeurs différentes, les cas possibles sont également très nombreux. Ainsi l'utilisation d'un système basé sur la connaissance, formalisée par des règles de décisions, couplé à un moteur d'inférence permet de traiter plus rapidement tous les cas possibles pour déterminer le meilleur procédé à utiliser avec les conditions adaptées.

Encore une fois, ces systèmes ne garantissent pas que la gamme proposée soit optimale car elle est fortement dépendante du savoir-faire de l'atelier. Un autre inconvénient de cette approche vient du temps de calcul, qui augmente exponentiellement avec le nombre de possibilités ou d'itérations du système. Ainsi, pour une pièce assez ouvragée ou comportant un grand nombre d'entités géométriques différentes, le temps de calcul peut s'avérer beaucoup trop long et peut parfois être instable, même avec les puissances de calcul disponibles aujourd'hui.

Ces systèmes continuent néanmoins à être fortement étudiés aujourd'hui, notamment grâce à la puissance de calcul grandissante des systèmes informatiques.

6. Une vision globale des méthodologies CAPP existantes

Depuis 1984, il y a eu plusieurs articles analysant et comparant les divers systèmes CAPP développés par la communauté scientifique. Une analyse de ces travaux permet de mieux comprendre l'évolution et la complexification des principes régissant les systèmes de génération de gammes, tout en pointant les domaines non exploités par les recherches.

La première comparaison a été publiée en 1984 par Steudel dans laquelle il discute des diverses approches et stratégies à mettre en place pour développer un système de génération de gammes génératif automatisé (Steudel, 1984).

En 1988, Ham propose un état de l'art dans lequel l'accent est mis sur l'importance de l'intégration de la conception pour la fabrication ainsi que l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle (IA) (Ham & Lu, 1988).

En 1989, un état de l'art des plus complets, analysant 156 systèmes CAPP alors développés, est publié par Alting (Alting & Zhang, 1989). Dans la même année, Gouda proposent une revue de 128 systèmes (Gouda & Taraman, 1989). Ces deux papiers ont permis de présenter les grands types de systèmes CAPP existant à cette époque ainsi que de souligner les grandes difficultés à lier les modules de CAO et de FAO, que ce soit au niveau de la définition géométrique des pièces et de leurs entités, ou au niveau de l'interface entre les différents

modules pouvant coexister dans la chaîne numérique liée à la fabrication. Les auteurs soulignent également l'importance que doivent prendre les technologies de l'IA dans le développement de systèmes CAPP plus performants.

Dans les années 1990, la tendance pressentie par les auteurs ci-dessus se confirme et les techniques de l'IA se généralisent et se complexifient. ElMaraghy montre que les attentes en terme de qualité et les standards de fabrication évoluent rapidement, ainsi que les capacités d'intégration des systèmes CAPP au sein d'entités de fabrication et de logistique (ElMaraghy, 1993). Eversheim suggèrent que les futures évolutions du CAPP doivent suivre celles des modules de planification d'assemblage, tout en intégrant la programmation FAO et les techniques de l'IA, notamment pour la prise de décision, dans le but de générer des gammes toujours plus performantes et optimisées (Eversheim & Schneewind, 1993).

En 1998, Marri compare 25 systèmes génératifs développés entre 1989 et 1996 (Marri, Gunasekaran, & Grieve, 1998). Ils soulignent le manque de formalisation mathématique des connaissances utilisées dans les systèmes qui est, selon eux, un frein au développement. L'orientation des recherches doit également être mise sur le côté dynamique et évolutif de l'état d'un atelier et du statut des machines. Ceci permettrait d'obtenir des systèmes CAPP pouvant s'adapter en temps réel aux conditions de l'atelier. Une de leurs conclusions précise que les systèmes développés à l'époque ne permettent pas de prendre en compte le comportement incertain d'un nombre de paramètres liés aux fabrications et que les recherches doivent également s'orienter vers la compréhension de ces variations.

En 2007, Denkena propose un état de l'art axé sur le management de la connaissance pour la génération de gammes de fabrication (Denkena et al., 2007). Ils soulignent l'importance de la connaissance et de la compréhension du travail des methodistes dans la performance globale d'un système de production ainsi que dans l'amélioration des prises de décision. Si les logiciels de CAO et FAO sont souvent présents au sein des entreprises, les systèmes CAPP ne le sont pas, tout comme les infrastructures de management de la connaissance. Un autre point important est le manque de dialogue entre fabricant et concepteur. Pour pallier à ces manques, les auteurs proposent de modéliser l'environnement du methodiste grâce à une ontologie dont le but est de rendre explicite la connaissance présente dans les documents numériques et les logiciels, en regroupant l'ensemble des concepts pour structurer le domaine. La définition d'une gamme doit alors passer par ces différentes étapes :

- Réception des modèles et plans de pièce ;
- Sélection de la matière première et de la géométrie réalisable ;
- Sélection du procédé ;
- Préparation de la gamme d'usinage ;
- Génération des documents liés à la fabrication.

Chapitre 2 : Méthodes de génération de gammes d'usinage

D'aucun peut constater que ces diverses étapes n'ont pas fondamentalement évolué pendant près de deux décennies, preuve que les modèles et méthodes développés au sein des laboratoires de recherche n'ont pas réussi à percer efficacement l'industrie et à s'imposer comme étant un élément crucial pour la performance d'un atelier.

Xu présente un état de la recherche sur la génération de gammes entre 2000 et 2009 (Xu, Wang, & Newman, 2011). Leurs conclusions montrent que les systèmes Variant (par variante) sont toujours utilisés, notamment pour l'industrie de grande série où la géométrie des pièces évolue de manière discrète mais constante.

Enfin, en 2014, Yusof complète l'état de l'art fait par Xu en ajoutant la technologie des blocs fonctionnels, technologie utilisée pour la génération de gammes depuis la fin des années 2000 (Yusof & Latif, 2014). Issus du standard IEC 61499, les blocs fonctionnels sont des composants activés par les divers événements ayant lieu au sein d'une fabrication. Ils contiennent divers algorithmes ou commandes informatiques ainsi que des entrées et sorties sur les données et les événements en cours. Plusieurs de ces blocs élémentaires peuvent donc être assemblés pour former des systèmes complexes de contrôles des applications (L. Wang, Holm, & Adamson, 2010; Lihui Wang, Adamson, Holm, & Moore, 2012). Leur utilisation, dans le cadre de l'optimisation du fonctionnement d'un atelier ou de la génération de gammes d'usinage, ne peut se faire qu'en présence de machines suffisamment instrumentées, ou bien de données suffisamment complètes, pour pouvoir fournir les données nécessaires au pilotage du système de génération de gamme pour obtenir des résultats fiables et précis.

Ainsi, la recherche dans le domaine de la génération de gammes s'est élargie, depuis que Niebel en 1965 a proposé d'utiliser la puissance de calcul des ordinateurs pour assister l'humain dans les tâches liés aux planifications de gammes, sur près de cinq décennies. Au cours du temps, si les trois grands type de systèmes CAPP (Variant, Génératif et basés sur des systèmes experts) sont restés les mêmes, de nombreuses technologies ont vu le jour avec pour but de faire face à la demande de performance toujours plus grande des industriels ainsi qu'aux fabrications toujours plus contraintes et complexes.

A la fin des années 80, ces 3 approches occupaient les chercheurs dans le domaine :

- Approche par technologie de groupe ;
- Approche par systèmes experts et à base de connaissances ;
- Approche par l'intelligence artificielle.

Le développement de moyens informatiques leur a permis de toujours pousser les possibilités de complexification des modèles et des systèmes. Si bien qu'aujourd'hui, dix technologies distinctes sont utilisées :

- Technologie basée sur les entités géométriques d'usinage (Jung, 2002; Liu et al., 2013) ;

- Technologie à base de connaissances sur les processus (Wright, Darbyshir, Park, & Davis, 1987; Yeo, 1994) ;
- Technologie basée sur les réseaux de neurones (Öztürk & Öztürk, 2001; X. Wang et al., 2008) ;
- Technologies basées sur les algorithmes génétiques (Dereli & Filiz, 1999; Salehi & Tavakkoli-Moghaddam, 2009) ;
- Théorie et logique des ensembles flous (Y. Chen et al., 1995; Kahraman, Ertay, & Büyüközkan, 2006) ;
- Réseaux de Petri (Kiritsis, Neuendorf, & Xirouchakis, 1999) ;
- Technologie multi agents (Agrawal, Shukla, Kumar, & Tiwari, 2009; Shen, Hao, Yoon, & Norrie, 2006) ;
- Technologie basée sur l'internet (évolution des technologies à base de connaissances) (Wan, Gao, Li, Tong, & He, 2015) ;
- Technologie basée sur le format STEP (ISO 10303) permettant de faciliter le dialogue entre conception et fabrication (Lau, Lee, Jiang, Hui, & Pun, 2005; Yifei, Dongbo, Changbo, & Minjian, 2008) ;
- Technologie des blocs fonctionnels (L. Wang et al., 2010; Lihui Wang et al., 2012).

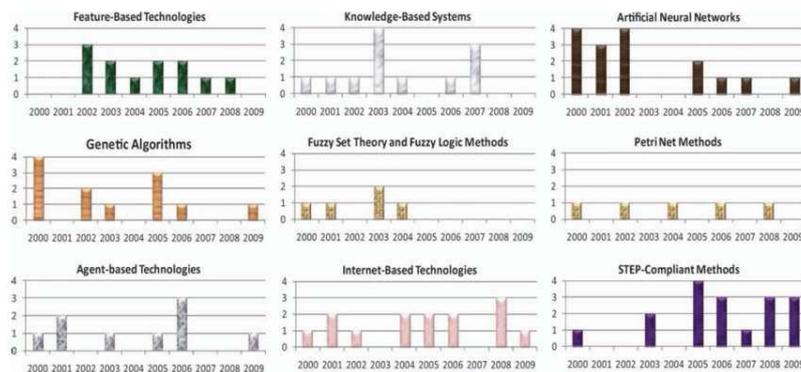


Figure 17 : Nombre de méthodes CAPP développées par technologie et par année (Xu et al. 2011)

Nous observons sur la Figure 17, l'intérêt croissant pour les méthodes permettant de faciliter la communication entre différents départements d'une même entité de production comme, par exemple, les méthodes STEP-Compliant qui permettent de lier conception et fabrication pour le design et une production optimale d'une pièce.

Un grand nombre des systèmes de génération de gamme présentés dans les différents états de l'art cités ci-dessus sont prévus pour s'adapter aux diverses contraintes et connaissances d'un atelier, de manière à personnaliser la définition d'une gamme optimisée pour l'utilisateur final de cette gamme. Ils sont également capables de reconnaître et d'organiser différentes entités géométriques, de procéder à une sélection et un

séquencement des machines et outils utilisables, d'acquérir de l'expérience venant de l'atelier, de s'adapter en temps réel aux contraintes de l'atelier et à l'état des diverses machines le composant, etc...

Néanmoins, peu de ces systèmes ont réellement réussi à percer le milieu industriel. En effet, nombre de ces systèmes étant très fortement automatisés (systèmes génératifs) et les autres étant spécifiques à une typologie de pièces, ils demandent une grande quantité d'informations au préalable pour pouvoir être exécutés, ainsi qu'un retour d'informations quasi-continu afin de pouvoir s'adapter à l'état évolutif de l'atelier. Ceci suppose un atelier doté de moyens de mesure avancés, certes disponibles sur les machines d'usinage récentes. Ainsi l'équipement d'un atelier de production par enlèvement de matière induit non seulement une lourdeur de mise en place et de maintien du bon fonctionnement, mais également un surcoût financier non négligeable et ce, même pour des entreprises de taille respectable.

7. Précision et fiabilité des gammes générées

L'évaluation de la performance d'un outil de génération de gammes repose sur la qualité des gammes obtenues. En particulier, deux critères sont importants. Le premier concerne la précision de la gamme dans l'estimation de sa performance. En effet, comme le critère de performance sert à comparer la gamme, il convient que celui-ci soit suffisamment précis pour que la comparaison soit bonne.

Le second concerne la fiabilité de la gamme générée et sa mise en œuvre réelle. Il faut que la gamme générée soit mise en œuvre facilement et sans risque en situation industrielle, ou avec un niveau de risque contrôlé.

Pour des processus de fabrication de pièces en petite série, dont la génération de la gamme est encore faiblement automatisée, comme c'est le cas pour notre contexte d'étude, il faut remarquer que les variations et incertitudes sur la performance d'une gamme liées à l'humain ainsi qu'à la technologie sont difficilement appréhendables de manière intuitive, car la formalisation du processus reste incomplète ou insuffisamment précise. En particulier, les opérations de forge produisent des pièces dont l'usinabilité et le volume usinable sont variables et dont cette variabilité impacte la précision de génération de la gamme. En particulier, l'interaction entre l'opérateur et le processus est un facteur important de perte de performance si l'opérateur se défie de la gamme générée. La confiance est alors un gisement de gain important jusqu'alors très peu étudié par les chercheurs, du moins dans le domaine de la fabrication (Hupman et al., 2015).

8. Conclusion

Il a été montré dans cet état de l'art que les systèmes CAPP développés jusqu'à présent utilisent des technologies très diverses et que la tendance est à la complexification et la modification en dynamique des gammes de fabrication en fonction de l'état opérationnel de l'atelier. Or, la plupart des systèmes récents nécessitent pour cela un niveau élevé d'instrumentation et de monitoring des installations opérationnelles. Il apparaît compliqué, dans le contexte de ces travaux de recherche, de pouvoir adapter un ou plusieurs systèmes existants aux cas d'application énoncés. En effet, dans un contexte d'ébauche de pièces matricées de grandes dimensions, avec des processus de fabrication faiblement automatisés, il apparaît complexe de vouloir

développer un nouveau système qui soit du même niveau d'automatisation que les systèmes développés jusqu'ici, non seulement d'un point de vue financier mais également du point de la vue de la facilité de mise en place et d'utilisation. La réactivité étant devenue un élément crucial de performance pour les sous-traitants de l'industrie aéronautique, il peut être intéressant d'orienter la réflexion sur la définition d'un système CAPP adapté à une utilisation réelle au sein d'un atelier de production.

Chapitre 3 : Identification des indicateurs de performance d'une gamme de fabrication et des risques techniques associés

1. Introduction

La recherche d'une gamme optimale ou plus performante impose de définir des indicateurs de performance permettant de comparer les gammes candidates entre elles.

Les indicateurs de performance permettent de qualifier la performance d'une gamme d'usinage suivant différents critères. Une analyse de la littérature montre que les critères classiquement utilisés pour définir la performance d'une gamme d'usinage reposent sur le triptyque Productivité / Délai – Coût – Qualité (Conradie, Dimitrov, & Oosthuizen, 2016; Iqbal et al., 2007; Karandikar & Kurfess, 2015; B. Y. Lee & Tarng, 2000; Leonesio, Molinari Tosatti, Pellegrinelli, & Valente, 2013; Vivancos et al., 2004).

La productivité est liée au temps d'exécution d'une pièce. Elle est définie directement comme le temps de fabrication d'une pièce (cas de petites ou moyennes séries) ou le nombre de pièces produites sur un temps donné (cas de grandes séries). Les critères retenus sont donc le temps de fabrication ou la cadence.

Le coût d'une fabrication est obtenu à partir d'un modèle de coût plus ou moins détaillé qui prend en compte l'ensemble des charges intervenant durant l'usinage. Généralement, on dissocie les coûts directs, liés à l'utilisation des machines et des outils permettant la fabrication, et les coûts indirects, liés à l'utilisation des ressources de l'atelier et de l'environnement. Certains coûts sont considérés comme fixe, alors que d'autres sont variables.

La qualité géométrique du produit est plus un critère d'acceptation qu'un critère de performance. En effet, on cherche à valider le respect d'un seuil minimal de qualité et non de maximiser la qualité du produit. La qualité géométrique de l'usinage est le plus souvent liée à l'état de surface laissé après usinage. Elle peut aussi concerner le respect des spécifications dimensionnelles ou géométriques.

Par la suite, d'autres critères peuvent être ajoutés. Ainsi, avec la prise de conscience écologique actuelle, de nouveaux critères de performance ont fait leur apparition. Ces critères visent à prendre en compte la consommation énergétique des machines comme performance essentielle d'une gamme d'usinage (Leonesio et al., 2013). L'insertion de ces considérations écologiques vise à produire des gammes a priori plus respectueuses de l'environnement.

Dans ce chapitre, sont présentés les indicateurs utilisés dans nos travaux pour qualifier la performance d'une gamme d'usinage. Pour chacun de ces indicateurs, la définition qualitative et la formulation sont détaillées. Dans un second temps, nous abordons la problématique de risque liée à la mise en œuvre d'une gamme. Nous proposons la formulation du concept de risque technique associé à une gamme d'usinage, et définissons un indicateur à prendre en compte dans la sélection finale de la gamme. Le risque technique quantifie l'impact des paramètres de la gamme sur la survenue d'un aléa de fabrication. Il vise à répondre

numériquement à la question : « est ce que les conditions d'usinage retenues par cette gamme risquent de produire des casses d'outils ou de produire des pièces non conformes ? ». Ce dernier indicateur intègre les exigences de qualité en dessous desquelles une gamme n'est pas retenue.

2. Indicateurs de Productivité

Usuellement, le processus d'optimisation d'une gamme de fabrication s'intéresse à la pièce générique sans prendre en compte les notions de planification, de série ou d'ordonnancement mono ou multi-produits. En effet, une optimisation globale, qui intégrerait l'environnement de fabrication de l'atelier, reste encore trop complexe et nécessite un paramétrage très important difficile à mettre en œuvre. Les indicateurs présentés par la suite sont donc relatifs au temps de fabrication d'une seule pièce.

2.1 Temps à Valeur Ajoutée

Le temps à Valeur Ajoutée (VA) correspond au temps pendant lequel la machine est considérée comme générant de la plus-value à la pièce en production. Dans le cas de l'usinage, ce temps VA correspond au temps où l'outil coupant est au contact de la matière. L'étude bibliographique a montré qu'une estimation précise du temps d'usinage demande un nombre important d'informations et de calculs, et, dans la plupart des cas, ne peut se faire avant la définition complète d'une gamme (Hassini, 2015).

En effet, il est possible d'estimer le temps d'usinage suivant plusieurs modèles, comme développé dans le chapitre précédent. Dans le cadre de cette thèse, la généralité attendue nous conduit à choisir un estimateur basé sur le rapport entre l'estimation du trajet d'usinage selon la forme de l'entité à usiner et la vitesse d'avance programmée. Par hypothèse, les vitesses d'avance estimées sont suffisamment faibles pour que les phénomènes cinématiques de ralentissement ne soient pas pris en compte. En effet, lors de l'usinage d'alliage de titane, le diamètre des outils généralement important, induit une vitesse d'avance assez faible de l'ordre de quelques centaines de millimètre par minute, que les moteurs d'axe des machines à commande numérique atteignent sans difficultés.

L'application première de ces travaux étant l'usinage de géométries simples, le trajet d'usinage peut être modélisé comme un trajet élémentaire L_{unit} répété par le nombre de fois où l'outil se déplace en axial et le nombre de fois où l'outil se déplace en radial. La Figure 18 illustre les différents déplacements de l'outil.

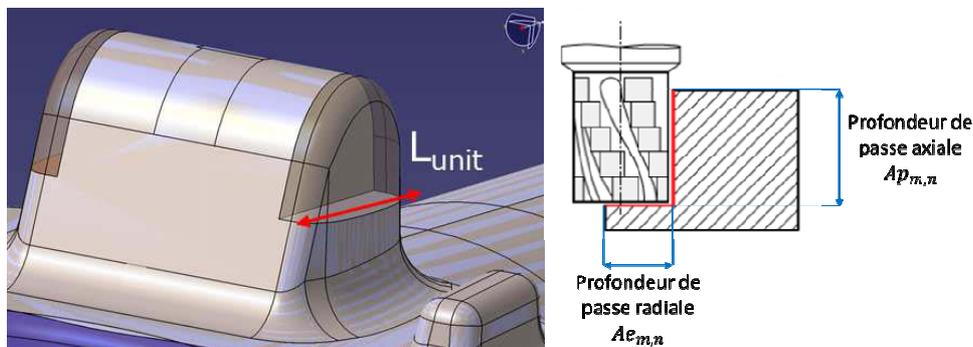


Figure 18 : Paramétrage de la trajectoire outil pour l'opération n de la gamme m .

- Soit $Op'_{m,n}$ l'opération élémentaire n de la gamme m .

- Soit $L_{unit\ m,n}$ la longueur du trajet élémentaire de l'opération élémentaire n de la gamme m . $L_{unit\ m,n}$ est déterminé par le methodiste.
- Soit $Vf_{m,n}$ la vitesse d'avance de l'outil pour l'opération élémentaire n de la gamme m . $Vf_{m,n}$ est déduit des conditions de coupe et de l'outil sélectionné.
- Soit $Npax_{m,n}$ le nombre de fois où l'outil se déplacement axialement pour l'opération élémentaire n de la gamme m .
- Soit $Nprad_{m,n}$ le nombre de fois où l'outil se déplacement radialement pour l'opération élémentaire n de la gamme m .

Le temps d'usinage de l'opération élémentaire n de la gamme m , noté $Tc'_{m,n}$, peut donc être exprimé par l'équation (1).

$$Tc'_{m,n} = \frac{L_{unit\ m,n} \times Npax_{m,n} \times Nprad_{m,n}}{Vf_{m,n}} \quad (1)$$

Le temps d'usinage de la gamme, noté Tc_m sera ensuite estimé par l'équation (2).

$$Tc_m = \sum_{n=1}^N Tc'_{m,n} \quad (2)$$

2.2 Temps à Non-Valeur Ajoutée

Les temps à Non-Valeur Ajoutée (NVA) concernent tous les temps pendant lesquels l'outil ne coupe pas. Ce sont des temps de manutention, de réorientation ou de changement d'outils. Ces temps à NVA peuvent être d'une extrême importance comme l'a démontré une étude SMED réalisée dans cet atelier. Cette étude a permis de mettre en avant que les temps à NVA représentent jusqu'à 40% du temps total de fabrication en usinage. Parmi ces temps NVA, les plus importants sont les temps liés aux manipulations des outils coupants (changement d'outils, de plaquettes) qui valent pour près de 10% du temps de fabrication et les temps liés au fonctionnement de l'atelier (repas, passage de consignes, conduite en double) qui représentent jusqu'à 15% du temps total de fabrication.

Entre deux opérations $n - 1$ et n d'une gamme m , l'outil peut être amené à changer d'orientation. Ce changement représente un temps non productif mais nécessaire à l'exécution de la gamme. Il est variable en fonction de la machine et des technologies présentes pour effectuer ce changement. Par ailleurs, il dépend de l'angle de changement.

Soit α_n l'angle de changement entre l'axe de l'opération $n - 1$ et l'axe de l'opération n .

Soit $Vect_{\alpha_n}$, le vecteur de changement d'orientation pour l'opération n .

$$Vect_{\alpha_n} = \begin{cases} [1 & 0 & 0] \text{ si } \alpha_n = 90^\circ \\ [0 & 1 & 0] \text{ si } \alpha_n = 180^\circ, \\ [0 & 0 & 1] \text{ si } \alpha_n = 270^\circ \end{cases}$$

*Chapitre 3 : Identification des indicateurs de performance
d'une gamme de fabrication et des risques techniques associés*

Le Tableau 1 propose un extrait de la table de conversion entre les axes de deux opérations élémentaires consécutives et la valeur de l'angle α_n . Cette table est fournie par les méthodistes et elle permet de déterminer $Vect_{\alpha_n}$ pour chaque opération n en fonction de l'opération $n - 1$.

Axe		Angle de changement α		
$n - 1$	n	90°	180°	270°
X-	Z+	0	1	0
X-	Z-	0	0	0
X-	Y-	1	0	0
X-	Y+	0	0	1
Z+	Z-	0	1	0
Z+	Y-	0	0	1
Z+	Y+	1	0	0
Z+	X-	0	1	0
Z-	Z+	0	1	0
Z-	Y-	1	0	0
Z-	Y+	0	0	1
Z-	X-	0	0	0
Y-	Z+	1	0	0
Y-	Z-	0	0	1
Y-	Y+	0	1	0
Y-	X-	0	0	1
Y+	Z+	0	0	1
Y+	Z-	1	0	0
Y+	Y-	0	1	0
Y+	X-	1	0	0

Tableau 1 : Matrice de correspondance entre les axes de deux opérations consécutives et l'angle α .

Soit $Tcho_{unit \alpha}$ le vecteur du temps de changement d'orientation outil unitaire en fonction de l'angle α pour $\alpha \in \{90, 180, 270\}$. Ce vecteur est lié à la machine et ses équipements. C'est donc une donnée d'entrée fournie par les méthodistes. Pour notre cas d'étude, par exemple, $Tcho_{unit \alpha} = [0.2, 0.4, 0.6]$; $Tcho_{unit \alpha}$ étant exprimé en minutes.

Le temps total dû aux changements d'orientation d'une gamme m , noté $Tcho_{tot m}$, peut donc être calculé à partir de l'équation (3).

$$Tcho_{tot m} = \sum_{n=2}^N Vect_{\alpha_n} \times Tcho_{unit \alpha} \quad (3)$$

Dans certains cas, un changement d'orientation de l'outil de coupe ne peut s'effectuer sans la mise en place sur la machine d'accessoires appropriés, comme par exemple, une tête à renvoi d'angle pour passer de l'orientation verticale de l'outil à l'orientation horizontale de l'outil. Cette mise en place peut s'effectuer de manière automatique ou manuelle et induit un temps improductif supplémentaire.

Soit $Tcha_{unit}$ le temps unitaire de changement d'accessoire. Ce temps est une donnée d'entrée fournie par les méthodistes en fonction de la machine.

*Chapitre 3 : Identification des indicateurs de performance
d'une gamme de fabrication et des risques techniques associés*

Dans notre cas d'étude, $Tcha_{unit} = 5 \text{ min}$

Soit $Xacc_{n,\alpha}$ la variable représentant un changement d'accessoire pour l'opération n , où

$$Xacc_{n,\alpha} = \begin{cases} 1 & \text{si un changement d'accessoire est requis pour l'opération } n, \text{ pour } n = 2, N \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$Xacc_{n,\alpha}$ est déterminé à partir de la table de conversion donné par les méthodistes et dépend aussi de la machine. Le Tableau 2 illustre la table de conversion pour notre cas d'étude.

Axe de l'opération $n - 1$	Axe de l'opération n	Existence d'un changement d'accessoire $Xacc_{n,\alpha}$
X-	Z+	1
X-	Z-	1
X-	Y-	1
X-	Y+	1
Z+	Z-	0
Z+	Y-	0
Z+	Y+	0
Z+	X-	1
Z-	Z+	0
Z-	Y-	0
Z-	Y+	0
Z-	X-	1
Y-	Z+	0
Y-	Z-	0
Y-	Y+	0
Y-	X-	1
Y+	Z+	0
Y+	Z-	0
Y+	Y-	0
Y+	X-	1

Tableau 2 : Matrice de correspondance entre les changements d'axe et la nécessité d'un changement d'accessoire.

Le temps de changement d'accessoire de la gamme m , noté $Tcha_{tot m}$, peut donc être déterminé à partir de l'équation (4)

$$Tcha_{tot m} = \sum_{n=2}^N Xacc_{n,\alpha} \cdot Tcha_{unit} \tag{4}$$

2.3 Temps liés aux utilisations des outils de coupe

De manière analogue aux temps de changements d'orientation, les temps liés aux changements d'outils sont des temps improductifs qui impactent fortement la performance de la gamme. La recherche de gain de performance peut pousser le méthodiste à utiliser pour chaque opération l'outil le plus performant. Néanmoins, cette recherche de performance pourra induire une diversité d'outil importante qui engendrera

*Chapitre 3 : Identification des indicateurs de performance
d'une gamme de fabrication et des risques techniques associés*

des temps de changement d'outil importants et donc qui pourra annuler le gain de performance en temps d'usinage. Il est donc important de suivre cet indicateur dans le cadre qui nous concerne.

Soit $Tcht_{unit}$, le temps unitaire de changement d'outil. Ce temps, défini par les methodistes, dépend de la machine et de la technologie disponible mais également de l'équipement de la machine ou de la technologie employée par le changeur d'outils.

Soit $Outil_{n,m}$ l'outil utilisé pour l'opération élémentaire n de la gamme m .

Soit $Xacc_{n,m}$ la variable représentant un changement d'outil entre l'opération élémentaire n et l'opération élémentaire $n - 1$ de la gamme m

$$Xacc_{n,m} = \begin{cases} 0 & \text{pour } n = 1 \\ 1 & \text{si } Outil_{n,m} \neq Outil_{n-1,m} \text{ pour tout } n = 2, \dots, N \\ 0 & \text{si } Outil_{n,m} = Outil_{n-1,m} \text{ pour tout } n = 2, \dots, N \end{cases}$$

Le temps de changement d'outil $Tcha_{tot m}$ de la gamme m se calcule selon l'équation (5).

$$Tcht_{tot m} = \sum_{n=1}^N Xacc_{n,m} \times Tcht_{unit} \quad (5)$$

Les temps de changement de plaquettes correspondent au temps passé lors des changements des plaquettes de coupe d'un outil. Il est en effet nécessaire de devoir changer les arêtes de coupe régulièrement, de manière à limiter les risques de casse-outil et conserver l'intégrité de la surface usinée. Lorsqu'un outil est dit monobloc, il ne possède pas d'arêtes de coupe rapportées, ainsi un changement de plaquette équivaut à un changement d'outil. A contrario, un outil à arêtes rapportées, par exemple à plaquettes, n'a pas besoin d'être changé entièrement pour pallier aux phénomènes d'usure. Le nombre de changements associé à l'outil utilisé peut être aussi modélisé par le rapport entre le temps d'usinage et la durée de vie des outils. En effet, dans le cas de fabrication de pièces de grandes dimensions en matériaux dur, les casses outils sont des événements aléatoires qui peuvent subvenir, malgré toutes les précautions prises. Ainsi, il est plus courant d'inclure des changements d'outils programmés à certains stades des opérations d'usinage. Le temps de changement de plaquettes d'une gamme est calculé de la manière suivante.

Soit Tcp_{unit} , le temps de changement unitaire de l'ensemble des plaquettes d'un outil. Ce temps est une donnée d'entrée et fourni par les methodistes. Il dépend des technologies équipant la machine-outil concernée. Ce paramètre représente la portion de temps non masqué qui immobilise la machine d'usinage. Il peut être fortement réduit, selon les évolutions organisationnelles, mais n'est pas nul.

Soit $Cy_{p,n,m}$ le cycle de l'opération n de la gamme m . Un cycle peut être par exemple un contournage, un alésage, un taraudage, etc

Soit $DDV_{o,n,m,p}$ la durée de vie de l'outil $Outil_{n,m}$ pour le cycle $Cy_{p,n,m}$.

Soit $Nbpo_{n,m}$ le nombre de plaquettes de l'outil utilisé pour l'opération élémentaire n de la gamme m .

$Tc_{m,n}$, (cf. section 2.1), définit ainsi le temps pendant lequel l'arête de coupe est en contact avec la matière.

Le temps de changement de plaquettes pour l'opération n de la gamme m , noté $Tcp_{m,n}$, se calcule donc selon l'équation (6).

$$Tcp_{m,n} = \left\lfloor \frac{Tc_{m,n}}{DDVo_{n,m,p}} \right\rfloor \times Nbp_{o_{n,m}} \times Tcp_{unit} \quad (6)$$

Le temps de changement de plaquettes pour la gamme m , noté Tcp_m , se calcule donc selon l'équation (7).

$$Tcp_m = \sum_{n=1}^N Tcp_{m,n} \quad (7)$$

2.4 Coût carbure

Dans un premier temps, nous proposons un indicateur basé sur les coûts directs. Cet indicateur peut évoluer par la suite, pour mieux s'adapter à la structure de coût analytique mis en œuvre par l'entreprise. Traditionnellement, le coût est considéré comme la somme du coût machine correspondant au temps de mise en œuvre de la machine pour réaliser la pièce et du coût des consommables correspondants à l'outillage utilisé pour réaliser la pièce, dont les outils de coupe représentent la majeure partie.

Dans notre cas d'étude, le coût est pris en compte dans la prise de décision par l'évaluation des temps énumérés précédemment. Il convient de formaliser le coût d'utilisation des outillages. Le coût carbure représente la part du coût impacté par l'utilisation des outils en vue de la fabrication de la pièce, ou de l'exécution de la gamme. Dans le cas d'usinage de matériaux durs dont les caractéristiques mécaniques de la pièce sont importantes et assez variables, il est difficile d'obtenir une prédiction fiable de la durée de vie des outils de coupe. Ces pièces étant de grandes dimensions, le temps peut être relativement long (ordre de grandeur de quelques dizaines d'heures) ce qui implique qu'une part relativement importante de phénomènes aléatoires peut avoir lieu.

L'expérience montre ainsi une grande variabilité de l'usure pour des séries de pièces données. Ainsi, pour garantir une bonne sécurité d'usinage, la durée de vie est définie arbitrairement a priori. Dans ce cas, le calcul du coût carbure est obtenu de la manière suivante.

Soit $Ccto_{n,m}$ le coût unitaire d'une plaquette de l'outil $Outil_{n,m}$. Ce coût unitaire sera une donnée d'entrée fournie par les méthodistes.

Le nombre de plaquettes changées durant l'opération élémentaire n de la gamme m , noté $Ncp_{m,n}$ est obtenu à partir de l'équation (8).

$$Ncp_{m,n} = \left\lfloor \frac{Tc'_{m,n}}{DDVo_{n,m,p}} \right\rfloor \times Nbp_{o_{n,m}} \quad (8)$$

*Chapitre 3 : Identification des indicateurs de performance
d'une gamme de fabrication et des risques techniques associés*

Le coût carbure de la gamme m , noté Cct_m , est défini par l'équation (9).

$$Cct_m = \sum_{n=1}^N Ncp_{m,n} \cdot Cct_o \quad (9)$$

3. Risques techniques en usinage

L'augmentation de la performance d'un usinage passe généralement par l'augmentation de la valeur d'une ou de plusieurs conditions de coupe, qui nécessairement vont élever aussi le niveau de risque de l'opération.

Durant une opération d'usinage, plusieurs phénomènes peuvent altérer fortement voire empêcher la réalisation d'une forme répondant à des spécifications géométriques :

- Altération de l'état de surface à cause de vibrations induites par l'usinage ;
- Altération de l'état de surface à cause d'une usure excessive de l'arête de coupe ;
- Altération de la forme à cause d'une déformation de l'outil trop importante ;
- Arrêt de l'usinage à cause d'une usure excessive de l'arête de coupe ;
- Arrêt de l'usinage à cause d'une rupture de l'outil ou de la partie active de l'outil.

Tous ces aléas présentent des conséquences importantes en termes de processus, qui peuvent annuler les gains de productivité espérés. En effet, ils nécessitent un arrêt de production, une analyse du phénomène, la mise en place d'un processus dérogatoire, qui perturbe le flux de production. De même, le rebut d'une pièce à ce niveau de processus est catastrophique. Ces aléas induisent aussi une augmentation du stress et une perte de confiance chez les opérateurs. La perte de confiance est directement associée à la compétence de l'opérateur, qui lui apporte plus de maîtrise et de réactivité face à l'aléa. La perte de confiance joue un rôle critique dans l'optimisation d'une gamme et les gains en performance, car elle peut anéantir l'ensemble du travail et des gains attendus, si la confiance est rompue ou si l'opérateur se trouve dans un niveau de stress trop important.

L'analyse des aléas montre que deux phénomènes sont prépondérants dans la formalisation de critères de risques : l'usure des outils et la flexion de l'outil.

La définition des phénomènes d'usure, et leur impact sur la performance des outils de coupe, n'est pas encore suffisamment formalisée pour pouvoir permettre une prédiction fiable de leur durée de vie, dans notre cas d'étude. Cela est dû à la typologie des pièces à fabriquer qui présentent une certaine variabilité dimensionnelle. Ainsi, les conditions peuvent varier brusquement durant l'usinage. On peut estimer que ces variations soient néfastes à la durée de vie de l'outil, bien que la littérature ne le mentionne pas. Pour pallier ce problème, les méthodistes proposent des conditions de coupe a priori fiables dans une situation similaire connue, à partir de son savoir-faire. Néanmoins dans le cas de nouvelles fabrications, de nouveaux matériaux à

usiner ou la mise en place de nouveaux outils de coupe au sein d'une fabrication, les connaissances sont faibles voire inexistantes et la prise de risque pour conserver la performance peut devenir trop importante.

Le second phénomène concerne la modélisation de la flexion de l'outil qui engendre à la fois un mauvais défaut de forme, des vibrations et une rupture de l'outil. La modélisation de la flexion de l'outil est une problématique beaucoup étudiée dans la littérature. Citons quelques travaux de références (Chanal, Duc, & Ray, 2006; Dépincé & Hascoët, 2006a, 2006b; Suh, Cho, & Hascoet, 1996). Généralement, le modèle utilisé repose sur une modélisation plus ou moins précise de l'outil et de l'effort de coupe. La modélisation de l'outil est basée sur une modélisation de type poutre soumise à une flexion simple qui prend en compte ou non la géométrie de la goujure. Il est possible de considérer l'outil comme un cylindre de diamètre égal au diamètre de l'outil, ou comme un cylindre équivalent en termes d'inertie compte tenu de la géométrie de la goujure. Il est aussi possible de réaliser un calcul par éléments finis. La modélisation des efforts de coupe repose sur une analyse géométrique de la formation du copeau qui permet de proposer un torseur d'action mécanique équivalent soit situé en un point de l'arête de coupe, soit diffusé tout au long de l'arête de coupe. Un second problème concerne l'identification des constantes du modèle, généralement défini par la pression spécifique de coupe « Kc » à partir d'essais de coupe.

3.1 Proposition d'un indice de risque pour une opération d'usinage

Pour définir le risque technique unitaire associé à une opération, il est donc nécessaire de définir un modèle d'estimation de ce risque (Figure 19).

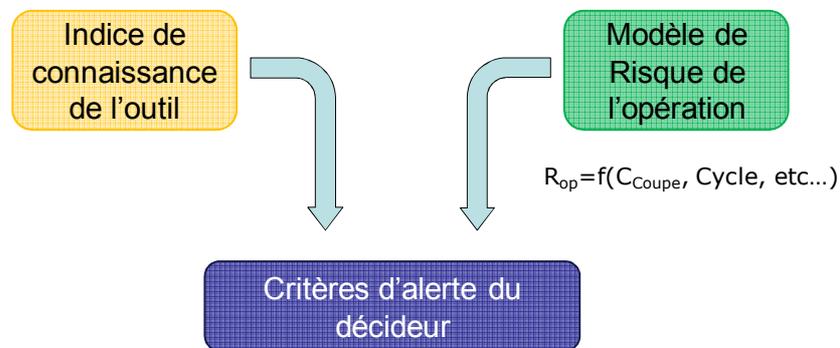


Figure 19 : Modélisation de l'indice de risque d'une opération d'usinage

En fonction des conditions d'usinage, le modèle estime une valeur de risque, qui doit être comparée à un critère d'alerte, pour conclure quant à l'importance du risque. Nous avons complété ce modèle usuel en intégrant un indice de connaissance de l'outil qui permet au préparateur méthode d'ajuster le critère d'alerte en fonction de sa connaissance plus ou moins effective de l'outil utilisé.

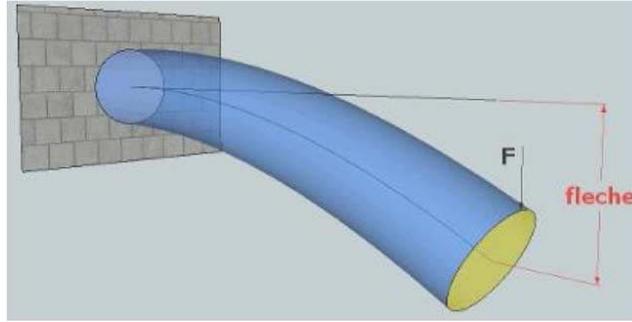


Figure 20 : Modélisation d'une poutre encastrée en flexion simple

Le modèle de risque est basé sur la modélisation d'une poutre en flexion, en considérant que les phénomènes dynamiques sont faibles dans le cas d'usinage étudié (Figure 20). Pour simplifier l'approche et les calculs, nous considérons l'outil comme un cylindre plein de diamètre $D_{outil,n,m}$.

Dans un premier temps, l'effort de coupe $FC_{n,m}$ lors d'une opération n de la gamme m est estimé par l'équation (10).

- Soit Kc la force de coupe spécifique du matériau usiné
- Soit $Fz_{n,m}$, l'avance à la dent pour l'opération n de la gamme m
- Soit $Ap_{n,m}$ la profondeur de passe axiale pour l'opération n de la gamme m
- Soit $Ae_{n,m}$ l'engagement radial pour l'opération n de la gamme m
- Soit $Z_{outil,n,m}$ le nombre de dents de l'outil utilisé pour l'opération n de la gamme m
- Soit $D_{outil,n,m}$ le diamètre de l'outil utilisé pour l'opération n de la gamme m
- Soit $L_{outil,n,m}$ la longueur de l'outil utilisé pour l'opération n de la gamme m
- Soit $I_{outil,n,m}$ le moment quadratique de l'outil utilisé pour l'opération n de la gamme m

$$FC_{n,m} = Kc * Fz_{n,m} * Ap_{n,m} * \frac{Z_{outil,n,m} * Ae_{n,m}}{D_{outil,n,m}} * \frac{60}{\pi} \quad (10)$$

En se basant sur le calcul d'une flèche f d'une poutre de longueur L dans un matériau de module d'Young E et de moment quadratique I , en flexion simple, la flexion induite sur l'outil pour l'opération n de la gamme m , notée $f_{n,m}$, est calculée à partir de l'équation (11).

$$f_{n,m} = \frac{FC_{n,m} \times L_{outil,n,m}^3}{3 \times E \times I_{outil,n,m}} \quad (11)$$

En remplaçant $FC_{n,m}$ et $I_{outil,n,m}$ par leurs expressions, la flexion induite est calculée par l'équation (12).

$$f_{n,m} = \frac{1280}{\pi^2} \times \frac{Kc}{E} \times Fz_{n,m} \times Z_{outil_{n,m}} \times Ap_{n,m} \times Ae_{n,m} \times \frac{L_{outil_{n,m}}^3}{D_{outil_{n,m}}^5} \quad (12)$$

Plusieurs termes de cette formule peuvent être spécifiés :

- Le terme $\frac{Kc}{E}$ est dépendant du couple {Matériau usiné ; Matériau usinant}. Ce terme est constant pour une fabrication si les hypothèses d'iso résistance des corps d'outils et d'homogénéité des matériaux sont faites.
- Le terme $Fz_{n,m} \times Z_{outil_{n,m}} \times Ap_{n,m} \times Ae_{n,m}$ est dépendant des conditions de coupe de l'opération n pour la gamme m .
- Le terme $\frac{L_{outil_{n,m}}^3}{D_{outil_{n,m}}^5}$ est dépendant des caractéristiques géométriques de l'outil sélectionné par les méthodistes pour l'opération n pour la gamme m .

Nous proposons de nous focaliser sur les caractéristiques de l'opération d'usinage pour déterminer le risque de l'opération n pour la gamme m , noté $Rop_{n,m}$. Ainsi à partir de l'équation (12), seuls les termes concernant la géométrie du corps d'outil utilisé et les conditions de coupe pour l'opération n pour la gamme m sont conservés dans l'équation de calcul de $Rop_{n,m}$.

$$Rop_{n,m} = Fz_{n,m} \times Z_{outil_{n,m}} \times Ap_{n,m} \times Ae_{n,m} \times \frac{L_{outil_{n,m}}^3}{D_{outil_{n,m}}^5} \quad (13)$$

Cette valeur de risque n'a pas de sens dans l'absolue. C'est pourquoi il est nécessaire de la comparer à une valeur maximale admissible, notée $R_{seuil_{n,m}}$. Celle-ci est calculée à partir du ressaut maximal admissible pour l'opération n pour la gamme m , noté $Ressaut_{n,m}$, ainsi que des caractéristiques des matériaux usinant et usiné sur l'opération de finition suivante grâce à l'équation (14).

$$R_{seuil_{n,m}} = \frac{Ressaut_{n,m} \times \pi^2 \times E}{1280 \times Kc} \quad (14)$$

Nous proposons de définir l'indice de risque de l'opération n pour la gamme m , noté $IRop_{n,m}$, par l'équation (15). L'objectif est de minimiser cet indice de risque.

$$IRop_{n,m} = \frac{Rop_{n,m}}{R_{seuil_{n,m}}} \quad (15)$$

3.2 Formalisation de l'indice de risque d'une gamme.

Nous venons de proposer un indice de risque pour chacune des opérations d'une gamme. Néanmoins, il est nécessaire d'évaluer le risque global d'une gamme pour que le méthodiste puisse choisir en fonction du caractère risquée ou non de celles-ci. C'est pourquoi il est nécessaire d'agréger les différents indices de risque des opérations qui composent la gamme en un indicateur unique.

*Chapitre 3 : Identification des indicateurs de performance
d'une gamme de fabrication et des risques techniques associés*

Une première approche pour calculer l'indice de risque d'une gamme, noté IRg_m , serait de faire la moyenne des indices de risque des opérations qui composent la gamme, ce qui correspondrait à une attitude du méthodiste neutre face au risque. Or il nous semble important à cette étape de prendre en compte le contexte dans lequel se situe le méthodiste au moment de la génération de la gamme optimale et son attitude face au risque.

Cette attitude face au risque reste une caractéristique intrinsèque et propre à chaque individu pouvant influencer grandement les décisions (Arbis, Dixit, & Rashidi, 2016; Fujimoto & Takahashi, 2016).

Nous proposons de prendre compte trois autres attitudes classiques face au risque :

- une aversion au risque (attitude pessimiste),
- une attitude de compromis,
- une préférence pour le risque (attitude optimiste).

Par la suite nous définirons un indice de risque pour la gamme pour chacune de ces attitudes.

Afin d'illustrer les différentes attitudes possibles, prenons l'exemple de trois gammes de fabrication fictives, composées chacune de trois opérations. Dans le Tableau 3 est reportée pour chaque gamme une valeur de l'indice de risque de chaque opération. La particularité de ces trois gammes fictives est d'avoir une valeur de risque moyen identique égale à 0,5.

	Gamme 1	Gamme 2	Gamme 3
OP1	0,2	0,5	0,4
OP2	0,5	0,5	0,5
OP3	0,8	0,5	0,6

Tableau 3 : Exemple de gammes de fabrication

Attitude Optimiste : critère de Min Min.

Une attitude optimiste de la part du méthodiste revient à raisonner sur le risque le plus faible sur l'ensemble des opérations d'une gamme. L'indice de risque d'une gamme avec un méthodiste enclin au risque, noté IRg_m^{optim} , peut être calculé par l'équation (16).

$$IRg_m^{optim} = \min_n(IRop_{m,n}) \quad (16)$$

Ainsi lorsque le méthodiste doit choisir la gamme qui a le meilleur indice de risque, il opte pour la gamme qui minimise le minimum des indices de risque de l'ensemble des opérations qui compose la gamme. Dans l'exemple proposé, la gamme avec le risque minimale le plus faible est la gamme 1. Celle-ci sera donc choisie par le méthodiste. L'objectif de décision du méthodiste optimiste par rapport à cet indicateur est donc le suivant, pour toutes les gammes envisagées :

$$\min_m(IRg_m^{optim}) = \min_m\left(\min_n(IRop_{m,n})\right) \quad (17)$$

Attitude Neutre : Evaluation du risque moyen

Une attitude neutre de la part du méthodiste revient à considérer le risque moyen sur toutes les opérations d'une gamme. L'indice de risque pour une gamme m est alors calculé à partir de l'équation (18).

$$IRg_m^{neutre} = \sum_{n=1}^N IROP_{m,n} / N \quad (18)$$

L'objectif de décision du méthodiste neutre par rapport à cet indicateur est donc le suivant :

$$\min_m (IRg_m^{neutre}) = \min_m \left(\sum_{n=1}^N IROP_{m,n} / N \right) \quad (19)$$

Dans l'exemple proposé, cette attitude ne fait pas émerger de gamme préférentielle, le risque moyen étant de 0.5 pour les trois gammes.

Attitude Pessimiste : critère de MinMax

Une attitude pessimiste de la part du préparateur méthode est équivalente à considérer comme risque de gamme le risque maximum de l'ensemble des opérations qui compose la gamme. L'indice de risque d'une gamme pour un tel méthodiste est donc calculé à partir de l'équation (20) :

$$IRg_m^{pessimiste} = \max_n (IROP_{m,n}) \quad (20)$$

L'objectif de décision du méthodiste optimiste par rapport à cet indicateur est donc le suivant :

$$\min_m (IRg_m^{pessimiste}) = \min_m \left(\max_n (IROP_{m,n}) \right) \quad (21)$$

Ainsi dans l'exemple proposé le méthodiste pessimiste privilégiera la gamme 3.

Attitude de compromis

Dans ce contexte, le méthodiste ne privilégiera pas la gamme qui a l'indice de risque minimal mais celle qui aura, peut être un indice de risque moyen sur l'ensemble des opérations un peu plus haut mais dont l'indice de risque par opération pour l'ensemble des opérations sera plus stable. Cette attitude s'approche du concepteur qui recherchera à déterminer une conception robuste, tel que l'a proposé Taguchi (Droesbeke, Saporta, & Fine, 1997) c'est-à-dire déterminer la conception qui représente le meilleur compromis entre une performance moyenne optimale et sa variabilité.

Dans notre cas, le méthodiste sélectionnera la gamme qui a l'indice moyen de risque par opération le plus faible avec la plus faible moyenne. Pour cela, Taguchi a proposé un indicateur appelé le ratio Signal / Bruit, noté S/N. Quel que soit l'objectif sur la performance à optimiser cet indicateur est toujours à maximiser. Nous proposons de reprendre ce concept pour notre problématique. Sachant que nous cherchons à minimiser le risque, le ratio signal bruit pour une gamme m serait obtenu par l'équation (22).

*Chapitre 3 : Identification des indicateurs de performance
d'une gamme de fabrication et des risques techniques associés*

$$S/N_m = -10 \log(S_m^2 + \overline{Y}_m^{-2}) \quad (22)$$

Où $\overline{Y}_m = \sum_{n=1}^N I\text{Rop}_{m,n}/N$ et S_m^2 la variance de $I\text{Rop}_{m,n}$ sur l'ensemble des opérations d'une gamme m.

L'objectif du méthodiste recherchant un compromis par rapport à cet indicateur est donc le suivant :

$$\max_m (S/N_m) = \max_m \left(-10 \log(S_m^2 + \overline{Y}_m^{-2}) \right) \quad (23)$$

Dans l'exemple proposé, cela reviendrait à choisir la gamme 2

Il vient d'être observé que l'attitude face au risque du préparateur peut influencer de manière significative la performance perçue d'une gamme d'usinage. A l'utilisation, il est pertinent de pouvoir laisser la liberté au méthodiste de changer d'attitude face au risque afin de mettre en évidence les différentes décisions qui seront prises en cas de modification.

4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, parmi les indicateurs existants dans la littérature, les indicateurs de performances que nous utilisons pour décrire la performance d'une gamme d'usinage. Pour chacun des indicateurs retenus, une méthode de calcul est proposée, en tenant compte des hypothèses faites pour la modélisation de la performance.

Dans une seconde partie, une proposition de formalisation des risques liés aux conditions d'utilisation des outils coupants ainsi qu'à la connaissance du méthodiste est faite. Ces risques sont assimilés aux contraintes et aux déformations subies par l'outil coupant lors de l'usinage de manière statique, les effets dynamiques étant négligeables à cause des faibles vitesses de déplacement mises en jeu. Un indicateur de risque est formalisé pour une opération d'usinage donnée. Une méthode d'agrégation de ces risques en un risque global pour une gamme d'usinage, basée sur l'attitude face au risque du préparateur méthode, est ensuite proposée.

Les différents calculs et outils méthodologiques présentés dans ce chapitre vont permettre une évaluation des performances élémentaires des gammes, permettant de guider à la fois l'optimisation multicritère des gammes d'usinage, mais aussi assister le méthodiste dans la construction d'une solution d'usinage pertinente.

Chapitre 4 : Décision Multicritère

Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique

Dans ce chapitre, nous introduisons dans une première partie l'aide à la décision et présentons le processus décisionnel et les approches existantes. Dans une seconde partie, nous abordons l'aide à la décision multicritère et proposons un aperçu sur les méthodes existantes. Nous terminons par une comparaison de ces différentes méthodes.

Pour conclure, nous expliquons notre choix concernant la méthode d'aide à la décision multicritère que nous utiliserons pour résoudre notre problématique industrielle dans le cadre de ces travaux de recherche.

1. Avant-propos.

Ce chapitre résulte du travail collaboratif de l'équipe projet dont je fais partie travaillant au sein de l'équipe de recherche MMSI de l'Institut Pascal. L'état de l'art des approches et méthodes présenté est le fruit de plusieurs travaux de thèses et master de recherche. Il est complété et adapté aux problématiques qui nous concernent à savoir l'aide à la décision multicritère dans le cadre de la génération de gamme de fabrication optimale.

2. Introduction

Les méthodistes sont souvent appelés à prendre des décisions dans un environnement caractérisé par des évolutions rapides et multiples.

Une prise de décision est une tâche extrêmement délicate et compliquée. C'est pourquoi des outils d'aide à la décision se sont développés. Leur objectif est d'aider les décideurs à chaque fois qu'ils sont confrontés à une situation où ils doivent faire un choix.

Classiquement, l'aide à la décision ne prend en compte qu'un seul aspect ou critère cherchant ainsi à choisir une seule solution qui améliore une unique fonction économique (Kast, 2002).

Dans la réalité, les méthodistes ne se basent pas sur un seul critère. Les performances des différentes gammes peuvent être perçues de plusieurs manières et peuvent être antagoniques. Il est donc difficile de restreindre l'appréciation de la qualité des solutions dans un contexte bien déterminé à une unique dimension (Schärlig, 1985)

L'aspect multidimensionnel des situations de prise de décision auxquelles un décideur est confronté, est généralement analysé en se basant sur plusieurs critères de performance. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'aide multicritère à la décision qui permet de présenter les situations de prise de décision dans sa globalité et non de façon partielle comme dans le cas de l'approche classique d'aide à la décision.

L'aide à la décision multicritère permet alors d'impliquer le décideur dans le processus de décision afin de trouver non pas la solution optimale mais plutôt une ou plusieurs solutions dites de compromis.

C'est dans cette optique que plusieurs méthodes dites multicritères ont été développées afin de prendre en compte les différents critères et objectifs des décideurs et de les accompagner durant le processus de décision.

3. L'aide à la décision

3.1 Définition de l'aide à la décision

Selon (Roy, 1990), l'aide à la décision représente « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se posent un intervenant dans un processus de décision ».

Le « celui » est souvent appelé « analyste » et l'intervenant est appelé « décideur » (Tsoukiàs, 2008).

3.2 Approches de l'aide à la décision

Il existe différentes approches pour résoudre un problème d'aide à la décision. Nous présentons ici les quatre approches proposées par (Tsoukiàs, 2006) et repris par (Mammeri, 2013) :

- **Approche normative** : Selon cette approche le décideur n'est pas sollicité lors de la modélisation du problème car la validité des résultats est basée sur leur cohérence avec les axiomes économiques (Fishburn, 1970; Luce & Raiffa, 1957). Cette approche fournit des résultats dont la validité dépend de leur cohérence avec le raisonnement du décideur. Prenons l'exemple d'un problème de classification d'investissement en fonction de leur rentabilité économique (du plus rentable au moins rentable). . Notons A, B, C 3 investissements. Si A est plus rentable que B et que B est plus rentable que C alors A est plus rentable que C. Le classement sera donc A, B, et C.
- **Approche descriptive** : Dans cette approche, le modèle est construit à partir de l'observation de comportements et/ou de données existants d'autre phénomène de même nature. Le décideur n'est pas sollicité pour la construction de ces modèles qui sont par la suite directement appliqués (Poulton, 1994; Rico, Grabisch, Labreuche, & Chateauneuf, 2005). Elle est donc utile pour l'anticipation de phénomènes ayant déjà eu des occurrences.
- **Approche prescriptive** : Cette approche se présente lorsqu'aucune information n'est disponible. L'analyste doit collecter et formaliser les données afin de construire le modèle. Le décideur n'intervient pas dans la construction du modèle. Cependant il doit intervenir pour le valider.
- **Approche constructive** : Ce modèle est basé sur l'expérience et les connaissances des décideurs. Le décideur intervient à la fois lors de la construction du modèle et lors de sa validation. L'analyste dans cette approche a comme tâche d'explicitier les préférences, les connaissances et l'expérience du décideur ainsi que les formaliser.

Tsoukiàs a ainsi résumé les différences entre les différentes approches de la façon suivante (Tableau 4).

Approche	Caractéristiques	Comment obtenir le modèle
Normative	rationalité exogène, comportement économique	postuler
Descriptive	rationalité exogène, modèles empiriques du comportement	observer
Prescriptive	rationalité endogène, cohérence avec la situation problématique	découvrir
Constructive	processus d'apprentissage, cohérence avec le processus de décision	établir un consensus

Tableau 4 : Différence entre les différentes approches d'aide à la décision (Tsoukiàs, 2006)

3.3 Démarche de formalisation d'un processus d'aide à la décision

Le processus d'aide à la décision a été défini par (Tsoukiàs, 2008) comme « un espace d'interaction, pouvant évoluer dans l'espace et dans le temps, dans lequel tous les intervenants partagent des préoccupations qui sont parfois contradictoires (améliorer l'approvisionnement, diminuer les coûts). L'existence d'un tel espace est justifiée par la présence d'un objectif (préoccupation) final ». L'aide à la décision vient alors pour faciliter l'atteinte de l'objectif final de façon indirecte. Elle est basée sur les informations existantes, les connaissances et les expériences du décideur et ce selon l'approche considérée (normative, descriptive, prescriptive ou constructive).

Pour pouvoir décider, il est nécessaire de baser son raisonnement sur un ou plusieurs critères. Un critère est une représentation de la conséquence de la décision, mesurable ou non, ou du moins une de ses conséquences élémentaires dans le cadre de la décision multicritère (Denis Bouyssou, 1990). (Mammeri, 2013) s'est inspiré de la méthodologie présentée par (Tsoukiàs, 2008) pour formaliser le processus d'aide la décision.

Les principales étapes du processus d'aide à la décision sont les suivantes :

Représentation du problème : cette première étape consiste à analyser le problème afin d'identifier les décideurs, le rôle de chacun d'entre eux au sein du processus de décision ainsi que les préférences et les préoccupations de chacun des décideurs par rapport au problème. Il est important de définir correctement l'importance de chaque préoccupation vis-à-vis des critères ainsi que leurs possibles dépendances, de manière à rendre pertinente la décision. En effet, si les préoccupations ne sont pas modélisées de manière rigoureuse, la décision finale peut n'avoir que très peu de sens aux yeux des intervenants.

Modélisation du problème : cette étape consiste à déterminer dans un premier temps avec le décideur, sur quoi va porter la décision (l'ensemble des *actions* ou des *alternatives* possibles) ou l'objet de la décision selon (Roy & Giard, 1985). Cet ensemble, noté A , peut être défini de manière explicite (défini en extension), par exemple, un ensemble de gammes de fabrication, un ensemble de réponses à un appel d'offre, etc., ou peut être défini de manière implicite (un sous ensemble de \mathbb{R}^n défini par des contraintes, si chaque action est représentée par n composantes $x_1; \dots; x_n$ (Roy & Bouyssou, 1993). La forme de cet ensemble, pouvant évoluer avec le processus de décision, dépend fortement de la nature du problème et de la recommandation finale.

Chapitre 4 : Décision Multicritère Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique

Une action est dite *globale*, si, dans sa mise en exécution, elle est exclusive de toute action introduite dans le modèle ; dans le cas contraire, elle est dite *fragmentaire*. Une action *potentielle* est une action réelle ou fictive provisoirement jugée réaliste par un acteur au moins. A est donc l'ensemble des actions potentielles.

L'ensemble des actions correspond pour nous à l'ensemble des solutions potentielles, à l'ensemble des gammes de fabrication respectant les contraintes.

Une fois cet ensemble A défini, il est important d'identifier ce que le décideur souhaite faire, en fonction des préoccupations des différents intervenants définies à l'étape précédente. En aide à la décision, (Tsoukiàs, 2008) propose trois types de traitements pouvant être effectués sur l'ensemble A :

- Chercher uniquement à définir l'ensemble A de manière formelle sans évaluation. Cela revient à lister l'ensemble des solutions possibles vérifiant les contraintes.
- Construire un modèle afin de décrire un sous-ensemble d'actions dans un ensemble de points de vue dans le cas d'une approche descriptive (par exemple l'apprentissage en intelligence artificielle et en statistique).
- Partitionner l'ensemble A .

Le troisième traitement, également appelé *problématique* est souvent utilisé en recherche opérationnelle et en aide multicritère à la décision. Il y a trois façons de partitionner l'ensemble A selon (Roy & Giard, 1985) :

- choisir un sous ensemble d'action aussi restreint que possible, afin d'aider le décideur à choisir la meilleure action (problématique de choix, notée P_α) ;
- affecter des actions dans des catégories prédéfinies (problématique de tri, notée P_β) ;
- ranger les actions (ou un sous ensemble d'actions) selon les préférences des décideurs, de la meilleure à la plus mauvaise par exemple (problématique de rangement, notée P_γ).

Ces problématiques seront détaillées à la section 4.2

Construction du modèle d'évaluation : Après avoir défini l'ensemble des actions A ainsi que le traitement à appliquer, l'analyste doit construire le modèle sur lequel il va se fonder pour générer sa recommandation vis-à-vis du problème énoncé. Afin de pouvoir formaliser ce modèle, il a besoin de construire les *dimensions*, permettant de caractériser l'ensemble A , les *critères*, permettant d'évaluer A , et les méthodes ou les procédures permettant d'effectuer le traitement souhaité sur l'ensemble A .

Les *dimensions* représentent l'information disponible sur l'ensemble A . La collecte de l'information peut se faire, selon l'approche d'aide à la décision utilisée, avec ou sans le décideur. Cette information peut être utilisée pour évaluer l'ensemble A . Les dimensions sont généralement codées sur des échelles pour obtenir une représentation formelle de A .

Un *critère* est une dimension ou plus généralement une agrégation de dimensions traduisant un même point de vue et permettant d'évaluer les éléments de A sur ce point de vue. Dans le cas où le décideur est sollicité, la construction de ces critères prend en compte ses préférences. Nous détaillerons la notion de critère dans la section 0

Les méthodes d'évaluation sont les outils permettant d'effectuer les traitements souhaités sur l'ensemble A afin de fournir une solution au modèle (par exemple des procédures d'agrégation multicritère ou bien un algorithme pour résoudre un programme mathématique). Selon l'approche considérée, le décideur peut être sollicité pour la mise en œuvre de ces méthodes.

Construction de la recommandation finale : Les méthodes d'évaluation vont permettre à l'analyste de fournir un résultat cohérent au décideur. Mais il est possible que ce résultat ne réponde pas entièrement aux préoccupations du décideur. Ainsi l'analyste doit être en mesure d'analyser le résultat obtenu, au regard des diverses hypothèses faites durant le processus décisionnel, avant de pouvoir fournir sa recommandation finale.

Pour cela, et avant de fournir une quelconque recommandation, l'analyste doit :

- s'assurer, par le biais d'une analyse de sensibilité, que le résultat fourni par la méthode d'évaluation n'est pas très sensible à des variations jugées non significatives des données utilisées pour la construction du modèle,
- être capable d'interpréter le résultat fourni par la méthode en tenant compte des hypothèses sur les données, sur le modèle et sur l'évolution du processus de décision, sous lesquelles il a été obtenu.

4. Aide à la décision multicritère

4.1 Définition de l'aide à la décision multicritère et processus.

Lorsque les critères sont multiples, nous parlons alors de l'aide à la décision multicritère. Ces critères sont souvent conflictuels et non commensurables. (Vincke, 1994) définit l'aide à la décision multicritère de la façon suivante : elle « vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte ».

(Maystre, Pictet, & Simos, 1994) considèrent l'aide à la décision multicritère comme une analyse qui permet d'appréhender les conséquences d'une action suivant différents critères. Elle désigne aussi un ensemble de méthodes qui permettent d'agréger les différents critères dans le but de sélectionner une ou plusieurs solutions ou actions.

Contrairement à un problème monocritère, le problème multicritère n'a pas une solution optimale mais plutôt un ensemble de solutions répondant à un compromis entre les critères.

(Edwards, 1971; Raiffa, 1969) sont considérés comme les premiers chercheurs qui ont donné naissance à l'aide à la décision multicritère. L'idée de ces travaux est de formaliser les préférences des décideurs grâce à

Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique

une fonction numérique, appelée « fonction d'utilité », qui permet d'affecter des scores aux différents choix qui se présentent aux décideurs. De cette façon un classement des actions peut être établi de la moins préférée à la plus préférée (Denis Bouyssou, Marchant, Pirlot, Tsoukiàs, & Vincke, 2006).

Dans le contexte industriel, l'aide à la décision multicritère est très importante. En effet, la démarche de l'analyse de l'existant repose sur l'expérience et le bon sens du décideur face à une situation réelle et face à différents critères. L'aide à la décision multicritère permet de formaliser le processus de prise de décision et de modéliser le raisonnement du décideur (Bana e Costa, Ensslin, Cornêa, & Vansnick, 1999).

Le processus de décision multicritère complète le processus décisionnel présenté 3.3. (Nafi & Werey, 2010) précise ce processus (Figure 21).

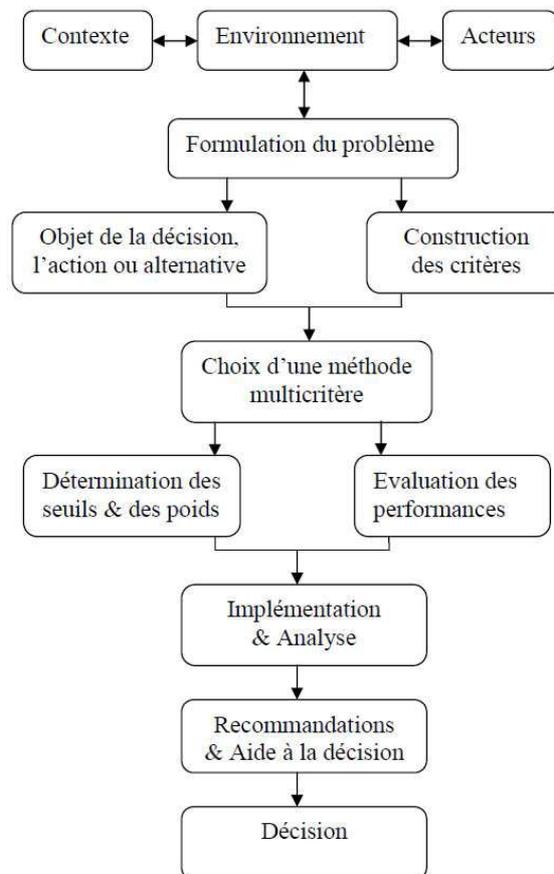


Figure 21 : Processus de décision multicritère (Nafi & Werey, 2010)(Nafi & Werey, 2010).

4.2 Typologie des problèmes d'aide à la décision multicritère

Quatre familles de problématique de décision multicritère ont été identifiées:

- Une problématique de choix, notée P_{α} ,
- Une problématique de tri ou d'affectation notée P_{β} ,
- Une problématique de rangement notée P_{γ} ,
- Une problématique de description P_{δ} .

Problématique de choix (P_α): Elle consiste à sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de l'ensemble des solutions contenant les meilleures solutions. Compte tenu de l'aspect conflictuel des critères, il est préférable de présenter au décideur un ensemble de solutions compromis plutôt qu'une seule solution. Le résultat de ce problème est un choix ou une procédure de sélection (Costa, 1996).

Problématique de tri (P_β) : Elle consiste à effectuer une partition de l'ensemble de solutions en des catégories prédéfinies. Ce problème se pose lorsque chaque solution (ou action) peut être examinée indépendamment des autres. La décision ici consiste à trier les solutions potentielles en termes de normes préétablies de façon à ce que chaque solution soit affectée à une seule catégorie (Mousseau, 1993).

Problématique de rangement (P_γ) : Elle consiste à ordonner les différentes solutions de la meilleure à la moins bonne. Compte tenu de la nature conflictuelle des critères, il est difficile d'obtenir un ordre complet des solutions et par la suite il est possible de présenter au décideur un ordre partiel (Mousseau, 1993).

Problématique de description (P_δ) : Elle consiste juste à présenter une description des solutions ainsi que leurs conséquences et non pas à les comparer entre elles (Roy & Giard, 1985).

Le Tableau 5 synthétise les différentes problématiques.

Type de problématique	Objectif	Résultat
Choix (P_α)	Choix d'un sous ensemble aussi restreint que possible en vue d'un choix final d'une seule solution.	Un choix ou une procédure de sélection.
Tri (P_β)	Affectation de chaque solution à une catégorie	Un tri ou une procédure d'affectation
Rangement (P_γ)	Un ordre complet ou partiel des solutions conformément aux préférences	Un rangement ou procédure de classement
Description (P_δ)	Une description des solutions et de leurs conséquences	Une description ou une procédure cognitive

Tableau 5 Les différentes problématiques de décision [Roy, 1985]

4.3 Conséquences et critère

Les critères découlent des conséquences des actions. Souvent, une action a plusieurs conséquences, ainsi la conséquence d'une action selon un critère donné est évaluée par une fonction g (à valeurs réelles) définies sur l'ensemble A des actions potentielles de telle sorte qu'il soit possible de raisonner ou de décrire le résultat de la comparaison de deux actions a et b relativement à partir des nombres $g(a)$ et $g(b)$.

L'évaluation de l'action a sera donc effectuée sur un ensemble de critères $\{g_1, \dots, g_k\}$.

L'objectif de la décision multicritère est donc :

$$\text{Optimiser } \{g_1(a), \dots, g_k(a) | a \in A\} \quad (24)$$

Nous pouvons distinguer le *vrai-critère* et le *pseudo-critère*. Pour le vrai critère, en considérant deux actions a et b à comparer, deux situations sont possibles :

$$g(a) = g(b) \Leftrightarrow bI_g a \quad (\text{Indifférence}) \quad (25)$$

et

$$g(a) < g(b) \Leftrightarrow bP_g a \quad (\text{Préférence stricte})$$

C'est une vision peu réaliste car une quelconque différence $g(b) - g(a)$ n'aboutit pas forcément dans la réalité en une préférence stricte.

Un *pseudo-critère* (Faure, Lemaire, & Picouleau, 2014) est un critère g doté de deux seuils p (Seuil de préférence) et q (Seuil d'indifférence) (Figure 22) qui permettent de modéliser une relation de préférence stricte P , une relation de préférence faible Q et une relation d'indifférence I tel que :

$$\begin{cases} g(a) \geq g(b) + p \Leftrightarrow aP_g b \\ g(b) + q < g(a) < g(b) + p \Leftrightarrow aQ_g b \\ g(b) - q \leq g(a) \leq g(b) + q \Leftrightarrow aI_g b \end{cases} \quad (26)$$

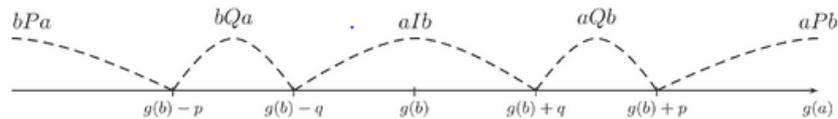


Figure 22 : Pseudo-Critère.

La construction des critères est une étape essentielle dans la formalisation des problèmes de décision. Elle nécessite une compréhension du problème posé et une interaction avec les acteurs impliqués dans la prise de décision. Il s'agit d'identifier les enjeux et la nature des conséquences possibles sur l'objet de la décision, c'est à dire les actions considérées. La définition des critères nécessite par la suite une évaluation de la contribution et l'influence de chaque critère dans la décision final, qui dépendra de la méthode multicritère choisie.

4.4 Les méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM).

Afin de permettre au décideur de faire le bon choix, plusieurs méthodes ont été développées dans le contexte multicritère depuis les années 1960. Ces méthodes sont très utiles lorsque nous faisons face à un problème de décision et que nous disposons d'un ensemble de solutions que nous devons juger en prenant compte de plusieurs critères souvent conflictuels. Ces méthodes aident alors à diriger le décideur à un judicieux compromis plutôt qu'un optimum souvent désuet (BenMena, 2000).

Un très grand nombre de méthodes multicritères peut être recensé, ce qui peut être vu comme une force ou une faiblesse (Denis Bouyssou, Perny, Pirlot, Tsoukiàs, & Vincke, 1993). Cette multiplicité des méthodes d'agrégation s'explique par le fait qu'aucune méthode ne remplit complètement les exigences qu'un utilisateur attend de l'utilisation d'une méthode multicritère (Schärlig, 1985). Ainsi suivant la façon d'agréger la performance, les analystes devront adapter leurs approches. Toutefois, la plupart de ces méthodes appartiennent à l'une ou l'autre des trois approches opérationnelles suivantes (Roy & Giard, 1985) :

- l'approche du critère unique de synthèse, évacuant toute incomparabilité ;
- l'approche du surclassement de synthèse, acceptant l'incomparabilité ;

- l'approche du jugement local interactif avec itérations essai-erreur.

Les méthodes appartenant à la troisième approche se sont principalement développées dans le cadre de la Programmation Mathématique à Objectif Multiple. Elles alternent les étapes de calculs (fournissant les compromis successifs) et les étapes de dialogue (source d'informations supplémentaires sur les préférences du décideur). Ces méthodes existent lorsque l'ensemble de solutions et d'alternatives est de taille grande voire infinie. On va alors considérer une solution de départ aussi bonne que possible et chercher autour du voisinage de cette solution s'il n'y a pas de meilleure alternative. L'analyste effectue ainsi une exploration itérative et locale de son ensemble de solutions (Schärlig, 1985). Ces techniques sont principalement basées sur la détermination du Front de Pareto. Le lecteur est référé à (Gardiner & Steuer, 1994) pour une tentative d'unification de ces méthodes.

Il y a une différence fondamentale entre les procédures d'agrégation qui contiennent les méthodes multicritères appartenant aux deux premières approches (Martel, 1999); toutefois dans les méthodes appartenant à ces deux approches les préférences sont introduites a priori. Dans la première approche, d'inspiration américaine, les préférences locales (au niveau de chaque attribut) sont agrégées en une fonction (de valeur, d'utilité) unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Les travaux relatifs aux méthodes multicritères appartenant à cette approche étudient les conditions d'agrégation, les formes particulières de la fonction agrégante et les méthodes de construction de ces fonctions (aussi bien au niveau local que global). Les principales méthodes appartenant à cette approche sont: Somme pondérée, MAUT (Fishburn, 1970; Vincke, 1989), SMART (Edwards, 1971), UTA (Jacquet-Lagrange & Siskos, 1982), TOPSIS (Hwang & Yoon, 1981), AHP (T. L. Saaty, 1980) et G.P (Ignizio, 1978).

La deuxième approche, d'inspiration française, vise dans un premier temps à construire des relations binaires, appelées relations de surclassement, pour représenter les préférences du décideur, compte tenu de l'information disponible. Pour certaines méthodes multicritères s'inscrivant dans cette voie, avant de construire ces relations de surclassement, nous introduisons des seuils de discrimination (indifférence, préférence) et même de veto, au niveau de chacun des critères, pour modéliser localement les préférences du décideur. Ces relations ne sont, en général, ni transitives, ni complètes. Dans un deuxième temps, ces relations sont exploitées en vue d'aider à formuler une recommandation qui puisse apporter une réponse au problème de décision. Les principales méthodes ou familles de méthodes appartenant à cette approche sont: ELECTRE (Roy & Bertier, 1971), PROMETHÉE (Brans, Vincke, & Mareschal, 1986), ORESTE, QUALIFLEX.

4.4.a Front de Pareto (Ghosh and Chakraborty 2014)

Lors d'une optimisation multi-objectif, les décideurs recherchent la solution offrant le compromis le plus performant au regard des critères de performance considérés. Ces critères sont souvent conflictuels et non commensurables, la définition correcte de leurs importances relatives est une difficulté à surmonter (Grierson, 2008).

La recherche de solutions optimales par le front de Pareto permet de s'affranchir en partie de cette modélisation par la représentation dans l'espace des critères C des alternatives en compétition. Le front de

Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique

Pareto repose sur la définition de l'ensemble des solutions dites efficaces. Mathématiquement, si l'on considère 2 vecteurs de critères \mathbf{a} et \mathbf{b} tels que $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_k)$ et $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_k)$ définis dans l'espace \mathbf{C} . On considère que \mathbf{a} domine \mathbf{b} dans le cas d'une minimisation si et seulement si (Aissanou, 2014) :

$$a_i \leq b_i, \forall i \in [1, k] \text{ et } \exists j \in [1, k], a_j < b_j \quad (27)$$

Si l'on considère l'ensemble des fonctions objectifs du problème d'optimisation posé tel que $F(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))$, la solution consiste à trouver l'ensemble des vecteurs \mathbf{V}^* pour lesquels chaque vecteur de critères $z = F(x)$ avec $x \in \mathbf{V}^*$ est non dominé. Le front de Pareto \mathbf{P} est donc l'ensemble des points qui satisfait la définition suivante :

$$\mathbf{P} = \{F(x), x \in \mathbf{V}^*\} \quad (28)$$

La Figure 23 représente un espace de critères de dimension 2, soit 2 critères utilisés qui sont ici le poids (en abscisse) et la flèche maximale (en ordonnée) d'une tôle en appui isostatique. Dans cet espace de dimension 2 sont représentées les performances de 10 alternatives possibles, qui correspondent à 10 géométries de tôle possibles.

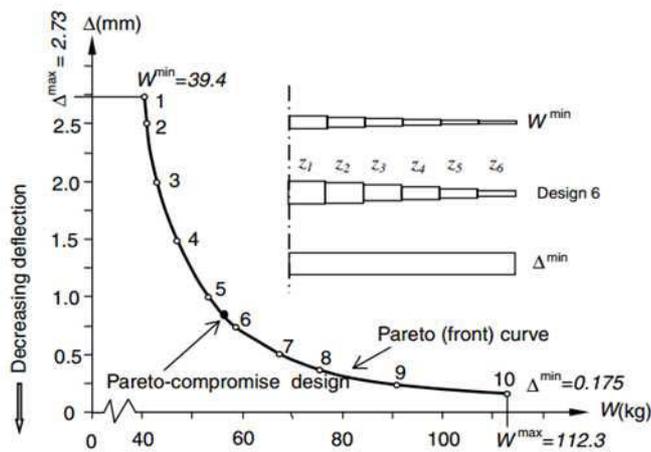


Figure 23: Front de Pareto pour une tôle en flexion (Grierson 2008)

Ces 10 géométries forment le front de Pareto et ce front permet de trouver les géométries Pareto-Optimale pour le problème posé. Cette géométrie correspond à une solution qui n'est dominée par aucune autre dans l'espace des critères \mathbf{C} . Les solutions qui se situeraient à droite du front de Pareto sont dites dominées et par définition, pas suffisamment performante pour être retenues.

4.4.b Les méthodes du critère unique de synthèse.

4.4.b.1 Somme Pondérée

La méthode d'agrégation utilisant une somme pondérée est certainement la méthode la plus utilisée parmi les méthodes d'aide à la décision multicritère. Elle consiste à affecter à chaque critère défini lors des premières étapes f_i des poids p_i , censés rendre compte de la part d'importance des critères dans le problème de décision. Cela peut s'écrire sous la forme de l'équation suivante :

$$u(x) = \sum_{i=1}^k p_i f_i(x) \quad (29)$$

Si cette méthode est simple à utiliser, elle comporte néanmoins plusieurs inconvénients (Le Gall, 2009). La difficulté inhérente à l'utilisation de cette méthode tient dans la capacité du décideur et de l'analyste à pondérer correctement les critères de manière pour être cohérent avec les préférences réelles du décideur. Elle requiert en effet que les critères soient quantitatifs, qu'ils aient tous la même unité et qu'ils s'étendent sur une même échelle ou gamme de valeurs ou qu'ils soient tous normalisés. On observe que de très légères variations des valeurs des poids (coefficients) peuvent conduire à des solutions radicalement différentes. Par ailleurs, dans de nombreux cas, les critères ne sont pas comparables. Elle n'est pas utilisable avec des critères dont les unités diffèrent. De plus si les gammes de valeurs sont très disparates entre critères, la somme ou la moyenne pondérées seront dominées par les valeurs les plus grandes. Enfin, l'influence des critères lorsqu'ils prennent une valeur faible est négligeable. En conséquence, même si un des critères est très mauvais, l'action peut être bien classée si les autres critères sont bons.

De plus, l'approximation des préférences par une fonction linéaire peut induire des écarts significatifs par rapport à la réalité. En effet, l'appréciation d'une différence d'1 point sur un critère dépend souvent de la valeur où nous nous situons (l'appréciation de gagner 1 minute sera différente si il s'agit d'un temps homme ou d'un temps machine par exemple).

4.4.b.2 *Technique for Order Preference by Similary to Ideal Solution (TOPSIS).*

La méthode TOPSIS a été développée par (Hwang & Yoon, 1981) et elle est fréquemment utilisée dans la littérature pour résoudre les problèmes de décision multicritère. L'idée principale de cette méthode est de choisir la solution ayant la plus petite distance de la solution « idéale » ainsi qu'ayant la plus grande distance de la solution « anti-idéale ». La détermination du critère de synthèse dans cette méthode repose sur la distance euclidienne qui permet de positionner chaque alternative entre deux solutions fictives (la solution idéale et l'anti-idéale).

Soit g_j est la fonction de performance par rapport au critère j .

La solution « idéale » A^* est celle qui a la meilleure valeur pour tous les critères j avec $j=1...n$:

$A^* = \{g_1^*, \dots, g_j^*, \dots, g_n^*\}$ où g_j^* est la meilleure valeur pour le $j^{\text{ème}}$ critère parmi toutes les solutions.

La solution A_* « anti-idéale » est celle qui dégrade tous les critères j avec $j=1...n$:

$A_* = \{g_1^*, \dots, g_j^*, \dots, g_n^*\}$ où g_j^* est la pire valeur pour le $j^{\text{ème}}$ critère parmi toutes les solutions.

L'idée principale ici est la suivante : Pour chaque solution,

- les distances entre la solution étudiée et les solutions idéale A^* et « anti-idéale » A_* sont calculées ;

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

- un indice de similarité à la solution idéale est ensuite calculé à partir des deux distances précédentes.

(D. H. Yang, Kim, Nam, & Min, 2007) décrivent l'algorithme de TOPSIS de la façon suivante :

Données d'entrées : Une fonction d'utilité pour chaque critère exprimé sur une échelle d'intervalle ainsi qu'un vecteur de coefficients d'importance relative des critères.

Données de sorties : Evaluation globale.

- **Etape 1** : Normaliser les performances de chacune des solutions x_i sur chacun des critères j .

$$r_j(x_i) = \frac{g_j(x_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (g_j(x_i))^2}} \text{ avec } i = 1 \dots n \text{ et } j = 1 \dots m \quad (30)$$

- **Etape 2** : Calculer le produit des performances normalisées par les poids w_j associés aux critères j .

$$v_j(x_i) = w_j \times r_j(x_i) \text{ avec } i = 1 \dots n \text{ et } j = 1 \dots m \quad (31)$$

- **Etape 3** : Déterminer la solution « idéale » A^* et « anti-idéale » A_* .

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*\}$$

$$A^* = \{(max_i(v_j(x_i)) | j \in J_1), (min_i(v_j(x_i)) | j \in J_2)\} \quad (32)$$

où J_1 est l'ensemble des critères à maximiser et J_2 l'ensemble des critères à minimiser

$$A_* = \{v_{1*}, \dots, v_{j*}, \dots, v_{n*}\}$$

$$A_* = \{(min_i(v_j(x_i)) | j \in J_1), (max_i(v_j(x_i)) | j \in J_2)\} \quad (33)$$

- **Etape 4** : Calculer la distance euclidienne de chaque solution par rapport à A^* et A_* .

$$d^*(x_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_j(x_i) - v_j^*)^2} \quad (34)$$

$$d_*(x_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_j(x_i) - v_{j*})^2} \quad (35)$$

- **Etape 5** : Calculer l'indice de similarité à la solution idéale.

$$c(x_i) = \frac{d_*(x_i)}{(d^*(x_i) + d_*(x_i))} \quad (36)$$

- **Etape 6** : Classer les solutions par ordre décroissant des indices de similarité.

TOPSIS est une méthode qui est logique et suit la rationalité du choix humain. Le grand apport de cette méthode est que pour chaque alternative, elle prend en compte sa distance par rapport à la meilleure solution aussi bien qu'à la pire. C'est une méthode qui se caractérise par sa simplicité et sa facilité d'implémentation (Shih, Shyur, & Lee, 2007). TOPSIS présente tout de même certaines limites : tout d'abord les préférences des décideurs sont fixées a priori, ensuite l'ensemble des solutions doit être connu à l'avance

4.4.b.3 *Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART)*

La forme additive pour agréger les évaluations sur les différents critères a montré son efficacité et a prouvé qu'elle permet d'obtenir d'aussi bons résultats que les formes non linéaires. La méthode SMART développée par (Edwards, 1971) utilise la forme additive pour l'agrégation des évaluations sur les différents critères. Cette méthode nécessite de connaître les préférences des décideurs a priori ainsi que la normalisation des poids des critères. Les étapes de cette méthode peuvent être résumées comme suit :

Données d'entrées : Une fonction d'utilité pour chaque critère exprimé sur une échelle cardinale ainsi qu'un vecteur de coefficients d'importance relative des critères.

Données de sortie : rangement global des solutions : $G(i)$ la performance de la solution i .

- **Étape 1** : Classer les critères dans l'ordre décroissant d'importance.
- **Étape 2** : Déterminer le poids p_j de chaque critère $j=1...n$
- **Étape 3** : Normaliser les coefficients d'importance relative ce qui revient à diviser le poids de chaque critère par la somme des coefficients d'importance :

$$\pi_j = \frac{p_j}{\sum_{k=1}^n p_k} \quad (37)$$

- **Étape 4** : Evaluer la performance de chaque solution i sur chaque critère j $g_j(i)$. Les évaluations des solutions se font sur une échelle variant de 0 à 100.
- **Étape 5** : Déterminer la performance de chaque solution en utilisant le critère de synthèse G sous forme de la somme pondérée :

$$G(i) = \sum_{j=1}^n \pi_j g_j(i) \quad (38)$$

- **Étape 6** : Classer les solutions selon l'ordre décroissant de $G(i)$.

La méthode SMART a l'avantage d'être simple d'utilisation. En revanche les poids des critères sont déterminés arbitrairement. L'évaluation des critères doit être faite sur une échelle unique. Elle est aussi compensatoire.

Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique

4.4.b.4 Analytic Hierarchy Process (AHP)

La méthode AHP a été développée par (T. L. Saaty, 1980). Elle consiste à représenter le problème par une structure hiérarchique permettant de rassembler les critères qualitatifs et quantitatifs dans la même structure. Elle permet de déterminer la contribution de chaque critère en intégrant cette hiérarchie dans la prise de décision (Hua, Gong, & Xu, 2008).

C'est une méthode fréquemment utilisée chez les chercheurs et les industriels lorsqu'ils font face à des problèmes de décision multicritère vue sa simplicité d'application et son caractère systématique et flexible.

L'AHP décompose le problème de décision selon l'arborescence des différents critères associés au problème. De cette façon, les relations entre les différents niveaux de décision sont exprimées pour ensuite comparer les critères deux à deux en utilisant l'échelle de pondération de (T. L. Saaty, 1980).

Dans la hiérarchie, le premier niveau est réservé à l'objectif, dans le dernier on trouve les alternatives et finalement les critères et les sous-critères se trouvent dans les niveaux intermédiaires.

Le principe de cette méthode consiste à déterminer pour chaque critère un poids à partir d'une matrice de comparaison binaire des critères.

La Figure 24 résume les principales étapes de la méthode.

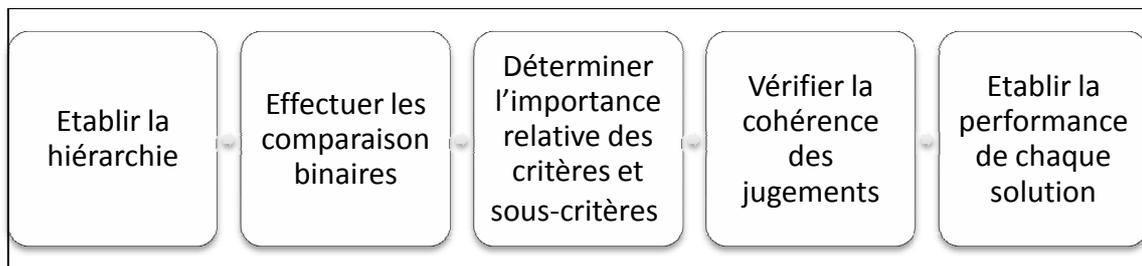


Figure 24 : Les étapes de AHP.

- **Etape 1 :** Établir la hiérarchie (Figure 25): Il s'agit dans cette étape de structurer le problème de façon hiérarchique en identifiant l'objectif en le plaçant au premier niveau de la hiérarchie, et les critères et sous critères en les plaçant aux niveaux intermédiaires, finalement on trouve les solutions dans le dernier niveau de la hiérarchie.

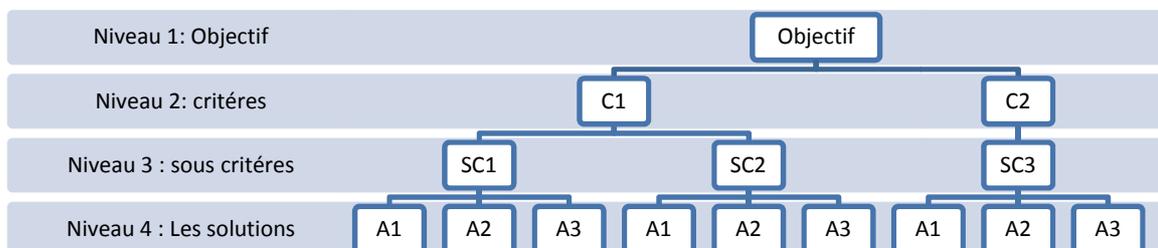


Figure 25 : Structure hiérarchique d'un problème de décision selon la méthode AHP.

- **Etape 2 :** Déterminer l'importance relative des critères et sous-critères : Il s'agit dans cette étape d'effectuer des comparaisons des critères deux à deux. Puis ensuite pour chaque critère de

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

comparer les sous-critères deux par deux. Chaque paire de critère est comparée en utilisant l'échelle de Saaty (Tableau 6).

A partir des matrices de comparaison, des vecteurs de priorité sont définis pour chaque critère et sous critère.

Degrés d'importance	Définition
1	Importance égale des deux éléments
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre.
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre.
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre.
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre.
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
Principe de réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée à l'élément j, j aura donc la valeur inverse lorsqu'on la compare à i.

Tableau 6 : Echelle de valeur de Saaty (T. L. Saaty, 1984)

- **Etape3** : Déterminer le poids (importance relative) de chacune des solutions vis à vis de chaque sous-critère, puis des critères
- **Etape4** : Vérifier la cohérence.
- **Etape 5** : Établir la performance relative de chacune des solutions.

La méthode AHP a été largement utilisée dans la littérature pour les problèmes liés à la logistique et plus particulièrement pour le problème de sélections des fournisseurs (Bhutta & Huq, 2002; E. K. Lee, Ha, & Kim, 2001).

La méthode AHP est une méthode multicritère d'aide à la décision permettant de considérer plusieurs critères (nombre illimité de critères) de natures différentes (qualitatif, quantitatif). Elle permet ainsi de structurer de façon hiérarchique n'importe quel problème de décision complexe présentant plusieurs critères, sous-critères. L'avantage de cette méthode est de présenter une échelle sémantique qui aide les décideurs à exprimer leurs préférences. Cependant un nombre très important d'éléments dans le problème engendre un nombre de comparaisons très important (Hammami, 2013).

4.4.b.5 Bilan

(Guitouni, Martel, & Vincke, 1999) ont présenté dans leur travail une procédure de choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère. Ils se sont basés sur le fait que ces méthodes se différencient par les informations utilisées comme entrée et les résultats obtenues en sortie.

Dans le Tableau 7, nous présentons une comparaison des trois méthodes d'aide à la décision multicritère reposant sur la définition d'un critère unique de synthèse, en nous basant sur (Guitouni et al., 1999) pour identifier les entrées et les sorties de chaque méthode. Dans le même tableau, nous complétons, pour chaque méthode, avec les avantages et les inconvénients.

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

Méthode	Entrées	Sorties	Avantages	Inconvénients
TOPSIS	Une fonction d'utilité pour chaque critère exprimée sur une échelle d'intervalle. Vecteur de coefficients d'importance relative des critères	Evaluation globale	Facile à appliquer Introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal.	Les préférences sont fixées a priori. Si toutes les solutions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure solution parmi les mauvaises.
SMART	Une fonction d'utilité pour chaque critère exprimée sur une échelle cardinale. Vecteur de coefficients d'importance relative des critères	Un rangement global des solutions avec possibilité de les discriminer.	Facile à exploiter.	Une articulation a priori des préférences Une évaluation des solutions sur une échelle unique.
AHP	Une fonction d'utilité pour chaque critère exprimé sur une échelle de ratio.	Evaluation globale	Facile à appliquer, similitude au mécanisme humain, intuitif, facile à mettre en œuvre Modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique. Utilisation d'une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur	Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision peut faire exploser le nombre de comparaisons par paires pour les alternatives Hypothèse de jugement linéaire

Tableau 7 : Comparaison des méthodes d'aide à la décision multicritère à critère unique de synthèse

4.4.c Méthodes multicritères d'aide à la décision de surclassement

4.4.c.1 *Les méthodes PROMETHEE : Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation*

Les cinq méthodes PROMETHEE sont des méthodes de surclassement développées par (Brans et al., 1986). Nous ne présentons dans ce chapitre que la méthode PROMETHEE 1 et PROMETHEE 2, qui sont les plus utilisées dans la littérature.

La méthode PROMETHEE 1 a pour but de d'établir un ordre partiel et permet de dégager des relations partielles de classement alors que la méthode PROMETHEE 2 permet de donner un classement de toutes les solutions.

Dans les méthodes PROMETHEE, une fonction est introduite, pour exprimer les préférences d'un décideur pour une solution par rapport à une autre.

Pour commencer, à chaque critère j est attribué un poids π_j et une fonction de préférence F_j ainsi que les paramètres correspondants parmi 6 fonctions qui sont présentées dans le Tableau 8 : Les 6 types de critères pour la méthode PROMETHEE (Vincke, 1994)

. Ensuite pour chaque couple de solutions (a,b) , l'indice de préférence $P(a,b)$ est calculé. Celui-ci indique le degré de préférence du décideur de la solution a par rapport à b tout en envisageant l'ensemble de tous les critères.

$$P(a,b) = \sum_{j=1}^n \pi_j \times F_j(a,b) \text{ avec } n \text{ le nombre de critères} \quad (39)$$

Par la suite, pour chaque solution a nous calculons le flux sortant φ_a^+ qui représente la confiance que nous avons dans la solution a à être la meilleure solution ainsi le flux entrant φ_a^- qui exprime combien la solution a est surclassée par toutes les autres.

Les meilleures solutions ont le flux sortant le plus élevé et le flux entrant le plus bas.

$$\varphi_a^+ = \sum_{b \in A, b \neq a} P(a,b) \text{ avec } A \text{ est l'ensemble des solutions} \quad (40)$$

$$\varphi_a^- = \sum_{b \in A, b \neq a} P(b,a) \text{ avec } A \text{ est l'ensemble des solutions} \quad (41)$$

Ces flux sont exploités afin de ranger les solutions de la meilleure à la moins bonne tout en autorisant les incomparabilités entre elles.

Après avoir calculé φ_a^+ et φ_a^- , le flux total, noté φ_a , est déterminé comme suit :

$$\varphi_a = \varphi_a^+ - \varphi_a^- \quad (42)$$

Chapitre 4 : Décision Multicritère

Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique

Type de fonction	Nom de la fonction	Expression mathématique	Paramètres à fixer	Commentaires
F1	Vrai-critère	$F_j(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) > g_j(b) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	Aucun	Elle est utilisée si les données sont discrètes. La préférence est stricte
F2	Quasi-critère	$F_j(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > q_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	q_j	Elle est utilisée dans le cas où le seuil d'indifférence est donné.
F3	Pré-critère	$F_j(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p_j} & 0 < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	p_j	Elle est utilisée si les données sont continues. La préférence augmente jusqu'à un seuil de préférence donné.
F4	Pseudo-critère 1	$F_j(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p_j} & \text{si } 0 < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	p_j, q_j	Il existe un seuil d'indifférence et un seuil de préférence
F5	Pseudo-critère 2	$F_j(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{g_j(a) - g_j(b) - q_j}{p_j - q_j} & \text{si } q_j < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$	p_j, q_j	Elle est utilisée dans le cas où les seuils d'indifférences et de préférence strictes sont donnés.
F6	Critère Gaussien	$F_j(a, b) = 1 - \exp\left(\frac{g_j(a) - g_j(b)}{-2\sigma^2}\right)$ avec σ : l'écart type	σ : L'écart type	Elle est utilisée si le nombre d'alternatives est suffisamment élevé.

Tableau 8 : Les 6 types de critères pour la méthode PROMETHEE (Vincke, 1994)

Les étapes de la méthode PROMETHEE 1 et PROMETHEE 2 sont quasiment les mêmes. La seule différence consiste dans l'étape de classement des solutions. Le Tableau 9 présente les relations entre les solutions fixées par chaque méthode. La première méthode donne un ordre partiel (préférence stricte, indifférence ou incomparabilité) alors que la deuxième méthode donne un ordre total (indifférence stricte ou préférence stricte).

Méthode : PROMETHEE 1	Méthode : PROMETHEE 2
a domine plus d'alternatives que b si $\varphi_a^+ \geq \varphi_b^+$	a surclasse b $\varphi_a \geq \varphi_b$
a est dominée par moins d'alternatives que b $\varphi_a^- \leq \varphi_b^-$	a est indifférente à b $\varphi_a = \varphi_b$
a et b dominant autant d'alternatives $\varphi_a^+ = \varphi_b^+$	
a et b sont dominés par autant d'alternatives $\varphi_a^- = \varphi_b^-$	

Tableau 9 : Relations entre les alternatives

Dans la méthode PROMETHEE 1, a surclasse b si :

$$(\varphi_a^+ \geq \varphi_b^+ \text{ et } \varphi_a^- \leq \varphi_b^-) \text{ ou } (\varphi_a^+ \geq \varphi_b^+ \text{ et } \varphi_a^- = \varphi_b^-) \text{ ou } (\varphi_a^+ = \varphi_b^+ \text{ et } \varphi_a^- = \varphi_b^-) \quad (43)$$

Les relations présentées dans le Tableau 9 permettent d'établir un classement des différentes alternatives.

4.4.c.2 Les méthodes ELECTRE : Élimination Et Choix Traduisant la Réalité

Les méthodes ELECTRE sont les premières méthodes de surclassement. Elles ont été développées par (Roy & Bertier, 1971) et sont basées comme toutes les méthodes de surclassement sur la comparaison des différentes solutions deux à deux.

La relation de préférence établie à l'issue de l'étape d'agrégation est basée sur deux indices :

- un indice de concordance qui représente le degré avec lequel une solution a est au moins aussi bonne que b ,
- des indices de discordances qui évaluent dans quelle mesure la différence entre la performance de la solution a par rapport au critère j et la performance de la solution b par rapport au critère j est compatible avec une préférence globale de a par rapport à b (Denis Bouyssou, Marchant, et al., 2006).

Il existe 6 versions de la méthode ELECTRE mais nous nous sommes limités à présenter que deux d'entre elles à savoir ELECTRE 1 et ELECTRE 2.

La méthode ELECTRE 1 relève de la problématique de choix et vise ainsi à obtenir le plus petit sous-ensemble N de l'ensemble des solutions tel que :

- toute solution qui n'est pas dans N est surclassée par au moins une solution de N
- les solutions de N soient incomparables entre elles.

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

Les étapes principales de la méthode ELECTRE 1 sont les suivantes :

- **Etape 1** : Associer un indice de concordance $C(a,b)$ à chaque couple de solutions (a,b) en utilisant la formule suivante :

$$C(a,b) = \sum_{j/g_j(a) \geq g_j(b)} \pi_j \quad \text{avec } \pi_j \text{ est le poids du critère } j \text{ et } \sum_{j=1}^n \pi_j = 1 \quad (44)$$

- **Etape 2** : Associer un indice de discordance $D(a,b)$ à chaque couple de solutions (a,b) en utilisant la formule suivante :

$$D(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(a) \geq g_j(b) \forall j = 1..n \\ \frac{1}{E} \times \max_{\{j \text{ tel que } g_j(a) < g_j(b)\}} |g_j(b) - g_j(a)| & \text{avec } E = \max_{k,h \in A, j=1..n} |g_j(k) - g_j(h)| \end{cases} \quad (45)$$

- **Etape 3** : Etablir les relations de surclassement. Pour cela, deux seuils sont donnés a priori : c un seuil de concordance et d un seuil de discordance (Almeida, 2005). a est alors surclassée par rapport à b si : $(C(a,b) \geq c)$ et $D(a,b) \leq d$

- **Etape 4** : Choisir le plus petit sous-ensemble N de A (l'ensemble des solutions) tel que
 - toute solution qui n'est pas dans N est surclassée par au moins une solution de N
 - les solutions de N soient incomparables entre elles.

La méthode ELECTRE 2 relève de la problématique de rangement en visant à ranger les différentes alternatives de la moins bonne à la meilleure.

Comme pour ELECTRE 1, ELECTRE 2 est basée sur la notion de concordance et discordance dont les indices sont définis comme pour ELECTRE 1. Néanmoins, dans cette méthode, 3 seuils de concordance c_1, c_2 et c_3 sont définies tel que $(0,5 < c_3 < c_2 < c_1 < 1)$. 2 seuils de discordance sont aussi définis pour chaque critère j tel que $(0 < d_{j1} < d_{j2} < E_j)$

Deux relations de surclassement sont à établir : une relation de surclassement fort S^F et une relation de surclassement faible S^f .

Les étapes principales de la méthode ELECTRE 2 sont les suivantes (Roy & Bertier, 1971) :

- **Etape1** : Associer un indice de concordance $C(a,b)$ à chaque couple de solutions (a,b) en utilisant la formule suivante :

$$C(a,b) = \sum_{j/g_j(a) \geq g_j(b)} \pi_j \quad \text{avec } \pi_j \text{ est le poids du critère } j \text{ et } \sum_{j=1}^n \pi_j = 1 \quad (46)$$

- **Etape2** : Associer un indice de discordance $D(a,b)$ à chaque couple de solutions (a,b) en utilisant la formule suivante :

$$D(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(a) \geq g_j(b) \forall j = 1..n \\ g_j(b) - g_j(a) & \text{sinon} \end{cases} \quad (47)$$

- **Etape 3** : Etablir les relations de surclassement :

- a est fortement surclassée par rapport à b ($a S^F b$) si

$$\frac{\sum_j \text{telque } g_j(a) - g_j(b) > 0 \pi_j}{\sum_j \text{telque } g_j(a) - g_j(b) > 0 \pi_j} > 1 \text{ et } \begin{cases} (C(a,b) \geq c_1) \text{ et } D(a,b) \leq d_{j2} \forall j. \\ (C(a,b) \geq c_2) \text{ et } D(a,b) \leq d_{j1} \forall j. \end{cases} \quad (48)$$

- a est faiblement surclassée par rapport à b ($a S^f b$) si

$$\frac{\sum_j \text{telque } g_j(a) - g_j(b) > 0 \pi_j}{\sum_j \text{telque } g_j(a) - g_j(b) > 0 \pi_j} > 1 \text{ et } (C(a,b) \geq c_3) \text{ et } D(a,b) \leq d_{j2} \forall j. \quad (49)$$

- Dans les autres cas, a est incomparable par rapport à b .

- **Etape 4** : 3 pré-ordres sont établis : 2 pré-ordres totaux P1 et P2 et un pré-ordre partiel P.

Le pré-ordre total P1 est établi en utilisant les surclassements forts en déterminant l'ensemble B des solutions qui ne sont pas faiblement surclassées par une autre solution puis l'ensemble $C1$ des solutions appartenant à B qui ne sont surclassées par aucune autre solution de B . $C1$ constitue la première classe et ainsi de suite. Le deuxième pré-ordre total P2 est établi de manière similaire mais en commençant par les solutions qui ne surclassent aucune autres et on remonte vers les meilleures classes.

Finalement le pré-ordre partiel P est l'intersection de P1 et P2

4.4.c.3 Bilan

Comme pour les méthodes d'aide à la décision multicritère basées sur un critère unique de synthèse que nous avons présenté, nous réalisons une comparaison des méthodes d'aide à la décision multicritère de surclassement présentées dans la partie ci-dessus en se basant sur (Guitouni et al., 1999) pour identifier les entrées et les sorties de chaque méthode (Tableau 10). Dans la même figure, nous présentons pour chacune des méthodes les avantages et les inconvénients.

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

Méthode	Entrées	Sorties	Avantages	Inconvénients
PROMETEE 1	Pour chaque critère j : une structure de semi ordre et une structure de pseudo ordres - Vecteur de coefficients d'importance relative des critères	Un rangement partiel en acceptant l'incomparabilité.	La méthode PROMETHEE 1 construit une relation de surclassement évaluée traduisant une intensité de préférence	L'indifférence est en pratique très rare, vu les nombreux calculs pour obtenir les flux.
PROMETEE 2	Pour chaque critère j : une structure de semi ordre et une structure de pseudo ordres Vecteur de coefficients d'importance relative des critères	Un rangement global des solutions avec possibilité de les discriminer.	La méthode PROMETHEE 2 construit un pré- ordre total excluant l'incomparabilité et réduisant fortement l'indifférence	La méthode PROMETHEE 2 apparaît clairement comme une méthode d'utilité, les comparaisons 2 à 2 ne servant qu'à masquer le calcul du score final $\Phi(a)$ de chaque solution
ELECTRE 1	Pour chaque critère j une structure de préordre (préférence stricte, indifférence) Vecteur de coefficients d'importance relative des critères	Choix d'un sous ensemble contenant les meilleures solutions	La méthode ELECTRE 1 est utilisée pour des problématiques de sélection. Elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures solutions.	Elle exige de traduire les performances des solutions en notes, ce qui suscite une gêne chez certains utilisateurs qui y voient une perte de maîtrise de leurs données.
ELECTRE 2	Pour chaque critère j une structure de préordre (préférence stricte, indifférence) Vecteur de coefficients d'importance relative des critères	Un rangement partiel en acceptant l'incomparabilité.	La méthode ELECTRE 2 relève des problématiques de classement. Elle vise à classer les solutions depuis les meilleures jusqu'aux moins bonnes	Il est difficile de déterminer le pré- ordre partiel P car les rangs des solutions bougent beaucoup entre le classement direct et le classement inverse. Elle exige des évaluations cardinales et une articulation a priori des préférences

Tableau 10 : Comparaison des méthodes de surclassement.

4.5 Choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère dans le cadre de notre problématique.

4.5.a Etat de l'art des méthodes utilisées en conception et fabrication

Actuellement, les méthodes multicritères de prise de décision sont encore peu utilisées au sein de l'industrie pour la conception ou la fabrication, comme il est possible d'en juger par le faible nombre de publications s'y rapportant.

Il apparaît que ces méthodes de prise de décision multicritère sont encore peu développées au sein des fabricants et des scientifiques du domaine de la fabrication. Les utilisations principales portent sur du choix de matériel (Samvedi, Jain, & Chan, 2012; Yurdakul, 2004). La grande majorité des méthodes d'optimisation utilisées en fabrication cherchent généralement la maximisation ou la minimisation sur un seul critère, qui peut être le coût total de la fabrication (Abbas, Yang, Zapata, & Schmitz, 2009; Arezoo et al., 2000; Conradie et al., 2016). Lorsque des compromis entre plusieurs critères sont recherchés, seules les valeurs brutes issues des calculs sont utilisées. Comme il a été montré au chapitre 2, la plupart des optimisations se font au moyen de métaheuristiques diverses, en utilisant seulement les valeurs brutes des critères de performance comme guide, et en cherchant une unique solution optimale. Lorsque le problème est abordé d'un point de vue multi-objectif, une somme pondérée des critères est alors introduite pour se ramener à un problème unicritère. En revanche aucune aide ou méthode n'est fournie pour déterminer la valeur des poids.

Or, il nous semble pertinent que le méthodiste qui est le décideur, puisse définir ses priorités entre ses différents critères de performance. Il est en effet envisageable que suivant les cas de fabrication auquel il est confronté, le méthodiste puisse choisir de transiger sur l'un ou l'autre des critères permettant ainsi une optimisation plus pointue car orientée dans son sens.

Dans son survey, Mardani ne recense pas de systèmes utilisant une méthode d'aide à la décision multicritère pour l'optimisation de l'usinage de pièce (Mardani, Jusoh, & Zavadskas, 2015).

Toutefois, Ong propose par exemple une utilisation de l'AHP permettant aux concepteurs d'évaluer et de cartographier la fabricabilité d'une pièce dans le cadre d'une méthodologie Design For Manufacturing (DFM) (Ong, Sun, & Nee, 2003). Les différentes zones à usiner sont identifiées et classées selon leur importance au regard de la fonctionnalité de la pièce, de leur tolérances dimensionnelles. La pièce est également notée sur la complexité de l'équipement machine à utiliser ainsi que le mode de bridage nécessaire. Ong propose plusieurs formules pour calculer des indices de fabricabilité (IFs) pour chacune des zones puis pour la pièce entière. Afin de pondérer l'importance ou la difficulté d'une zone à être usinée correctement, il propose une somme pondérée des IFs dont les poids sont déterminés en utilisant une AHP. Cette démarche montre l'intérêt qu'il peut y avoir pour l'utilisation de l'AHP en fabrication en accompagnant le décideur dans la modélisation de son processus décisionnel.

Yurdakul développe un modèle pour faciliter le choix de centres d'usinage en utilisant l'AHP afin de classer les machines en concurrence (Yurdakul, 2004). En définissant un modèle hiérarchique comportant les critères de performances des machines-outils, Yurdakul utilise l'AHP pour orienter les préparateurs méthodes vers l'architecture machine la plus adaptée à leur problématique de fabrication. Ce modèle a pu être implanté au

Chapitre 4 : Décision Multicritère

Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique

sein d'une entreprise comme outil d'aide à la décision. L'utilisation d'une méthode d'aide à la décision multicritère, plutôt que du seul critère de retour sur investissement, permet d'incorporer à la réflexion les critères utiles pour le positionnement stratégique d'une entreprise au sein d'un marché. Cette dernière peut donc définir les meilleurs moyens à mettre en œuvre pour assumer son positionnement stratégique. Néanmoins, peu de travaux porte sur l'intégration complète d'une méthode de décision multicritère axée sur la fabrication de pièces.

4.5.b Quelle méthode pour notre problématique ?

Par rapport au contexte d'étude dans lequel ces travaux ont été réalisés, nous avons pu déterminer au chapitre 3, l'ensemble des indicateurs de performance qui préoccupe le méthodiste. Ces indicateurs sont en fait des critères au sens de la théorie de la décision et nous sommes donc bien dans un contexte d'optimisation multicritère. Dans notre cas, les différentes alternatives ou actions sont des gammes de fabrication parmi lesquelles un décideur, appelé aussi méthodiste dans notre contexte, indique ses préférences dans le but de pouvoir orienter l'optimisation dans son sens.

Dans notre cadre, l'établissement d'une gamme satisfaisant l'ensemble des contraintes de conception et de fabrication est un processus long, qui représente un investissement certain du méthodiste. Cette construction itérative, comme nous l'avons présenté au chapitre 2, est essentiellement basée sur l'expérience et le savoir-faire du méthodiste. Par ailleurs, les enjeux sont tellement importants que le méthodiste limite généralement sa prise de risque et son attitude dans la définition des opérations d'usinage est relativement conservatrice.

Dans un premier temps, nous avons besoin d'une méthode qui génère, à partir de quelques gammes définies par le méthodiste, un nombre important de gammes de fabrication réalisables et qui oriente le processus vers les gammes optimales. Nous avons besoin d'une méthode d'agrégation des critères pour orienter rapidement le processus d'optimisation des gammes et ainsi proposer quelques gammes pertinentes au méthodiste. Ensuite nous sommes dans une problématique de comparaison multicritère, où nous devons fournir au méthodiste les outils pour comparer les gammes les plus performantes construites à l'étape précédente.

Comme nous l'avons explicité au chapitre 3, nous devons baser notre réflexion sur différents indicateurs de performance. Cela nécessite un indicateur agrégé issu d'une méthode permettant l'utilisation de critères non commensurables, afin de pouvoir refléter de manière tangible la performance.

De plus, il nous paraît nécessaire que le méthodiste puisse également intervenir sur la définition de ses préférences. En effet, en fonction des divers cas de fabrication pouvant se présenter, le comportement d'un méthodiste peut s'adapter, et cette faculté d'adaptation doit pouvoir se répercuter facilement sur la définition des préférences pour l'optimisation. Pour que les méthodistes s'approprient la méthode proposée dans ces travaux de recherche, nous souhaitons utiliser une approche constructive pour expliciter leur raisonnement.

Un dernier point nécessaire pour le choix de cette méthode est la facilité avec laquelle elle pourra être comprise et implémentée au sein d'un bureau des méthodes.

Nous choisissons de travailler dans un premier temps sur une somme pondérée, principalement grâce à la simplicité proposée par cette méthode pour la définition d'un indicateur agrégé de performance. En effet, nous devons inclure ce macro-indicateur dans un optimiseur et nous ne pouvons pas solliciter le méthodiste pour des comparaisons deux à deux de gammes tout au long de l'optimisation. Néanmoins, de manière à être cohérent vis-à-vis du méthodiste, il paraît nécessaire de pouvoir générer les poids de chacun des termes de cette somme de manière plus fine que par une simple discussion. Ainsi nous proposons l'utilisation de la méthode AHP afin d'aider à la définition des importances relatives des critères de performances d'une gamme.

De plus, l'utilisation de la méthode AHP permet d'envisager des perspectives intéressantes telles que la décision multi-décideurs ou encore l'utilisation de la logique floue afin d'affiner encore la modélisation des préférences du méthodiste.

Néanmoins dans la problématique de comparaison de quelques solutions, nous souhaitons revenir à un processus de comparaison plus simple sur l'ensemble des critères et nous cherchons à établir un classement des gammes. L'application des méthodes de surclassement présentées nécessite de refaire le processus méthodologique pour chacune des gammes retenues. Ce qui implique un processus dépendant du méthodiste et non stable. Par ailleurs, si le méthodiste souhaite proposer une nouvelle gamme à partir de celles proposées et la comparer à celle-ci, il devra de nouveau appliquer la méthode de surclassement complètement car elle est basée sur une comparaison des gammes deux à deux. Nous proposons alors d'utiliser la théorie du vote social qui commence à être utilisée dans le cadre des décisions multicritères et qui nous permettra de nous affranchir des inconvénients des méthodes de surclassement.

5. Présentation des principes et hypothèse de la méthode *Analytic Hierarchy Process*

5.1 Avant-propos

Le travail présenté dans cette partie est issu de travaux effectués dans le cadre du projet de master de Marion Renard (Renard, 2015). Ce projet, avait pour objectif d'établir les principes influents de la méthode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) ainsi que de faire un état de l'art sur l'utilisation de cette méthode dans le génie industriel et la logistique. Les résultats de ces travaux sont présentés ci-après.

5.2 Principes et exploitation de la méthode AHP

Dans la suite de cette section, les principes fondateurs ainsi que les calculs nécessaires à l'exploitation de la méthode AHP sont décrits en détail.

La méthode AHP se décompose en cinq principes (R. W. Saaty, 1987) :

- la décomposition du problème décisionnel complexe en une structure hiérarchique multi-niveaux (Figure 26) ;
- les comparaisons binaires ;
- le calcul des valeurs de priorités relatives ;

Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique

- la vérification de la cohérence des jugements ;
- la synthèse du score de chaque solution au problème.

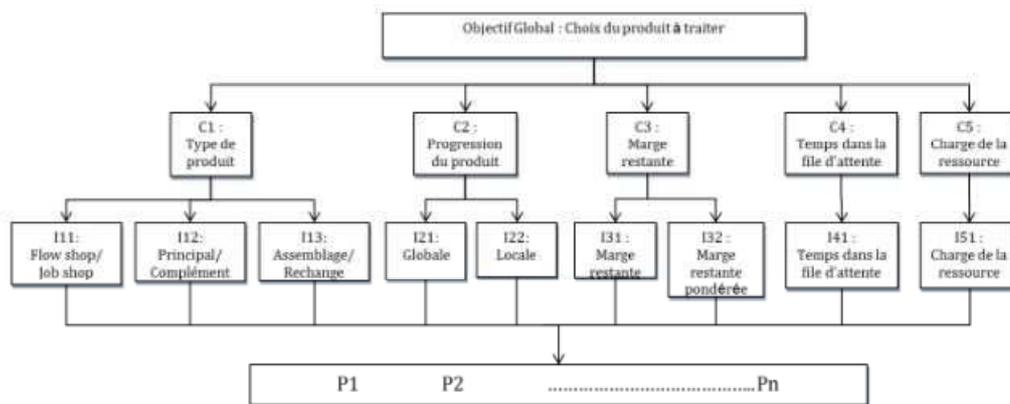


Figure 26 : Exemple d'architecture décisionnelle pour un problème d'ordonnement (Ounnar, Naamane, Pujo, & M'Sirdi, 2013)

Dans un premier temps, une hypothèse implicite est faite : le problème posé est supposé parfaitement connu par le décideur. Dans un second temps, la méthode AHP repose sur deux axiomes principaux :

- la construction d'ensembles de critères homogènes. En effet, un « lien sémantique » logique doit unir un même ensemble de critères ou sous-critères. Ainsi, un ballon et une planète peuvent, par exemple, être réunis au sein d'un ensemble homogène, si le critère retenu est la forme. Il en serait autrement si nous avions retenu le critère de taille ;
- la cohérence des intensités de préférence. En effet, si l'importance d'un critère C1 est jugée deux fois supérieure à celle d'un autre critère C2, elle-même deux fois supérieure à un troisième critère C3, l'importance de C1 doit logiquement être jugée quatre fois supérieure à celle de C3.

En effet, comme l'explique Saaty, une matrice de préférence est dite cohérente si pour tout i, j et k , ses facteurs $a_{ij} * a_{jk} = a_{ik}$ (Avec a_{ij} l'importance de la solution i sur alternative j et a_{jk} l'importance de l'alternative j sur la solution k .) (R. W. Saaty, 1987).

Ces principes régissent la méthode *Analytic Hierarchy Process* dans son intégralité, méthode présentée et détaillée dans la partie suivante.

Selon Ounnar, la méthode *Analytic Hierarchy Process* se décompose en deux étapes principales : La phase de configuration et la phase d'exploitation (Ounnar et al., 2013).

La phase dite de configuration, consiste à fixer l'ensemble des paramètres qui définissent l'importance relative des critères et des indicateurs associés.

Ounnar modélise le problème, sous la forme d'une structure hiérarchique stricte. Cette structure est l'architecture décisionnelle, qui a pour rôle d'exprimer les relations entre les différents niveaux de décision (Ounnar et al., 2013) :

- le niveau 1 : l'objectif général. La définition de l'objectif général permet de mettre en avant les différents critères à prendre en considération pour la prise de décision ;
- le niveau 2 : Les critères. Les différents critères doivent être définis de manière très précise, car le décideur s'appuie sur leur définition pour les évaluer et les comparer. Soulignons qu'ils peuvent aussi bien être quantitatifs que qualitatifs ;
- le niveau 3 : les indicateurs ou sous-critères. Il est en effet possible de diviser les critères en sous-critères, exprimant chacun une part différente de la complexité du critère apparenté ;
- le niveau 4 : les alternatives ou solutions proposées.

Cette structure hiérarchisée permet d'obtenir une représentation complète et claire du problème de décision, et de regrouper l'ensemble des informations nécessaires à celle-ci.

La priorité relative entre les différents critères est exprimée par le décideur, qui tente de répondre au mieux aux attentes de l'objectif général. Concrètement le décideur pondère les critères les uns par rapport aux autres au moyen d'une matrice [C], appelée matrice de préférence, dont les éléments C_{ij} constituent une comparaison entre une paire de critères. Le décideur utilise pour cela l'échelle d'importance décrite dans le Tableau 6. Les valeurs « 2, 4, 6 et 8 », peuvent aussi être utilisées comme valeurs intermédiaires, tout comme les valeurs décimales. Ainsi, des comparaisons fines peuvent être effectuées.

La matrice de préférence permet l'établissement du « vecteur priorité », [WCO]. Ce dernier exprime l'importance relative des critères par rapport à l'objectif global. Il peut s'obtenir de deux méthodes différentes :

- Calcul du vecteur propre de la matrice de préférence. Ce vecteur propre correspond directement au vecteur priorité des différentes entités comparées ;
- Calcul des priorités par une estimation du vecteur propre (Triantaphyllou & Mann, 1995).

Si la première solution est précise, elle reste difficile à calculer notamment en milieu industriel où les moyens de calcul sont souvent limités. La deuxième solution proposée est une estimation souvent rencontrée dans la littérature. Néanmoins, aucune étude ne définit la précision de cette estimation, qui se définit comme suit :

- Etape 1 : Chaque colonne est sommée ;
- Etape 2 : Normalisation de la matrice en divisant les entrées de chaque colonne par la somme respective de ces colonnes ;
- Etape 3 : La moyenne des lignes de la matrice normalisée est calculée, en divisant la somme de chacune des lignes par le nombre total d'entrées sur chaque ligne.

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

- Un exemple de 4 solutions à évaluer par rapport à un critère C1 illustre ces trois étapes (Tableau 11). La dernière ligne du Tableau 11 représente la somme des valeurs de chaque colonne de la matrice. On va utiliser ces valeurs pour normaliser chacune des colonnes (Tableau 12).

C1	S1	S2	S3	S4
S1	1	5	7	5
S2	1/5	1	5	9
S3	1/7	1/5	1	7
S4	1/5	1/9	1/7	1
Somme colonne	1,542857143	6,311111111	13,14285714	22

Tableau 11 : Exemple de matrice de comparaison de 4 solutions par rapport à un critère C1

C1	S1	S2	S3	S4	Somme Ligne
S1	0,648148148	0,792253521	0,532608696	0,227272727	2,200283092
S2	0,12962963	0,158450704	0,380434783	0,409090909	1,077606026
S3	0,092592593	0,031690141	0,076086957	0,318181818	0,518551508
S4	0,12962963	0,017605634	0,010869565	0,045454545	0,203559374

Tableau 12 : Matrice de comparaison normalisée

La dernière colonne du Tableau 12 représente la somme des valeurs de chaque ligne. Cette colonne est ensuite divisée par le nombre de solutions comparées (ici quatre) pour obtenir le vecteur priorité des solutions par rapport au critère C1 (Tableau 13).

C1	Vecteur Prio
S1	55,01%
S2	26,94%
S3	12,96%
S4	5,09%

Tableau 13 : Vecteur priorité des 4 solutions par rapport au critère C1

L'étape suivante permet de déterminer l'importance relative, des sous-critères (ou indicateurs) associés, pour chaque critère. Une matrice $[PI_k]$ est construite, permettant une comparaison par paire des sous-critères, où l'indice k est l'indice du critère. De la même façon que précédemment, un vecteur d'importance $[WIC_k]$, exprimant l'importance relative des indicateurs par rapport au critère auquel il est associé, est calculé. On peut ainsi définir l'importance relative des sous-critères par rapport à l'objectif général de la manière suivante :

$$[WIO_k] = [WCO_{1,k}] * [WIC_k] \quad (50)$$

Si le critère k n'est pas décomposé par plusieurs sous-critères, il est appelé critère simple et :

$$[WIO_k] = [WCO_{1,k}] \quad (51)$$

Un vecteur $[WIO]$ peut alors être défini pour l'ensemble des critères et sous-critères présents dans l'architecture décisionnelle (N représente la somme des sous critères et des critères simples) :

$$[WIO] = [[WIO_1], [WIO_2], \dots, [WIO_N]] \quad (52)$$

L'algorithme AHP se poursuit par la phase d'exploitation. L'objectif de cette phase est de classer les différentes alternatives proposées en fonction de l'objectif global. Par l'architecture décisionnelle, quatre niveaux ont été définis, il s'agit désormais de « remonter » ces quatre niveaux pour accéder à l'objectif global, situé au niveau 1. Pujo définit cette seconde phase par les trois étapes suivantes (Pujo & Ounnar, 2012) :

- définition de l'importance relative des alternatives possibles par rapport aux sous-critères de performance ;
- définition de l'importance relative des alternatives possibles par rapport aux critères de performance ;
- définition de l'importance relative des alternatives proposées par rapport à l'objectif général.

Puis il s'agit d'établir un classement des alternatives/solutions par rapport aux sous-critères/indicateurs de chaque critère C. Les valeurs des sous-critères pour chaque alternative sont comparées deux à deux.

En suivant la même méthode que précédemment, le vecteur $[WAI_{k,m}]$ d'importance relative des alternatives par rapport aux indicateurs de chaque critère est calculé, avec m le numéro du sous-critère. Une « matrice d'agrégation » représentant l'importance relative des alternatives par rapport aux indicateurs est alors construite :

$$[WAI_k] = [[WAI_{k,1}], [WAI_{k,2}], \dots, [WAI_{k,m}]] \quad (53)$$

Prenons le cas d'un sous-critère $I_{1,1}$ d'un critère C_1 composé de trois sous-critères. Supposons que $n=4$ et qu'il y ait donc quatre alternatives P1, P2, P3 et P4. Une matrice de préférence est construite, et le vecteur d'importance relative des alternatives par rapport à l'indicateur $I_{1,1}$: $[WAI_{1,1}]$ est calculé. Cette opération est alors à répéter pour les autres indicateurs du même critère, ($I_{1,2}$ et $I_{1,3}$) pour obtenir la matrice d'agrégation suivante :

$$[WAI_1] = [[WAI_{1,1}], [WAI_{1,2}], [WAI_{1,3}]] \quad (54)$$

Puis, l'algorithme est à reproduire pour l'ensemble des critères, avant de passer à la seconde étape de la phase d'exploitation. Pour cela, un vecteur $[WAC_k]$, donnant l'importance relative des alternatives par rapport aux critères est construit, pour chaque critère k. Ce vecteur est obtenu au moyen de la formule suivante ($[WAI_k]$ et $[WIC_k]$ connus grâce aux précédentes étapes) :

$$[WAC_k] = [WAI_k] * [WIC_k] \quad (55)$$

Il est alors possible de calculer la « matrice d'agrégation » représentant l'importance relative des alternatives par rapport aux critères au moyen de la formule suivante :

$$[WAC] = [[WAC_1], [WAC_2], \dots, [WAC_k]] \quad (56)$$

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

Il faut maintenant déterminer l'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif général. Pour cela, nous procédons de la même façon que précédemment. En effet, la matrice $[WAC]$, obtenue à l'étape précédente, est multipliée par le vecteur $[WCO]$, vecteur d'importance relative des critères par rapport à l'objectif général, calculé lors de la phase de configuration.

$$[WAO] = [WAC] * [WIO] \quad (57)$$

Cette opération permet d'obtenir le vecteur $[WAO]$, vecteur d'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif général (Tableau 14).

	Priorité finale [WAO]
Alternative P1	0,553
Alternative P2	0,131
Alternative P3	0,271
Alternative P4	0,045

Tableau 14 : vecteur $[WAO]$ d'importance des alternatives par rapport à l'objectif général

Dans l'exemple de vecteur exposé ci-dessus, le vecteur $[WAO]$ comporte quatre lignes et une colonne, donc quatre valeurs, chacune attribuée à l'une des quatre solutions. La solution constituant le meilleur compromis est la solution dont la valeur du vecteur $[WAO]$ associée est la plus importante. Cette valeur représente le niveau de satisfaction des désirs du décideur. Dans l'exemple traité, il s'agit donc de l'alternative P1.

(Triantaphyllou & Mann, 1995) formalise le problème général de la façon suivante, avec a_{ij} les éléments des vecteurs priorité associés à chaque critère, et W_j les éléments du vecteur priorité d'importance relative des critères, i le nombre d'alternatives et j le nombre de critères (Triantaphyllou & Mann, 1995) :

$$A_{AHP}^i = \sum_{j=1}^N a_{ij} * W_j, \text{ pour } i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (58)$$

Afin de valider le classement final des alternatives obtenues, le paramétrage de l'expert, à savoir la pondération des différentes matrices de préférences, doit être vérifié.

Dans l'algorithme décrit dans les paragraphes précédents, de nombreuses matrices de préférence et vecteurs priorité sont calculés et utilisés. Néanmoins, la cohérence des pondérations effectuées au cours de l'algorithme doit être vérifiée pour assurer la validité des opérations qui s'en suivent. Cette vérification permet de détecter d'éventuelles incohérences.

D'après Triantaphyllou, la vérification de cohérence du choix des pondérations s'effectue de la façon suivante (Triantaphyllou & Mann, 1995) :

- dans un premier temps, l'indicateur de cohérence CI doit être calculé avec la formule suivante $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ avec n le nombre d'éléments à comparer et λ_{max} dont la formule est définie ci-dessous, avec C_{ij} les valeurs de la matrice de préférence et W_j , les valeurs du vecteur priorité associé ;

$$\lambda_{max} = \sum_{Nb_{indicateur}} \left(W_j * \sum_{Nb_{indicateur}} C_{ij} \right) \tag{59}$$

- dans un deuxième temps, un indicateur correctif RCI , dépendant du nombre n d'éléments à comparer, est défini à l'aide du Tableau 15;
- Enfin il faut calculer le ratio de cohérence $CR = \frac{CI}{RCI}$.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RCI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Tableau 15 : Variation du RCI en fonction du nombre d'alternatives

Selon Saaty, si $CR < 0,1$, les jugements exprimés au travers des pondérations de la matrice de préférences sont considérés comme cohérents. Dans le cas contraire, il est conseillé de réaliser à nouveau l'opération de pondération de la matrice (T. L. Saaty, 1990).

Cette vérification de la cohérence des pondérations doit être effectuée pour l'ensemble des matrices de préférence concernées par l'algorithme, pour que le résultat final soit considéré comme acceptable.

Dans cette partie ont été présentés les hypothèses et principes détaillées qui régissent la méthode AHP. Cette méthode donne les outils nécessaires pour générer un modèle des préférences des préparateurs de gammes face à diverses situations d'usinage, tout en restant accessible et pédagogique pour son utilisateur, qui a ainsi la main mise sur le guidage de l'optimisation multicritère.

6. Utilisation de la théorie du choix social dans le cadre de nos travaux de recherche

A l'issue de l'optimisation, le méthodiste se voit présenté plusieurs solutions, plusieurs gammes de fabrication a priori performantes par rapport à son comportement décisionnel.

Ces gammes ont été optimisées en fonction de leur macro-indicateur. Elles peuvent être très proches au regard de cet indicateur mais en revanche les gammes proposées au méthodiste peuvent avoir des profils totalement différents en fonction des indicateurs de performances élémentaires définis au chapitre 3. Il est donc nécessaire de proposer des outils d'aide à la décision multicritère dans le cadre d'une problématique de choix (Sélection d'une solution parmi n) qui analyse plus finement le comportement des solutions.

Les méthodes de surclassement présentées dans ce chapitre peuvent être utilisées dans ce contexte. Néanmoins, elles nécessitent de solliciter le méthodiste pour une comparaison deux à deux des solutions dans un processus itératif. De plus le comportement décisionnel pourrait évoluer en fonction du méthodiste mais aussi à chaque instanciation de l'outil. Enfin, si le méthodiste souhaite introduire une nouvelle gamme

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

extrapolées à partir des gammes proposées, il est obligé de refaire le processus méthodologique. C'est pourquoi nous privilégions dans le cadre de ces travaux de recherche l'utilisation de la théorie du vote social.

La théorie du choix social a pour but d'étudier les liens devant ou pouvant exister entre les *préférences individuelles* des membres d'un groupe social et les décisions prises par ce groupe, décisions reflétant la *préférence collective* du groupe (D. Bouyssou, Marchant, & Perny, 2005) . Les nombreux résultats obtenus en théorie du choix social (voir notamment (Kelly, 1991)) sont riches d'enseignements pour l'aide à la décision multicritère. En effet, dans le cadre de *la théorie des élections*, un problème d'agrégation consiste en la recherche d'un mécanisme permettant d'agréger de manière raisonnable les avis exprimés par plusieurs votants concernant différents candidats de façon à déterminer un vainqueur ou à classer par ordre de préférence les divers candidats. Le Tableau 16 résume la concordance entre les deux problématiques.

Décision Multicritère	Théorie du choix social
Action, alternative	Candidat
Critère	Votant
Préférence partielle	Préférence individuelle
Préférence globale	Préférence collective

Tableau 16 : Concordance entre la théorie du choix social et la décision multicritère (Arrow & Raynaud, 1986)

Nous avons choisi de nous concentrer dans un premier temps sur les trois systèmes de vote les plus connues :

- Majorité relative ;
- Condorcet (De Condorcet, 1785) ;
- Borda (Borda, 1781) .

La majorité est un système dit « uninominal ». A contrario, la méthode de Condorcet et la méthode de Borda sont des systèmes « par listes ordonnées » qui vont déterminer le candidat le mieux soutenu par l'ensemble des listes.

Pour illustrer l'ensemble des systèmes, considérons 5 gammes dont le classement par rapport à chaque performance élémentaire est donné dans le Tableau 17. La valeur 1 correspond à la meilleure gamme.

	Temps VA	Temps NVA	Temps changement accessoires	Temps changement orientation	Temps changement outils	Temps changement plaquettes	Coût carbure
Gamme 1	3	4	4	3	3	5	2
Gamme 2	1	3	1	1	4	4	3
Gamme 3	2	5	2	5	5	2	4
Gamme 4	5	1	5	4	1	1	1
Gamme 5	4	2	3	2	2	3	5

Tableau 17 : Exemple de classement relatif des gammes proposées sur chaque performance élémentaire

6.1 Majorité relative

Ce mode de scrutin est certainement le plus ancien. L'objectif de ce scrutin est de sélectionner la gamme qui est classé en numéro 1 sur le plus grand nombre de critère.

	Nombre de critères où la gamme i est classée 1 ^{ère}
Gamme 1	0
Gamme 2	3
Gamme 3	0
Gamme 4	4
Gamme 5	0

Tableau 18 : Exemple pour la majorité relative

Selon le Tableau 18, c'est la Gamme 4 qui est la meilleure.

Nous pouvons nous interroger ici sur la pertinence du choix car la gamme sélectionnée est très bien notée pour 4 indicateurs de performances élémentaires. En revanche sur les 3 autres, elle est dans les plus mauvaises, alors que la gamme 2 pourrait constituer un bon compromis. Par conséquent, ce système majoritaire ainsi conçu laisse place à une possible « dictature de la majorité » et ne favorise pas l'émergence de solution de compromis.

6.2 Méthode de Condorcet

La méthode de Condorcet consiste à effectuer une comparaison deux à deux des candidats, dans le but de faire ressortir l'opinion majoritaire du groupe des votants.

Elle repose sur les principes :

- Un candidat a est préféré à un candidat b si et seulement si le nombre de votants ayant classé a devant b est strictement supérieur au nombre de votants ayant classé b devant a . En cas d'égalité les deux candidats sont jugés indifférents.
- S'il existe un candidat qui est préféré à chacun des autres candidats selon la définition précédente, alors c'est ce candidat qu'il faut élire. Ce candidat est le *vainqueur de Condorcet*.

Le vainqueur de Condorcet est nécessairement unique mais n'existe pas forcément (*paradoxe de condorcet*) (D. Bouyssou et al., 2005).

Le Tableau 19 représente les comparaisons deux à deux des gammes par rapport à leur classement relatif.

La valeur x_{ij} indique le nombre d'indicateurs de performance élémentaire qui classe la gamme i devant la gamme j .

Ainsi selon Tableau 17, la gamme 1 est classée devant la gamme 2 pour les indicateurs suivants :

- Le temps de changement outils
- Le coût carbure.

Par conséquent dans le Tableau 19, $x_{12} = 2$.

Ainsi, selon le Tableau 19 :

- La gamme 1 est préférée à la gamme 3 ;

*Chapitre 4 : Décision Multicritère
Etat de l'art et proposition d'outils pour notre problématique*

- La gamme 2 est préférée à la gamme 1 ;
- La gamme 2 est préférée à la gamme 3 ;
- La gamme 2 est préférée à la gamme 5 ;
- La gamme 3 est préférée à la gamme 5 ;
- La gamme 4 est préférée à la gamme 1 ;
- La gamme 4 est préférée à la gamme 2 ;
- La gamme 4 est préférée à la gamme 3 ;
- La gamme 4 est préférée à la gamme 5 ;
- La gamme 5 est préférée à la gamme 1.

	Gamme 1	Gamme 2	Gamme 3	Gamme 4	Gamme 5
Gamme 1	0	2	4	3	2
Gamme 2	5	0	6	3	4
Gamme 3	3	1	0	2	4
Gamme 4	4	4	5	0	4
Gamme 5	5	3	3	3	0

Tableau 19 : Classement relatif des gammes par rapport aux indicateurs élémentaire

Par conséquent, la gamme 4 est préférée à toutes les autres gammes. La gamme 4 doit donc être choisie et est le vainqueur de Condorcet.

6.3 Méthode de Borda

La méthode de Borda a été proposée comme une alternative à la méthode de Condorcet et pour résoudre les problèmes où il n'y a pas de vainqueur de Condorcet. Elle consiste à calculer un score global pour chaque candidat en calculant la somme de son rang de classement dans la liste des votants.

La méthode de Borda repose donc sur le principe suivant :

- Un candidat a est préféré à un candidat b si et seulement si la somme des rangs de a dans la liste des votants est strictement inférieure à celle de b .
- Une hypothèse importante est faite : il n'y a pas d'ex aequo.

	Score	Classement
Gamme 1	24	4
Gamme 2	17	1
Gamme 3	25	5
Gamme 4	18	2
Gamme 5	21	3

Tableau 20 : Score et classement selon la méthode de Borda

Ainsi si nous attribuons le rang 1 à la gamme la plus performance selon l'indicateur de performance élémentaires, le Tableau 20 fournit les scores pour chacune des gammes. Par conséquent, c'est la gamme 2 qui sera sélectionnée selon la méthode de Borda.

Par rapport à la méthode de Condorcet, cette méthode possède l'avantage de définir dans tous les cas de figure un ou plusieurs vainqueur(s) ainsi qu'un classement des candidats du meilleur au pire.

7. Conclusion

Après une introduction à la théorie de la décision ainsi qu'un état de l'art des diverses méthodes d'aide à la décision multicritère, il apparaît que ces méthodes restent peu utilisées dans un contexte de conception produit et des gammes de fabrication bien qu'elles soient souvent utilisés dans un contexte industriel pour des problématiques de choix ou de classement dans d'autres domaines notamment en organisation industrielle ou optimisation de la chaine logistique. En effet, peu de recherches ont été publiées sur l'utilisation de l'aide à la décision multicritère pour la définition ou l'orientation de choix techniques pour la fabrication, et particulièrement pour la fabrication par enlèvement de copeaux. Les différents types de méthodes présentées dans ce chapitre montrent qu'il est important pour un décideur de connaître le type de décision ainsi que le contexte décisionnel dans lequel il se trouve pour utiliser une méthode pertinente par rapport à sa situation. La plupart des méthodes, si elles sont adaptées à certaines de ces situations décisionnelles, restent malgré tout peu flexibles et complexes dans leur mise en place et leur utilisation. Néanmoins, la méthode AHP, de par sa simplicité d'usage et de concept, est une des plus fréquemment représentée lorsque l'on analyse le comportement décisionnel en entreprise. Une présentation détaillée du fonctionnement de la méthode AHP a été proposée, permettant au lecteur de se familiariser avec ses principes. Au regard du contexte de ces travaux, la méthode AHP apparaît comme une solution viable pour la définition d'un macro-indicateur de performances de gammes d'usinage, notamment par sa facilité de mise en œuvre sur le terrain. De plus, elle présente un aspect pédagogique, pouvant aider le bureau des méthodes à comprendre son comportement décisionnel et ainsi adapter son travail en conséquence.

La théorie du choix social nous permet quant à elle d'avoir des outils pour guider le décideur vers le choix privilégié d'une gamme a priori optimisée en fonction de ses préférences. Il est intéressant de pouvoir confronter plusieurs méthodes d'agrégation de manière à faire émerger une ou plusieurs gammes pertinentes au sens du méthodiste.

Nous proposons donc d'utiliser :

- L'AHP dans le cadre de l'optimisation des gammes de fabrication pour proposer quelques gammes pertinentes parmi l'ensemble des gammes possibles.
- Puis les outils du vote social de manière à guider le décideur vers la ou les solutions issues de l'optimisation qui lui conviennent le mieux.

Chapitre 5 : Contribution scientifique à la problématique posée

1. Introduction.

Dans ce chapitre, nous formalisons le problème dans un premier temps. Ensuite une présentation de la méthode développée pendant ces travaux de recherche est effectuée. Après une introduction du contexte et des hypothèses inhérentes au développement de cette méthode, une explication détaillée de chaque étape qui la compose est donnée. Dans la suite de ce chapitre, le terme « Atelier » fera référence à l'atelier de production considéré associé au service des méthodes, avec son savoir-faire et ses règles de fonctionnement.

2. Formalisation scientifique

Dans ce problème, nous considérons que la pièce à usiner, la machine et le matériau ainsi que les outils sont des données connues et fixées.

2.1 Spécification de la pièce à usiner

La pièce à usiner est définie par plusieurs zones à usiner.

Notons :

- Nb_{Zones} le nombre de zones à usiner,
- $Zone_i$ la $i^{ème}$ zone de la pièce à usiner

La pièce peut donc être caractérisée par un n-uplet $\{Zone_1; \dots Zone_i; \dots Zone_{Nb_{Zones}}\}$.

Pour chaque $Zone_i$, nous devons définir les dimensions globales dans le repère pièce. Ce repère est défini par l'utilisateur et peut être par exemple un repère machine, le repère de la pièce indiqué sur le plan 2D ou CAO.

Notons :

- X_{Zone_i} : la dimension englobante de la $Zone_i$ suivant l'axe X du repère pièce,
- Y_{Zone_i} : la dimension englobante de la $Zone_i$ suivant l'axe Y du repère pièce,
- Z_{Zone_i} : la dimension englobante de la $Zone_i$ suivant l'axe Z du repère pièce.

Il est ensuite nécessaire de caractériser l'accessibilité, la matière à enlever et les limites géométriques imposées par la zone. Ces informations permettront notamment de construire différentes gammes d'usinage.

Pour apporter de la diversité, nous avons pris le parti de définir dès que c'est possible, deux axes d'orientation de l'outil pour usiner la zone.

Soit $Axe_{Zone_i,1}$ l'axe principal d'orientation de l'outil, naturellement choisie par le methodiste, pour usiner la $Zone_i$.

Soit $Axe_{Zone_i,2}$ l'axe secondaire d'orientation possible de l'outil, selon le methodiste, pour usiner la $Zone_i$.

Pour chacun de ces axes, nous devons ensuite définir le volume de matière à enlever.

Dans le contexte de ces travaux, les géométries à usiner sont considérées simples. Pour cela, les zones à usiner sont modélisées comme étant des surfaces planes dont les surépaisseurs sont uniformément réparties (Figure 27).

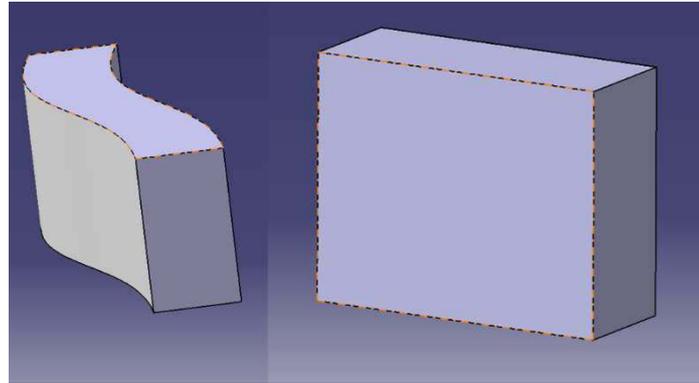


Figure 27 : Zone d'usinage quelconque (à gauche) et sa modélisation (à droite)

Pour modéliser le volume de matière à enlever, nous considérons un pavé dont les dimensions considérées, suivant un axe d'orientation, sont données par la Figure 28.

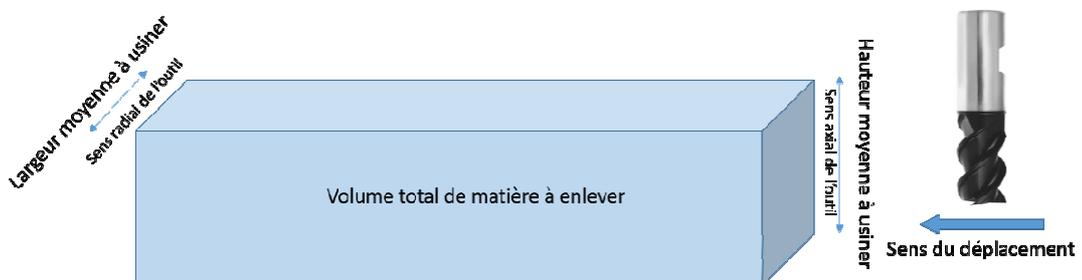


Figure 28 : Modélisation du volume de matière à enlever

Notons :

- $\bar{H}_{Zone_i,1}$ la hauteur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,1}$.
- $\bar{H}_{Zone_i,2}$ la hauteur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,2}$
- $\bar{a}_{Zone_i,1}$ la largeur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,1}$
- $\bar{a}_{Zone_i,2}$ la largeur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,2}$
- $\overline{long}_{Zone_i,1}$ la longueur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,1}$
- $\overline{long}_{Zone_i,2}$ la longueur moyenne à usiner pour la $Zone_i$ selon l'axe $Axe_{Zone_i,2}$

$\bar{H}_{Zone_i,j}$ correspond à la quantité de matière que la $Zone_i$ comprend dans le sens de $Axe_{Zone_i,j}$, $j \in \{1; 2\}$. La valeur donnée ici est une moyenne évaluée par le méthodiste. Elle permet de lisser les variations de hauteur de la zone dues à sa géométrie propre.

$\bar{a}_{Zone_i,j}$ correspond à la quantité de matière que la $Zone_i$ comprend dans le sens radial de l'outil selon l' $Axe_{Zone_i,j}$, $j \in \{1; 2\}$. La valeur donnée ici est une moyenne évaluée par le méthodiste. Elle permet de lisser les variations de hauteur de la zone dues à sa géométrie propre.

Il nous faut maintenant caractériser les limites géométriques de la zone qui vont contraindre le choix des outils utilisables.

Nous devons donc spécifier :

- le rayon concave minimum pour la $Zone_i$. Nous noterons ce rayon $Rconv_{min}(Zone_i)$. Ce rayon contraindra le diamètre de l'outil utilisable pour l'opération de finition de la $Zone_i$: le rayon de l'outil de finition devra être inférieur à $Rconv_{min}(Zone_i)$.
- le rayon outil maximal utilisable pour la $Zone_i$. Ce rayon sera noté $Routil_{max}(Zone_i)$.
- la longueur minimale de l'outil utilisable pour la $Zone_i$ que nous noterons $Loutil_{min}(Zone_i)$. Cette longueur caractérise la longueur minimale nécessaire de l'outil pour qu'il puisse usiner toute la zone, sans collision.
- la variation d'engagement radial pour la $Zone_i$ que nous noterons $Ve_{rad}(Zone_i)$. C'est une variable qui permet de qualifier les variations de surépaisseurs radiales dans l'orientation de l'outil définie. Cette variation s'articule sur 4 niveaux qualitatifs : forte, moyenne, faible, nulle. Cette variation d'engagement radial donnera une information concernant la difficulté à usiner ainsi qu'une possible évaluation des risques liés à l'usinage de cette zone.

La qualité attendue pour chacune des zones de la gamme doit être formalisée. Nous noterons :

- $Ressaut(Zone_i)$, le ressaut maximal admissible entre passe sur la $Zone_i$. Cette valeur figure sur le plan de la pièce.
- $Defaut(Zone_i)$, le défaut de forme maximale admissible sur la $Zone_i$. Cette valeur figure sur le plan de la pièce.

Enfin il nous faut spécifier :

- $ReTech_{Zone_i}$: l'ensemble des autres zones qui peuvent être usinées de manière similaire à la $Zone_i$,
- Ant_{Zone_i} : l'ensemble des zones qui sont obligatoirement à usiner au préalable de l'usinage de la $Zone_i$.

2.2 Caractérisation de la machine.

La machine utilisée sera caractérisée par l'ensemble des temps unitaires lié aux changements d'outils, d'orientation, d'accessoire ainsi que la matrice de changement d'angle entre deux axes, et la matrice de changement d'accessoire pour le passage d'un axe à un autre.

Nous noterons :

- $Tcha_{unit}$: le temps unitaire de changement d'accessoire,
- $Tcho_{unit\ \alpha}$: le vecteur du temps de changement d'orientation outil unitaire en fonction de l'angle α , $\alpha \in \{90^\circ; 180^\circ; 270^\circ\}$,
- $Tcht_{unit}$ le temps unitaire de changement d'outil,
- Tcp_{unit} le temps de changement unitaire de plaquette,
- M_α : la matrice de changement d'angle entre deux axes,
- M_{acc} : la matrice de changement d'accessoire pour le passage d'un axe à un autre.

2.3 Caractérisation de la base de données outils disponibles.

Pour réaliser une gamme, le bureau des méthodes sélectionne pour chaque opération un outil parmi une base de données qui est mise à jour régulièrement.

Soit Nb_{outils} , le nombre d'outils que contient la base de données.

Chaque outil Out_k , $k \in \{1, \dots, Nb_{outils}\}$, est caractérisé par :

- Un cycle d'usinage, noté Cy_{out_k} . Cy_{out_k} peut prendre les valeurs suivantes :
Alésage, Chanfreinage, Contournage, Copiage, Filetage-Taraudage, Perçage, Rainurage, Surfaçage, Surfaçage-Dressage, Taraudage, Tréflage, Tronçonnage
- Le diamètre de l'outil, noté D_{out_k} ,
- La longueur de l'outil, notée L_{out_k} ,
- Le rayon de bec, noté Rc_{out_k} . Rc_{out_k} correspond au rayon liant les arêtes de coupes primaires et secondaires. Dans le cas de plaquettes rondes, le rayon Rc_{out_k} est égal au rayon de la plaquette.
- Le nombre de dents, noté Z_{out_k} ,
- Le nombre de plaquettes, noté $Nb_{out_k}^{pla}$. Le nombre de plaquettes peut en effet être différent de Z_{out_k} , une dent pouvant être constituée de plusieurs plaquettes rapportées différentes (Figure 29).

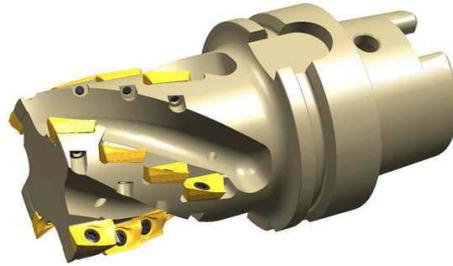


Figure 29 : Exemple d'un outil ayant plusieurs plaquettes carbures par dent

- L'ensemble des types d'opération pour lesquels l'outil peut être utilisé, noté Top_{out_k} . Les types d'opération possibles sont les suivants : *Ebauche*, *Reprise*, *Demi-finition*, *Finition*, *Super finition*. Ces types d'opération s'organisent selon la hiérarchie suivante :

Ebauche > Reprise > Demi – Finition > Finition > Superfinition

- Le coût par arête de l'outil, noté Cct_{out_k} .
- la section de copeau maximale admissible par l'outil, appelée As_{out_k} . Cette section est définie à la fois par l'expérience du méthodiste, au regard des conditions de coupe acceptables par l'outil, mais aussi par discussion avec le fournisseur de l'outil qui peut permettre d'affiner cette valeur, notamment dans le cas de nouveaux outils à implanter au sein d'un atelier.

Il est important ensuite que le méthodiste spécifie les conditions de coupe qui sont admissibles par l'outil Out_k , en fonction du cycle d'usinage défini Cy_{out_k} . Ainsi nous noterons :

- Vc_{out_k} , la vitesse de coupe ;
- $Fz_{out_k}^{min}$, l'avance à la dent minimale ;
- $Fz_{out_k}^{max}$, l'avance à la dent maximale ;
- $Ap_{out_k}^{max}$, la profondeur de passe maximale autorisé ;
- $Ae_{out_k}^{min}$, l'engagement radial minimal ;
- $Ae_{out_k}^{max}$, l'engagement radial maximal ;
- DDV_{out_k} , la durée de vie de l'outil qui est ici définie comme le temps le plus long pendant lequel l'outil peut usiner avant qu'il soit considéré comme usé.

2.4 Spécification d'une gamme (Variables de décision de notre problème).

Une gamme d'usinage, notée G_m , est une liste ordonnée d'opérations, notées $Op_{m,n}$. Ainsi :

$$G_m = (Op_{m,n} ; n \in \{1, \dots, Nb_{op_m}\}) \text{ où } Nb_{op_m} = |G_m|$$

$\forall n \in \{1, \dots, Nb_{op_m}\}$, l'opération d'usinage est définie par le 12-upplet :

$Op_{m,n}$

$$= \{Zone_{op_{m,n}}; Axe_{op_{m,n}}; Top_{m,n}; Outil_{m,n}; Cy_{p,n,m}; Vc_{m,n}; Ap_{m,n}; Ae_{m,n}; Fz_{m,n}; L_{unit\ m,n}; la_{m,n}; H_{m,n}\}$$

Où :

- $Zone_{op_{m,n}}$ est la zone de la pièce usinée par l'opération $Op_{m,n}$;
- $Axe_{op_{m,n}}$ est l'axe d'orientation de l'outil pour l'opération $Op_{m,n}$;
- $Top_{m,n}$ est le type de l'opération $Op_{m,n}$;
- $Outil_{m,n}$ est l'outil utilisé pour l'opération $Op_{m,n}$;
- $Cy_{p,n,m}$ est le cycle de l'opération $Op_{m,n}$;
- $Vc_{m,n}$; est la vitesse de coupe pour l'opération $Op_{m,n}$;
- $Ap_{m,n}$ est la profondeur de passe pour l'opération $Op_{m,n}$;
- $Ae_{m,n}$ est l'engagement radial pour l'opération $Op_{m,n}$;
- $Fz_{m,n}$ est l'avance à la dent pour l'opération $Op_{m,n}$;
- $L_{unit\ m,n}$ est la longueur du trajet élémentaire de l'opération élémentaire n de la gamme m . Il est considéré ici qu'une opération d'usinage est constituée d'une trajectoire élémentaire répétée plusieurs fois, selon un mode de contournage.
- $la_{m,n}$ est la largeur à usiner pour l'opération $Op_{m,n}$. $la_{m,n}$ correspond à l'épaisseur de matière enlevée au cours de cette opération dans le sens radial de l'outil coupant
- $H_{m,n}$ est la hauteur à usiner pour l'opération $Op_{m,n}$. $H_{m,n}$ correspond à l'épaisseur de matière enlevée au cours de cette opération dans le sens axial de l'outil coupant

La Figure 30 présente en rouge le volume usiné par une opération d'ébauche en comparaison avec une opération de reprise (en vert) et une opération de finition (en bleu) et les paramètres associés à ces volumes.

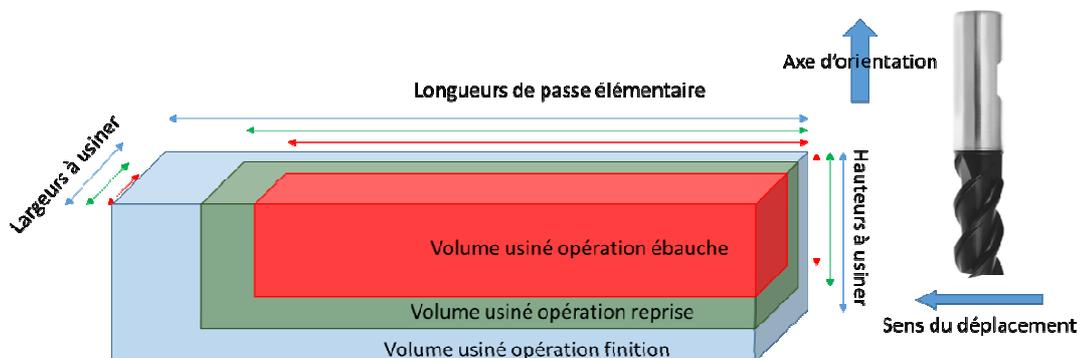


Figure 30 : comparaison du volume usiné entre les différentes opérations sur une zone

Il est à noter que $Cy_{p,n,m}$ et $Vc_{m,n}$ se déduisent de la base de données outils sachant $Outil_{m,n}$.

Par ailleurs, $Ap_{m,n}$, $Ae_{m,n}$ et $Fz_{m,n}$ se calculent sachant $Outil_{m,n}$, $Vc_{m,n}$, $L_{unit\ m,n}$, $la_{m,n}$ et $H_{m,n}$ de la manière suivante :

Calcul de la profondeur de passe $Ap_{m,n}$ et du nombre de passes $Npax_{m,n}$.

- Etape 1 : Déterminer le nombre de passes $Npax_{m,n}$ sachant $H_{m,n}$ et $Outil_{m,n}$.

$$Npax_{m,n} = \left\lceil \frac{H_{m,n}}{Ap_{outil_{m,n}}^{max}} \right\rceil \quad (60)$$

- Etape 2 : Calculer la profondeur de passe $Ap_{m,n}$.

$$Ap_{m,n} = \frac{H_{m,n}}{Npax_{m,n}} \quad (61)$$

Cette méthode de calcul permet de s'assurer que la profondeur de passe maximale admissible de l'outil ne sera jamais dépassée pendant l'opération.

Calcul de l'engagement radial $Ae_{m,n}$ et du nombre de passes radiales $Nprad_{m,n}$

$$Nprad_{m,n} = \left\lceil \frac{la_{m,n}}{Ae_{outil_{m,n}}^{max}} \right\rceil \quad (62)$$

$$Ae_{m,n} = \frac{la_{m,n}}{Nprad_{m,n}} \quad (63)$$

Calcul de l'avance à la dent $Fz_{m,n}$

Les valeurs d'engagements radiaux et axiaux étant définies, il est possible de déterminer l'avance à la dent Fz qui satisfait aux conditions de résistance de l'outil ainsi qu'au domaine des avances à la dent possibles.

Pour cela, deux formules peuvent être utilisées (Vieille, 2005) :

$$Fz_{m,n}^1 = \overline{h_{m,n}} \times \sqrt{\frac{D_{outil_{m,n}}}{Ae_{m,n}}} \quad (64)$$

$$Fz_{m,n}^2 = \frac{\overline{h_{m,n}} * \theta_{m,n} * D_{outil_{m,n}}}{2 * Ae_{m,n}} \quad (65)$$

$\overline{h_{m,n}}$ représente l'épaisseur moyenne du copeau (Figure 31). Il est calculé de la façon suivante :

$$\overline{h_{m,n}} = \frac{As_{outil_{m,n}}}{Ap_{m,n}} \quad (66)$$

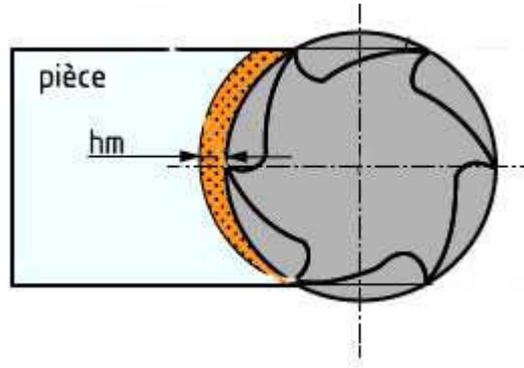


Figure 31 : Epaisseur moyenne de copeau $h_{m,n}$

$\theta_{m,n}$ représente l'angle engagé de l' $Outil_{m,n}$ dans la matière et se calcule de la manière suivante :

$$\theta_{m,n} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 * Ae_{m,n}}{D_{outil,m,n}} \right) \quad (67)$$

De manière à réduire les approximations faites par les formules (65) et (66), nous utiliserons la moyenne de ces deux estimateurs.

$Fz_{m,n}$ peut donc se calculer selon la formule suivante :

$$Fz_{m,n} = \min \left(\max \left(Fz_{out,m,n}^{min}, \frac{Fz_{m,n}^1 + Fz_{m,n}^2}{2} \right), Fz_{out,m,n}^{max} \right) \quad (68)$$

Calcul des conditions opératoires

Conditions opératoires : Les conditions opératoires de l'opération n de la gamme m correspondent à la vitesse de rotation de broche, noté $N_{m,n}$ et à la vitesse d'avance des axes, notée $Vf_{m,n}$ nécessaires pour assurer les conditions de coupe calculées préalablement. Le calcul de ces conditions opératoires permet également au méthodiste de vérifier si la machine choisie est capable de créer les mouvements nécessaires.

$$N_{m,n} = \frac{1000 * V_{C_{m,n}}}{\pi * D_{outil,m,n}} \quad (69)$$

$$Vf_{m,n} = Fz_{m,n} * Z_{out,m,n} * N_{m,n} \quad (70)$$

Nos Variables de décision sont donc :

- pour chaque $Op_{m,n}$: $\{Zone_{op_{m,n}}; Axe_{op_{m,n}}; Top_{m,n}; Outil_{m,n}; L_{unit\ m,n}; la_{m,n}; H_{m,n}\}$;
- le séquençement de $(Op_{m,n})$.

2.5 Objectifs de l'optimisation.

Les objectifs de l'optimisation sont les suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_m(Tc_m) \\ \min_m(Tcha_{tot\ m}) \\ \min_m(Tcho_{tot\ m}) \\ \min_m(Tcht_{tot\ m}) \\ \min_m(Tcp_m) \\ \min_m(Cct_{m'}) \end{array} \right. \quad (71)$$

$$\max_m \left(\frac{Tc_m}{Tc_m + Tcha_{tot\ m} + Tcho_{tot\ m} + Tcht_{tot\ m} Tc_p\ m} \right)$$

Les calculs détaillés des indicateurs sont expliqués dans le chapitre 3.

Afin d'avoir le même objectif sur l'ensemble des indicateurs de performance, nous devons donc résoudre :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_m(Tc_m) \\ \min_m(Tcha_{tot\ m}) \\ \min_m(Tcho_{tot\ m}) \\ \min_m(Tcht_{tot\ m}) \\ \min_m(Tcp_m) \\ \min_m(Cct_{m'}) \end{array} \right. \quad (72)$$

$$\min_m \left(1 - \frac{Tc_m}{Tc_m + Tcha_{tot\ m} + Tcho_{tot\ m} + Tcht_{tot\ m} Tc_p\ m} \right)$$

2.6 Contraintes.

Notre problème d'optimisation est sujet à un certain nombre de contraintes que nous allons formaliser dans cette section.

2.6.a Contraintes sur le choix d'outil

Pour chaque gamme m ,

$$\forall n \in \{1, \dots, Nb_{op_m}\}, \quad D_{outil_{m,n}} \leq 2 \times R_{outil_{max}}(Zone_{op_{m,n}}) \quad (73)$$

$$\text{Si } Top_{m,n} = \text{finition ou } Top_{m,n} = \text{super} - \text{finition}, \text{ alors } \forall n \in \{1, \dots, Nb_{op_m}\}, \quad L_{outil_{m,n}} \geq L_{outil_{min}}(Zone_{op_{m,n}}) \quad (74)$$

$$\text{Si } Top_{m,n} = \text{finition ou } Top_{m,n} = \text{super} - \text{finition}, \text{ alors } D_{outil_{m,n}} \leq 2 \times R_{conv_{min}}(Zone_{op_{m,n}}) \quad (75)$$

La contrainte (73) permet de respecter le diamètre outil maximal admissible pour réaliser la Zone de l'opération n de la gamme m .

La contrainte (74) permet de respecter la longueur d'outil minimale admissible pour réaliser la Zone de l'opération n de la gamme m .

La contrainte (75) permet de respecter le rayon concave minimum admissible pour réaliser la Zone de l'opération n de la gamme m .

2.6.b Contraintes dimensionnelles sur les opérations d'usinage

Pour chaque gamme m ,

$$\forall n \in \{1, \dots, Nb_{op_m}\}, \quad Si \text{Axe}_{op_{m,n}} = \text{Axe}_{zone_{i,1}}, \text{ Alors } \begin{cases} la_{m,n} \leq \bar{la}_{zone_{i,1}} \\ H_{m,n} \leq \bar{H}_{zone_{i,1}} \\ L_{unit\ m,n} \leq \overline{long}_{zone_{i,1}} \end{cases} \quad (76)$$

$$\forall n \in \{1, \dots, Nb_{op_m}\}, \quad Si \text{Axe}_{op_{m,n}} = \text{Axe}_{zone_{i,2}}, \text{ Alors } \begin{cases} la_{m,n} \leq \bar{la}_{zone_{i,2}} \\ H_{m,n} \leq \bar{H}_{zone_{i,2}} \\ L_{unit\ m,n} \leq \overline{long}_{zone_{i,2}} \end{cases} \quad (77)$$

Les contraintes (76) et (77) permettent d'inclure les caractéristiques dimensionnelles de la zone à usiner.

2.6.c Contrainte sur le séquençement de la gamme

Pour chaque gamme m ,

$$\forall n \in \{1, \dots, Nb_{op_m} - 1\}, \quad \nexists j \in \{n, \dots, Nb_{op_m}\} \text{ tel que } Zone_{op_{m,j}} \in Ant_{Zone_{op_{m,n}}} \quad (78)$$

La contrainte (78) permet de respecter les contraintes d'antériorité entre les zones dans le séquençement de la gamme

Pour chaque gamme m ,

$$\forall n \in \{1, \dots, Nb_{op_m} - 1\}, \quad \exists j \in \{n, \dots, Nb_{op_m}\} \text{ tel que } \begin{cases} Zone_{op_{m,i}} = Zone_{op_{m,j}} \\ \text{et } \begin{cases} Si \text{Top}_{m,n} = \text{Ebauche} \text{ alors } \text{Top}_{m,n} = \text{Reprise} \\ Si \text{Top}_{m,n} = \text{Reprise} \text{ alors } \text{Top}_{m,n} = \text{Demi-finition} \\ Si \text{Top}_{m,n} = \text{Demi-finition} \text{ alors } \text{Top}_{m,n} = \text{Finition} \\ Si \text{Top}_{m,n} = \text{Finition} \text{ alors } \text{Top}_{m,n} = \text{Super-finition} \end{cases} \end{cases} \quad (79)$$

La contrainte (78) permet de respecter les contraintes d'antériorité entre les types d'opération pour une même zone dans le séquençement de la gamme.

3. Proposition d'une méthode d'optimisation automatique de gammes de fabrication.

Nos travaux ont pour but de proposer un outil d'aide à la décision multicritère qui permette de générer automatiquement quelques gammes de fabrication proches de l'optimal tout en intégrant les risques techniques associés et en modélisant les préférences et le processus décisionnel du bureau des méthodes.

Nous souhaitons proposer une approche originale basée à la fois sur la formalisation du savoir-faire acquis par l'équipe tout en introduisant l'innovation (nouvel outil, nouvelle stratégie d'usinage, etc.). L'apport concerne les outils méthodologiques de modélisation du problème ainsi que la modélisation des préférences du méthodiste et son processus décisionnel.

La cible est de développer un outil d'aide à la décision qui permette, sans pour autant programmer en détail toutes les gammes de fabrication envisageables, de déterminer, pour une nouvelle pièce, sa gamme d'usinage et d'estimer les différents indicateurs de performance en quantifiant la prise de risques techniques associée aux gammes de fabrication proposées par l'outil et en réduisant le temps d'action du préparateur de gamme.

Plusieurs verrous ont été identifiés :

- la modélisation géométrique et technologique des différentes zones à usiner (ce verrou a été levé à la section 2.1 de ce chapitre ;
- l'aspect multicritère de la décision ainsi que la modélisation des préférences des méthodistes et de leur processus décisionnel (ce verrou a été levé au chapitre 4)
- la modélisation des risques liés à la mise en œuvre d'une gamme d'usinage (ce verrou a été levé au chapitre 3)
- l'intégration globale des modèles et la proposition d'une stratégie de recherche de la gamme optimale
- le développement d'un outil d'aide à la décision qui permette au décideur, à partir des indicateurs de performance détaillés de chaque gamme proposée par l'outil et de l'évaluation des risques techniques associés de sélectionner et finaliser la gamme de fabrication qui sera par la suite industrialisée.

La méthode que nous proposons est composée de 4 étapes distinctes et est illustrée par la Figure 32. Deux étapes préalables sont cependant nécessaires pour la modélisation des préférences du bureau des méthodes et de son comportement décisionnel.

- La première étape consiste en la description de la géométrie à usiner au travers différentes zones ainsi qu'en la récupération des caractéristiques nécessaires à la compréhension des difficultés inhérentes à la génération de cette géométrie. Cette étape est basée sur la formalisation d'une zone présentée à la section 2.1 de ce chapitre ;
- L'étape suivante consiste en la création de la part du méthodiste de gammes enveloppes (GE). Ces gammes enveloppes sont des portions de gammes d'usinage associées à une zone particulière de la pièce, qui vont permettre de définir les opérations élémentaires possibles pour pouvoir usiner la géométrie considérée. Ces gammes serviront de base pour générer des gammes alternatives. La description d'une gamme enveloppe est basée sur la formalisation d'une gamme de fabrication et d'une opération d'usinage présentée à la section 2.4 de ce chapitre ;
- La troisième étape est une étape entièrement automatique. A partir des gammes enveloppes nous créons d'autres gammes automatiquement en modifiant le séquençement, en mixant des gammes pour une même zone, ou en intégrant un nouvel outil de la base de données. Un moteur d'optimisation a été développé en utilisant un algorithme génétique. L'optimisation est basée sur

un macro-critère de performance basé sur les indicateurs de performance élémentaire identifié à la section 2.5 de ce chapitre. Afin d’obtenir le modèle du macro-indicateur, nous proposons d’utiliser la méthode AHP pour guider le méthodiste sur l’obtention des poids des critères.

- La quatrième étape correspond au choix final de la gamme à implanter au sein de l’atelier. A cette étape, nous présentons au méthodiste les X meilleures gammes différentes obtenues à l’étape 3. Pour chacune nous fournissons les indicateurs de performance élémentaire ainsi que la valeur de l’indicateur de risque de la gamme proposé en fonction de l’attitude du méthodiste face au risque du tel que proposé à la section 3.2 du chapitre 3. Pour guider le méthodiste nous proposons d’utiliser la théorie du vote social.

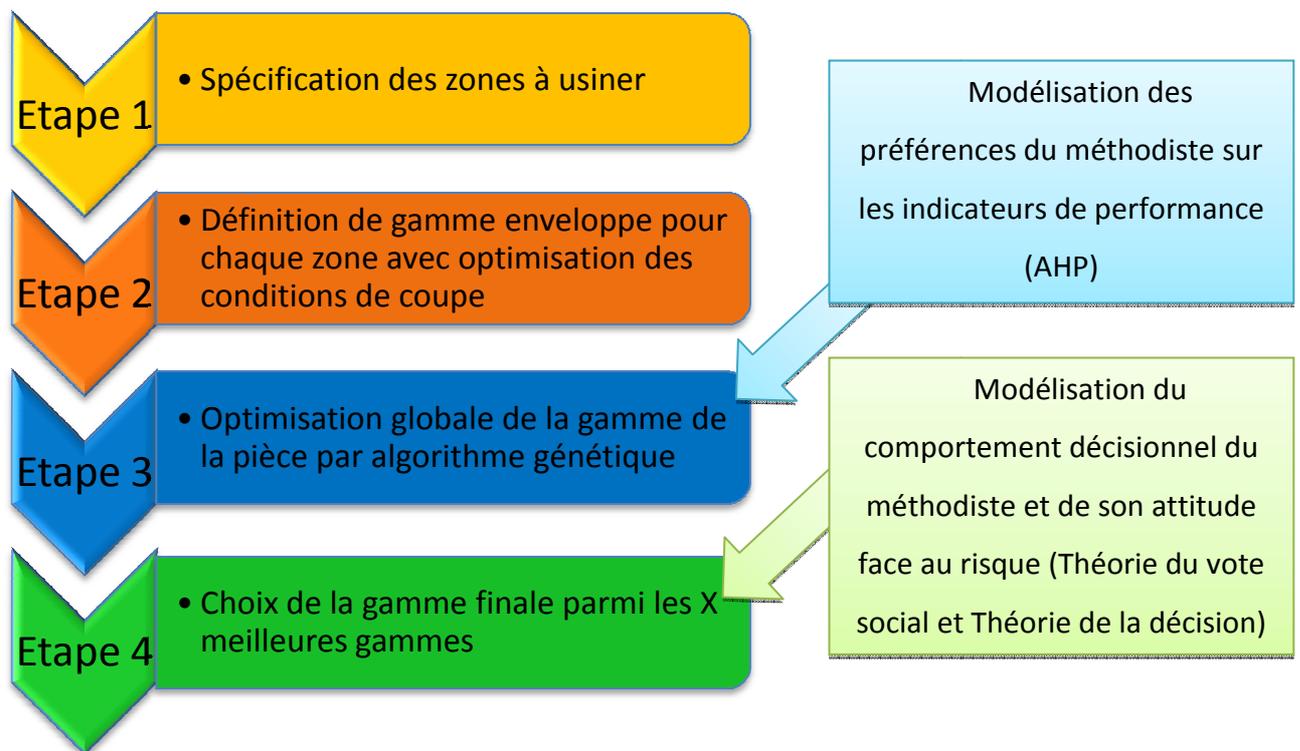


Figure 32 : Architecture de la méthode proposée.

Le Tableau 21 récapitule pour chacune des étapes introduites ci-dessus leurs objectifs, les données d’entrée et de sortie ainsi que les indicateurs utilisés.

Etape	Objectifs	Données d'entrée	Données de sortie	Indicateurs utilisés
-------	-----------	------------------	-------------------	----------------------

Spécification des zones à usiner	Décrire de manière qualitative et quantitative les zones à usiner identifiées	Géométrie CAO	Listes des zones à usiner	
		Informations sur les cadences de productions		
Génération de gammes enveloppes	Créer des gammes enveloppes pour usiner les zones à usiner identifiées	Listes des zones à usiner	Listes des gammes enveloppes	Estimateur de temps d'usinage
		Liste des outils disponibles	Banque d'opérations d'usinage	
Optimisation et génération de gammes complètes	Générer des gammes d'usinage complètes pour la pièce étudiée	Liste des opérations des gammes enveloppes	Listes de gammes complètes	Temps VA
		Valeurs des paramètres de pilotage de l'outil		Temps de changement d'orientation
				Temps de changement d'accessoire
				Temps de changement d'outils
Modèle quantitatif des préférences du méthodiste	Temps de changement de plaquettes			
				Coût carbure
Choix final du méthodiste	Guider le méthodiste pour un choix de gamme pertinent	Liste des gammes complètes	Classement des gammes complètes	Indice de risque
		Comportement face au risque		

Tableau 21 : Récapitulatif des caractéristiques des étapes de la méthode proposée

3.1 Etape 1 : Description des zones à usiner

Dans cette première étape, le méthodiste va spécifier l'ensemble des zones à usiner en fournissant les caractéristiques géométriques et inhérentes à l'usinage de celles-ci. Cette spécification (Figure 33) reprend la formalisation présentée précédemment et est liée à l'expérience et au savoir-faire du méthodiste. Cette carte est élaborée dans le but de recenser les informations suffisantes pour estimer plusieurs gammes d'usinage de la pièce et déterminer les gammes enveloppes dans la prochaine étape.

Caractéristiques des zones à usiner
Nom de la zone
Regroupement Technologique possible
Antériorité
Géométrie
Dimensions globales (X,Y,Z dans le repère pièce)
X :
Y :
Z :
caractéristiques pour l'usinage
Axe principal d'orientation
Hauteur maximale à usiner
Largeur maximale à usiner
Rayon concave minimum
Rayon outil max opération
Longueur minimale d'outil
Variation d'engagement radial
Axe secondaire d'orientation
Hauteur maximale à usiner
Largeur maximale à usiner
Rayon concave minimum
Rayon outil max opération
Longueur minimale d'outil
Variation d'engagement radial
Qualité à atteindre
Hauteur de crêtes - ressaut
Défaut de forme

Figure 33 : Caractéristiques nécessaires à la description des zones à usiner

3.2 Etape 2 : Définition de gamme enveloppe pour chaque zone avec optimisation des conditions de coupe

Les gammes enveloppes permettent aux methodistes de représenter les différentes possibilités d'usinage d'une zone définie à l'étape précédente. Pour une géométrie donnée, il peut exister plusieurs possibilités pour aboutir à sa création.

Prenons pour exemple un alésage d'un diamètre $\varnothing X$ à usiner, modélisé en rouge sur la Figure 34. Il est possible de l'obtenir en utilisant un outil de perçage d'un diamètre identique à celui de l'alésage. Une autre possibilité est de percer avec un foret de diamètre inférieur à celui de l'alésage et utiliser une fraise de diamètre inférieur à celui de l'alésage et un cycle hélicoïdal pour usiner l'alésage (Figure 35).

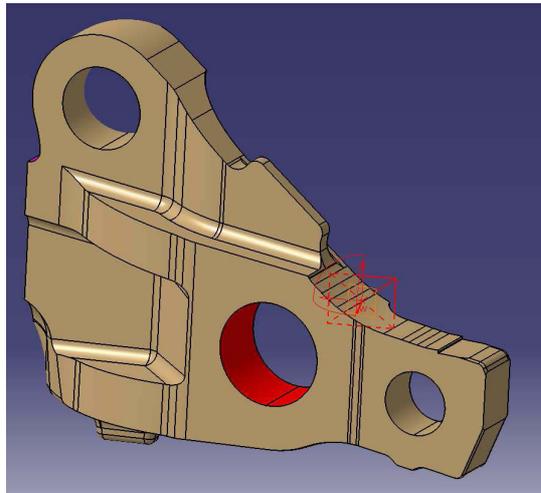


Figure 34 : Exemple d'alésage à usiner

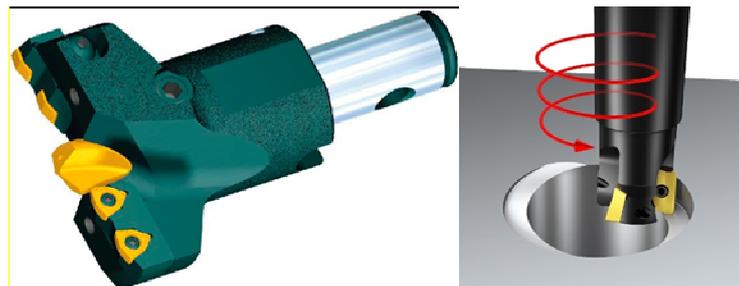


Figure 35 : forêt à plaquettes (à gauche), fraise cylindrique et cycle hélicoïdal (à droite)

La possibilité de pouvoir proposer jusqu'à 5 gammes enveloppes différentes par zone permet aux methodistes de ne pas se limiter dans ses choix, le séquençement et la gestion des antériorités étant gérées automatiquement a posteriori. Il permet aussi de proposer des solutions alternatives originales.

Les gammes enveloppes serviront également de « banque d'opérations », permettant d'initialiser l'algorithme d'optimisation de l'étape 3. C'est pourquoi nous contraignons le methodiste à définir au moins deux gammes enveloppes par zone.

Une gamme enveloppe comporte cinq opérations élémentaires au maximum : Ebauche, Reprise, Demi-Finition, Finition, Super-finition. Pour chacune opération élémentaire, le methodiste devra définir les principales caractéristiques de l'opération conformément à la formalisation d'une opération d'usinage présentée à la section 2.4 de ce chapitre. Il sélectionnera l'outil parmi la base d'outils coupant déclarée. Les conditions de coupe optimales seront automatiquement déterminées en fonction de la spécification de l'opération. Le temps d'usinage élémentaire sera aussi calculé selon l'équation (1).

3.3 Etape 3 : Optimisation globale de la gamme de la pièce.

La définition de l'algorithme d'optimisation présenté dans cette section s'appuie sur les travaux réalisés par Anne-Lise Antonmarchi au cours de son projet de master (Antonmarchi, 2016).

3.3.a Objectif et choix du type d'algorithme

Cette étape reprend les gammes obtenues lors de l'étape 2 qui reposait sur une optimisation locale zone par zone. L'objectif de l'étape 3 est de proposer une optimisation globale de la gamme d'usinage de la pièce, c'est-à-dire de l'ensemble des zones. Pour cela, nous allons remettre en cause le séquençement des opérations élémentaires ainsi que le choix de ces opérations.

Afin de pouvoir comparer les gammes entre elles nous allons utiliser les indicateurs élémentaires spécifiés à la section 2.5. Ces indicateurs vont nous permettre d'évaluer chaque solution. Toutefois, nous travaillerons à cette étape à l'aide d'un macro-indicateur qui est en fait une somme pondérée des performances élémentaires. Les poids de cette somme pondérée sont donnés par la méthode de l'AHP (Analytic Hierarchy Process) qui permet d'intuiter le raisonnement du décideur pour qui il est difficile sans méthodologie, de fournir une information quantitative sur le taux d'importance d'un indicateur par rapport à un autre.

L'intérêt de cette étape est aussi de pouvoir proposer au methodiste plusieurs solutions de gammes d'usinage, de manière à le laisser libre du choix de la gamme finale à implémenter au sein de l'atelier de production. Ceci implique l'utilisation d'algorithmes fonctionnant avec des populations, et non avec des solutions uniques. Parmi les différents algorithmes basés sur ce principe de fonctionnement, l'algorithme génétique a déjà été éprouvé sur de nombreuses applications industrielles (Ben Ammar, 2014; D'Addona & Teti, 2013; Hnaien, Delorme, & Dolgui, 2010; Kianfar & Mokhtari, 2009; Perkgoz, Azaron, Katagiri, Kato, & Sakawa, 2007; Reeves, 1995). et il est bien connu par le laboratoire qui suit la thèse.

Dans la suite de ce chapitre sont présentées les différentes étapes permettant à l'algorithme génétique de définir des solutions optimisées de gammes d'usinage pour une géométrie considérée.

3.3.b Présentation de l'algorithme génétique d'optimisation

L'algorithme génétique est une métaheuristique. Les algorithmes génétiques font partie des algorithmes évolutionnistes ou évolutionnaires qui s'inspirent de la théorie de l'évolution. La première description des algorithmes génétiques a été écrite par (Holland, 1992). (Reeves, 1995) décrit l'analogie entre l'algorithme et les phénomènes d'évolutions naturelles.

(Back, Fogel, & Michalewicz, 1997) présentent les différentes étapes de l'algorithme. Le principe est de simuler l'évolution d'une population d'individus divers, de lui appliquer différents opérateurs (mutation et croisement) et de la soumettre à une sélection.

Comme dans un phénomène d'évolution naturelle, la population tend à s'améliorer (Back et al., 1997). Les individus qui se reproduisent sont les individus qui sont le plus adaptés à leur milieu.

Le Tableau 22 présente l'analogie au niveau du vocabulaire entre la génétique et notre cas industriel.

Génétique	Algorithme	Application
Population	Ensemble d'individus	Ensemble de gammes
Chromosome	Individu	Gamme
Gène	Partie d'un individu	Opération d'une gamme
Génération	Itération	Itération

Tableau 22 : Analogie des termes utilisés en algorithme génétique et dans notre cas de fabrication

L'algorithme génétique se décompose en 5 étapes (Figure 36) :

- La création de la population initiale : il s'agit de créer les premières solutions réalisables afin de créer la population de départ ;
- L'évaluation des individus : chaque individu va être évalué selon une fonction fitness qui permettra de les classer ;
- La sélection de la nouvelle population : parmi tous les individus, une partie des meilleurs individus est gardée pour les faire se reproduire ;
- La création des nouveaux individus : grâce à des opérateurs tels que des opérateurs de croisement ou de mutation, une nouvelle génération est créée à partir de la génération précédente ;
- Les résultats de l'algorithme génétique sont obtenus une fois que le critère d'arrêt est atteint.

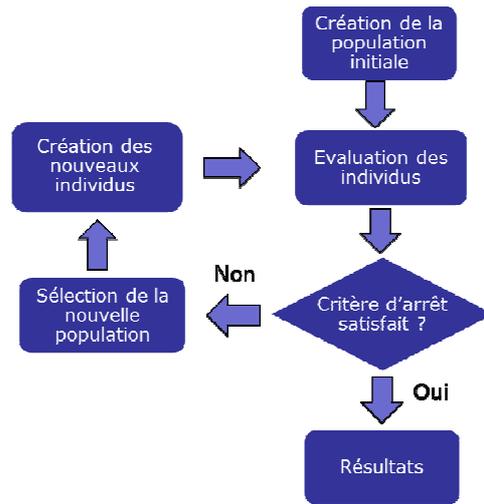


Figure 36 : Etapes de l'algorithme génétique

3.3.c Création de la population initiale

La population initiale est un ensemble d'individus représentant des gammes potentielles réalisables. Selon (Mitchell, 1998), le choix de la population initiale conditionne la rapidité de convergence de l'algorithme. L'un des problèmes est de choisir la taille de la population initiale. Si la population choisie est trop grande, le temps de calcul et la mémoire nécessaires vont être importants mais si la population choisie est trop petite, l'algorithme va converger trop rapidement.

Pour générer la population initiale, nous construisons dans un premier temps des gammes en prenant aléatoirement une gamme enveloppe pour chacune des zones. Le séquençement de ces gammes se fera zone par zone comme l'illustre la Figure 37 (une couleur correspond à une gamme sur une zone donnée).

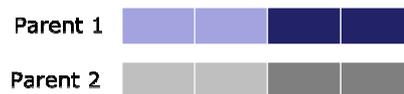


Figure 37 : Gammes complètes avec un séquençement zone par zone.

Pour une partie des individus de la population initiale, nous remettons en cause ce séquençement zone par zone en mixant les gammes enveloppes, comme l'illustre la Figure 38. Lors de cette génération, il est nécessaire cependant de construire des gammes réalisables qui respectent les contraintes (78) et (79).

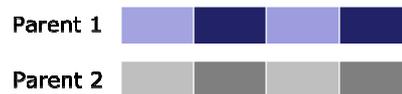


Figure 38 : Gammes complètes avec un séquençement aléatoire des opérations élémentaires.

Le pourcentage de gammes générées ainsi P_{init}^{seq} est un paramètre de notre méthodologie au même titre que la taille de la population initiale Nb_{init}^{pop} .

3.3.d Evaluation des individus

Les individus d'une même itération sont évalués à l'aide des indicateurs dont les définitions et les calculs ont été détaillés au sein du chapitre 3. Ces indicateurs servent ensuite au calcul du macro-indicateur, représentant le niveau de performance globale d'une gamme.

Néanmoins, ces indicateurs étant évalués sur des échelles et des ordres de grandeur différents, ils ne peuvent être agrégés tels quels. Une normalisation des valeurs est donc nécessaire de manière à les rendre commensurables.

Le passage à une valeur normalisée implique d'avoir une valeur de référence pour chacun de ces indicateurs, afin d'avoir une base de comparaison identique pour chaque itération de l'algorithme. La définition de ces valeurs de référence doit donc être réfléchie de manière à majorer toutes les valeurs possibles des indicateurs au cours des itérations successives. Cette définition se fait donc en calculant des bornes maximales pour chacun des indicateurs élémentaires par rapport à l'instance du problème étudié.

Dans les équations suivantes, la couleur rouge fait référence à une valeur immuable quel que soit le cas étudié car liée à la méthode, la couleur verte est dépendante des caractéristiques de la machine et à la base outils et la couleur bleue dépend de la pièce à usiner.

- Temps de changement d'orientation au pire des cas $Tchoref$:

Cette valeur de référence se calcule grâce à la formule suivante :

$$Tchoref = Nb\ max\ Op\ GE * Nb_{zones} * Tchomax \quad (80)$$

Le terme $Nb\ max\ Op\ GE$ correspond au nombre maximal d'opérations comprises dans une gamme enveloppe. Durant le développement de la méthode, cette valeur a été fixée à 5.

Le terme Nb_{zones} représente le nombre de zones à usiner identifiées par le methodiste pour la pièce à usiner.

Le terme $Tchomax$ représente le temps en minute de changement d'orientation le plus élevé renseigné par le methodiste.

$$Tchomax = \max_i Tcho_{unit\ \alpha}(i). \quad (81)$$

- Temps de changement d'accessoires au pire des cas $Tcharef$:

Cette valeur de référence se calcule grâce à la formule suivante :

$$Tcharef = Nb\ max\ Op\ GE * Nb_{zones} * Tcha_{unit} \quad (82)$$

- Temps de changement d'outils au pire des cas $Tchtref$:

Cette valeur de référence se calcule grâce à la formule suivante :

$$Tchtref = Nb\ max\ Op\ GE * Nb_{zones} * Tcht_{unit} \quad (83)$$

- Temps d'usinage au pire des cas $Tceref$:

Le temps d'usinage de référence se calcule en utilisant la formule suivante

$$T_{cref} = 20 * \sum_{i=1}^{NbZones} \max_j \left(\sum_{k=1}^5 T_{c'_{i,j,k}} \right) \quad (84)$$

$T_{c'_{i,j,k}}$ représente le temps de cycle de l'opération élémentaire k de la gamme enveloppe j pour la zone i

Une somme sur l'ensemble des zones est ainsi faite sur le temps d'usinage de toutes les gammes enveloppes les plus longues. Cette somme est pondérée par un coefficient permettant de s'assurer qu'il ne sera pas dépassé. Dans la formule ci-dessus, le coefficient a été arbitrairement fixé à 20.

➤ Temps de changement plaquettes au pire des cas T_{cpref} :

Cette valeur de référence se définit comme étant le temps maximal passé à changer les plaquettes de coupe, si toutes les opérations sont effectuées avec l'outil ayant le nombre de plaquettes à changer le plus grand et la durée de vie la plus faible. Elle se calcule grâce à la formule suivante :

$$T_{cpref} = \frac{T_{cref}}{\min_k(DDV_{out_k})} * \max_k(Nb_{out_k}^{pla}) * T_{cp_{unit}} \quad (85)$$

Le terme $\frac{T_{cref}}{\min_k(DDV_{out_k})}$ sert à calculer le nombre maximal de changement de plaquettes possibles pour le temps d'usinage de référence calculé au préalable.

Le terme $\max_k(Nb_{out_k}^{pla})$ représente le plus grand nombre de plaquettes renseigné par le methodiste dans la base de données outils.

Le terme $T_{cp_{unit}}$ correspond au temps unitaire de changement plaquettes.

➤ Coût carbure au pire des cas C_{ctref} :

Cette valeur de référence se définit comme étant le coût maximal lié à l'utilisation des outils au pire des cas, c'est-à-dire si toutes les opérations sont effectuées avec l'outil ayant le nombre de plaquettes à changer et le coût par arête le plus élevé et la durée de vie la plus faible. Elle se calcule grâce à la formule suivante :

$$C_{ctref} = \frac{T_{cref}}{\min_k(DDV_{out_k})} * \max_k(Nb_{out_k}^{pla}) * \max_k(Cct_{out_k}) \quad (86)$$

Le terme $\frac{T_{cref}}{\min_k(DDV_{out_k})}$ sert à calculer le nombre maximal de changement de plaquettes possibles pour le temps d'usinage de référence calculé au préalable.

Le terme $\max_k(Nb_{out_k}^{pla})$ représente le plus grand nombre de plaquettes renseigné par le methodiste dans la base de données outils.

Le terme $\max_k(Cct_{out_k})$ correspond au coût par arête le plus élevé renseigné par le methodiste dans la base de données outils.

Les valeurs normalisées sont calculées avec les formules suivantes :

$$Tchonorm_m = \frac{Tcho_m}{Tchoref} \quad (87)$$

$$Tchanorm_m = \frac{Tcha_m}{Tcharef} \quad (88)$$

$$Tchtnorm_m = \frac{Tcht_m}{Tchtref} \quad (89)$$

$$Tcnorm_m = \frac{Tc_m}{Tcref} \quad (90)$$

$$Tcpnorm_m = \frac{Tcp_m}{Tcprel} \quad (91)$$

$$Cctnorm_m = \frac{Cct_m}{Cctref} \quad (92)$$

Pour chaque gamme complète m , les indicateurs seront ainsi divisés par la valeur de référence de manière à obtenir leurs valeurs normalisées, permettant de les comparer entre eux. Cette normalisation autorise leur utilisation pour l'évaluation des performances des gammes générées, en les agrégeant au sein d'un macro-indicateur de performance, noté MCP_m .

Nous proposons d'utiliser une somme pondérée pour l'agrégation des performances. L'équation suivante permet le calcul du MCP pour la gamme m :

$$MCP_m = \sum p_i * Indicateur_i$$

Le terme $Indicateur_i$ représente un indicateur de performance élémentaire et le poids p_i est le poids qui lui est associé. Ces poids sont issus de la méthode de décision multicritère AHP, dont le fonctionnement a été présenté au chapitre 4.

C'est sur la valeur du MCP que les gammes créées à chaque itération sont évaluées, comparées et sélectionnées ou non pour l'itération suivante.

3.3.e Sélection de la nouvelle population et création de nouveaux individus

Si le nombre maximal d'itérations n'est pas atteint, une nouvelle génération N+1, ou population N+1, doit être créée. La Figure 39 représente les diverses mécaniques permettant d'aboutir à la sélection des individus pour la création de cette nouvelle génération.

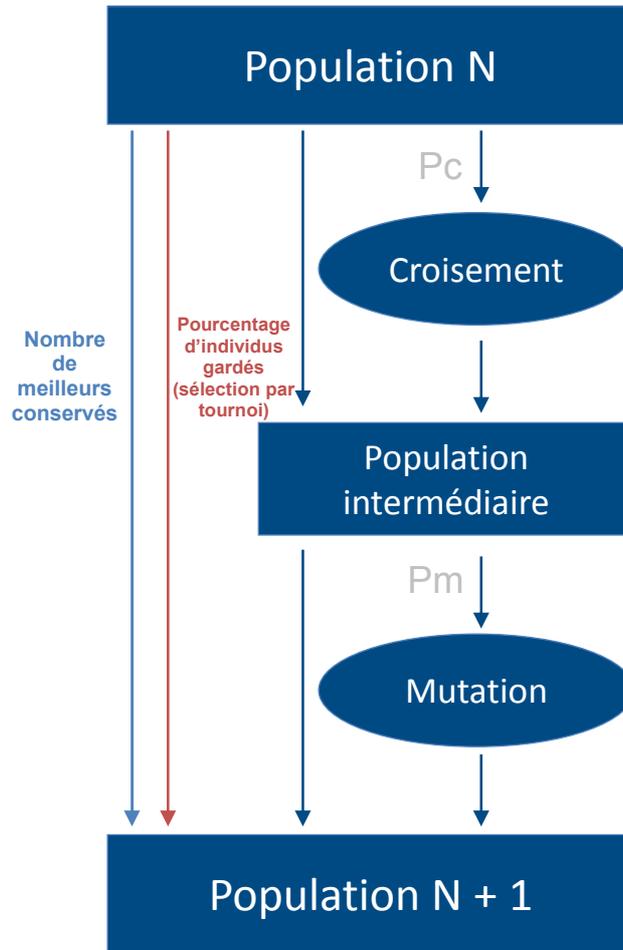


Figure 39 : Mécanisme de création d'une nouvelle génération

Une partie des individus de la génération précédente N, comprenant les meilleurs individus au regard de la valeur du MCP_m , est conservée en l'état pour la génération N+1 (flèche bleue à gauche Figure 39). Le nombre des meilleurs individus conservés ($Nb_{meilleurs}$) est un paramètre d'entrée.

Une autre partie est sélectionnée au moyen d'une sélection par tournoi (flèche orange sur la Figure 39). Le principe de la sélection par tournoi augmente les chances pour les individus de piètre qualité de participer à l'amélioration de la population. Un tournoi consiste en une rencontre entre plusieurs individus pris au hasard dans la population. Le vainqueur du tournoi est l'individu de meilleure qualité. Il est possible de ne conserver que le vainqueur comme de conserver les 2 ou 3 meilleurs individus. Ce type de sélection offre une certaine flexibilité car il est possible de gérer le nombre de participants par tournoi, le nombre de tournois sur la population, ainsi que le nombre de tournois par individu, afin d'optimiser les résultats. Le pourcentage d'individus gardés après la sélection par tournoi ($P_{tournoi}$) est un paramètre d'entrée.

Pour créer de nouveaux individus à une génération N+1, l'algorithme commence leur définition à partir d'une génération N, appelée génération de parents. Deux opérateurs d'évolution sont utilisés pour la création des individus de la génération N+1 : un opérateur de croisement et un opérateur de mutation.

Le croisement est réalisé à partir de deux parents et correspond à un mélange par la reproduction des particularités des individus choisis. Dans nos travaux de recherche, nous proposons de croiser les individus par rapport aux gammes enveloppes qui les composent en inversant l'intégralité d'une gamme enveloppe entre les deux parents (Figure 40).

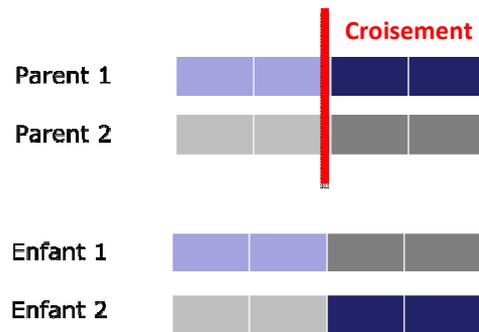


Figure 40 : Représentation d'un croisement de gammes enveloppes

Ces deux opérateurs vont permettre à l'algorithme de pouvoir, à partir des informations renseignées par le méthodiste, explorer largement l'espace des solutions possibles.

Dans un premier temps, deux individus sont sélectionnés aléatoirement et deviennent des individus parents. Le paramètre P_c est la probabilité de croisement. Il s'agit d'un paramètre d'entrée. Une loi de Bernoulli de probabilité P_c est appliquée. Si son résultat vaut 0, le croisement ne se fait pas et les individus passent directement dans la population intermédiaire. Si le résultat de la loi de Bernoulli vaut 1, le croisement est effectué et les individus croisés passent dans la population intermédiaire.

Les mutations sont réalisées à partir d'un seul parent. Trois types de mutation sont proposés dans ces travaux. Elles sont les suivantes :

- Modification du séquençement ;
- Changement d'une gamme élémentaire, appelé aussi mutation de zone ;
- Modification d'un outil.



Figure 41 : Représentation d'un individu parent

La Figure 41 représente un individu parent constitué de 4 opérations (représentées par les différentes cases) et deux zones (représentées par les couleurs), avec deux opérations pour chaque zone. La lettre « A » indique l'opération utilise l'outil référencé A.

Une modification de séquençement correspond à l'inversion de deux opérations et doit respecter les contraintes (78) et (79) sur le séquençement énoncé précédemment (Figure 42).



Figure 42 : Représentation d'un individu enfant issu d'une modification du séquençement

Le changement de gamme enveloppe (ou mutation de zone) revient à changer l'intégralité d'une gamme enveloppe sur une zone donnée (Figure 43).



Figure 43 : Représentation d'un individu enfant issu d'un changement de gamme enveloppe

La modification d'un outil correspond au remplacement d'un outil sur une opération par un outil compatible (exemple avec les outils A et B sur la Figure 44).



Figure 44 : Représentation d'un enfant issu d'une mutation sur l'outil de la deuxième opération

Pour être compatibles, les outils doivent remplir les critères de remplacement d'un outil A par un outil B :

- $Top_{out_A} = Top_{out_B}$;
- $D_{out_A} \geq D_{out_B}$;
- $L_{out_A} \leq L_{out_B}$.

Un individu est sélectionné aléatoirement au sein de la population intermédiaire. Le paramètre P_m est la probabilité de mutation globale, elle correspond à la somme des probabilités de mutation par séquençement P_{ms} , de mutation de zone P_{mGE} et de mutation d'outil P_{mo} qui sont des paramètres d'entrée :

$$P_m = P_{ms} + P_{mGE} + P_{mo}$$

La Figure 45 présente le principe des probabilités cumulées appliqué ici aux diverses mutations. Soit P_i la probabilité de muter pour un individu i , il est possible de traduire le principe de la manière suivante :

- Si $P_i \leq P_{ms}$, alors l'individu subit une mutation de séquençement ;
- Si $P_{ms} < P_i \leq P_{ms} + P_{mGE}$, alors l'individu subit une mutation de zone ;
- Si $P_{ms} + P_{mGE} < P_i \leq P_{ms} + P_{mGE} + P_{mo}$, alors l'individu subit une mutation d'outil ;
- Si $P_i > P_{ms} + P_{mGE} + P_{mo}$, alors l'individu ne subit pas de mutation.

La probabilité de ne pas muter $P_{\bar{m}}$ est déduite des trois autres probabilités :

$$P_{\bar{m}} = 1 - P_m$$

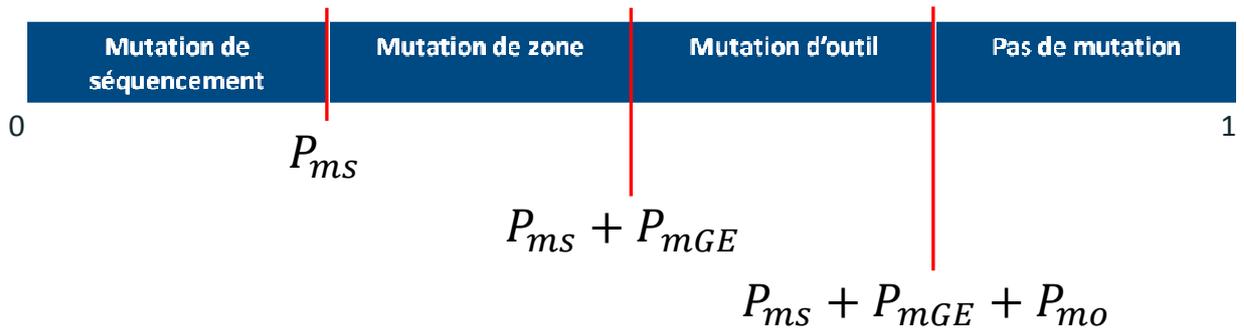


Figure 45 : Probabilités cumulées de mutation

3.3.f Critère d'arrêt

Le critère d'arrêt correspond au nombre d'itérations donné en paramètre d'entrée, noté Nb_{it} .

3.3.g Résultats

Le nombre de solutions différentes, présentées à la fin de l'étape 3, noté Nb_{sol} , fait partie des paramètres d'entrée. Cette présentation des solutions fait l'objet de la quatrième et dernière étape de la méthode proposée.

3.3.h Paramètres d'entrée

Le Tableau 23 récapitule les différentes données d'entrée, gérant le comportement et les calculs effectués par l'algorithme

Initialisation	
Nombre d'itération	Nb_{it}
Taille de la population initiale	Nb_{init}^{pop}
Pourcentage de changement de séquencement	P_{init}^{seq}
Probabilités	
Nombre de meilleurs conservés	$Nb_{meilleurs}$
Pourcentage d'individus gardés	$P_{tournoi}$
Probabilité de croisement	P_c
Probabilité de mutation séquencement	P_{ms}
Probabilité de mutation de zone	P_{mGE}
Probabilité de mutation d'outils	P_{mo}
Probabilité de ne pas muter	$P_{\bar{m}}$
Modélisation du comportement décisionnel	
Temps de changement d'orientation	P_{Tcho}
Temps de changement d'accessoire	P_{Tcha}
Temps de changement d'outils	P_{Tcht}
Temps de changement de plaquettes	P_{Tcp}
Temps d'usinage	P_{Tc}
Coût carbure	P_{Cct}
Efficacité	P_{Eff}

Résultats	
Nombre de solutions présentées	Nb_{Sol}
Temps NVA unitaire	
Changement Orientation 90°	$Tcho_{unit\ 90}$
Changement Orientation 180°	$Tcho_{unit\ 180}$
Changement Orientation 270°	$Tcho_{unit\ 270}$
Changement Accessoire	$Tcha_{unit}$
Changement Outil	$Tcht_{unit}$
Changement Plaque	Tcp_{unit}

Tableau 23 : Paramètres d'entrée de l'algorithme d'optimisation de gammes

3.4 Etape 4 : Choix final du methodiste

La dernière étape dans le déroulement de la méthode correspond au choix du methodiste.

Nous retravaillons ici à partir des indicateurs de performance élémentaires identifiés précédemment :

$$\frac{Tc_m + Tcha_{tot\ m} + Tcho_{tot\ m} + Tcht_{tot\ m} + Tcp_m}{Tc_m + Tcha_{tot\ m} + Tcho_{tot\ m} + Tcht_{tot\ m} + Tcp_m}$$

L'indice de risque par opération $IRop_{m,n}$ est alors calculé selon (15) . Comme expliqué dans le chapitre 3, il est nécessaire pour évaluer l'indice d'une gamme complète IRg_m de spécifier l'attitude du methodiste face au risque (optimiste, neutre, pessimiste, compromis). L'indice de risque de la gamme est alors calculé respectivement suivant les formules (16), (18), (20), (22).

A ce stade, le methodiste a, face à lui, un ensemble de valeurs lui restituant la performance détaillée des gammes retenues. Pour éclaircir sa vision de la performance relative des diverses solutions, des méthodes issues de la théorie du vote social, présentées dans le quatrième chapitre, sont utilisées. Une confrontation de ces méthodes peut permettre l'émergence des gammes les plus pertinentes ou bien guider le methodiste dans la construction d'une solution efficace en lui montrant les gisements de performance. De plus, la possibilité de faire varier à cet instant son attitude face au risque peut changer la performance relative indiquée des gammes retenues et ainsi montrer pédagogiquement au methodiste l'impact d'une potentielle prise de risque quant à l'implantation d'une gamme.

3.5 Etape Parallèle : Modélisation du comportement décideur du methodiste

Sur les divers critères utilisés pour décrire la performance d'une gamme d'usage, rares sont ceux utilisant la même échelle de valeur. De plus, certains d'entre eux peuvent être des critères qualitatifs et non quantitatifs.

De manière à guider le methodiste dans la modélisation de son comportement décideur et afin d'obtenir les poids à prendre en compte dans la somme agrégée du macro-indicateur, nous proposons d'utiliser la méthode

Analytic Hierarchy Process (AHP) présentée au chapitre 4. La Figure 46 illustre l'architecture hiérarchisée des divers indicateurs participant à la décision.

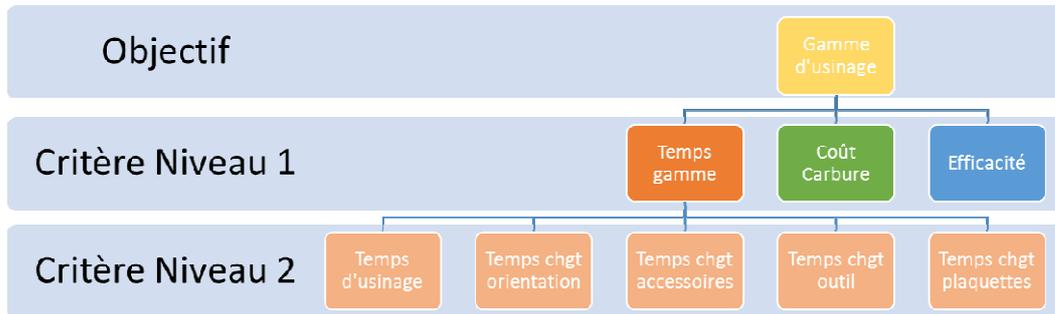


Figure 46 : Modèle décisionnel hiérarchique proposé

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps formalisé notre problème d'optimisation sous contrainte. Nous avons ensuite explicité la méthode que nous proposons dans le cadre de ces travaux de recherche. Cette méthode repose sur 4 étapes :

- Spécification des zones à usiner,
- Définition de gamme enveloppe pour chaque zone avec optimisation des conditions de coupe,
- Optimisation globale de la gamme de la pièce par algorithme génétique,
- Choix de la gamme finale parmi les X meilleures gammes.

Les aspects multicritères dans le processus de décision sont traités de deux façons différentes :

- Pour l'étape 3, nous utilisons une somme agrégée donc les poids sont obtenues par l'utilisation de la méthode AHP ;
- Pour l'étape 4, nous utilisons la théorie du vote social pour mettre en évidence la meilleure solution à partir des indicateurs de performance élémentaires et un indice de risque de la gamme.

Cette méthode a pour intérêt la prise en compte des temps à non-valeur ajoutée comme étant des acteurs majeurs dans la performance complète d'une gamme d'usinage, ainsi que l'utilisation du jugement du méthodiste pour orienter le mécanisme d'optimisation et de génération de gammes. Cette optimisation étant faite sur l'ensemble des critères définis, la performance n'est pas seulement identifiée par le temps à valeur ajoutée, permettant la création de gammes plus pertinentes quant à leur implantation au sein d'un atelier et plus réalistes vis-à-vis des valeurs de temps et de coût estimées.

Chapitre 6 : Présentation de l'outil informatique et application à un cas industriel

Dans ce chapitre, nous introduisons, dans un premier temps, l'outil informatique développé en support de la méthode proposée et présentons sa structuration et l'articulation des divers composants. Dans une seconde partie, nous présentons le cas d'étude sur lequel la méthode et l'outil informatique sont étalonnés. Dans une troisième partie, une présentation et une analyse des tests effectués pour déterminer le paramétrage de l'optimisation. Suite à cela, les gammes d'usinage proposées par la méthode sont comparées aux gammes générées par des méthodes classiques.

Une conclusion sur l'outil et sur les résultats obtenus sur un cas industriel termine ce chapitre.

6. Structure et articulation du logiciel

L'outil informatique permettant la mise en application de la méthode proposée au chapitre 5 a été développé sous Excel et le langage VBA, de manière à être implanté dans l'atelier.

Le fichier Excel comporte plusieurs écrans permettant de renseigner les informations nécessaires au fonctionnement de l'outil et de suivre la progression de la création des gammes d'usinage. Dans la suite de ce paragraphe, sont détaillés les divers écrans.

6.1 Onglet écran principal

L'onglet écran principal regroupe les paramètres permettant la gestion de l'optimisation faite durant l'étape 3 (Tableau 24) :

- Initialisation : Ce bloc comprend les paramètres nécessaires à l'algorithme génétique pour créer une situation initiale sur laquelle l'initialisation peut se baser ;
- Probabilités : Ce bloc regroupe les paramètres gérant le côté aléatoire et les mécaniques d'évolution de l'algorithme génétique ;
- AHP : Ce bloc regroupe les différents indicateurs de performance sur lesquels les gammes générées sont évaluées. Leurs importances relatives, issues de la méthode AHP, sont indiquées à cet endroit.
- Résultats : le paramètre géré dans ce bloc permet au méthodiste de donner le nombre de gammes d'usinage, qu'il souhaite pouvoir observer de manière détaillée.
- Temps NVA unitaire : Ce bloc comprend les valeurs des temps unitaires nécessaires au calcul de certains indicateurs de performance.

		AHP	
		Temps de changement d'orientation	
		Temps de changement d'accessoire	
		Temps de changement d'outils	
		Temps de changement de plaquettes	
		Temps d'usinage	
		Coût carbure	
		Efficacité	
		Résultats	
		Nombre de solutions présentées	
		Temps NVA unitaire	
		Changement Orientation 90°	
		Changement Orientation 180°	
		Changement Orientation 270°	
		Changement Accessoire	
		Changement Outil	
		Changement Plaquette	
Initialisation			
Nombre d'itération			
Taille de la population initiale			
Pourcentage de changement de séquençement			
Probabilités			
Nombre de meilleurs conservés			
Pourcentage d'individus gardés			
Probabilité de croisement			
Probabilité de mutation séquençement			
Probabilité de mutation de zone			
Probabilité de mutation d'outils			
Probabilité de ne pas muter			

Tableau 24 : Ecran principal

6.2 Description des zones à usiner

L'onglet « zones à usiner » regroupe l'ensemble des informations concernant la géométrie des zones identifiées sur la pièce étudiée (Figure 47). Ces différentes caractéristiques sont expliquées dans le chapitre V. Les diverses zones de la pièce sont réparties sur les colonnes de l'onglet. Un masque de saisie est proposé afin de faciliter l'entrée des informations (Figure 48).

Caractéristiques des zones à usiner		Zone 1
Nom de la zone		Flanc ext Y+
Regroupement Technologique possible		Flanc ext Y-
Antériorité		2
Géométrie		
Dimensions globales (X,Y,Z dans le repère pièce)		
X :		374
Y :		94,3
Z :		777
caractéristiques pour l'usinage		
Axe principal d'orientation		X-
Hauteur maximale à usiner		260
Largeur maximale à usiner		15
Rayon concave minimum		80
Rayon outil max opération		80
Longueur minimale d'outil		300
Variation d'engagement radial		Faible
Axe secondaire d'orientation		X+
Hauteur maximale à usiner		90
Largeur maximale à usiner		15
Rayon concave minimum		80
Rayon outil max opération		80
Longueur minimale d'outil		350
Variation d'engagement radial		Faible
Qualité à atteindre		
Hauteur de crêtes - ressaut		0,5
Défaut de forme		0,75

Figure 47 : Ecran présentant les diverses zones à usiner renseignées

Figure 48 : Masque de saisie des zones à usiner

6.3 Gammes enveloppes

La création des gammes enveloppes constitue la deuxième étape de la méthode proposée. A la fin de l'étape précédente, un onglet est créé pour chaque zone définie. Ces onglets se composent d'un tableau dans lequel sont regroupées les informations géométriques (Figure 49) et de plusieurs tableaux correspondant aux gammes enveloppes que le méthodiste doit concevoir (Tableau 25). Le méthodiste peut mettre à jour les informations de la zone automatiquement sur l'onglet zone à usiner grâce au bouton situé sous le tableau, pour corriger une valeur dans la description.

Caractéristiques des zones à usiner		Zone 1
Nom de la zone		Flanc ext Y+
Regroupement Technologique possible		Flanc ext Y-
Antériorité		2
Géométrie		
Dimensions globales (X,Y,Z dans le repère pièce)		
X :		374
Y :		94,3
Z :		777
caractéristiques pour l'usinage		
Axe principal d'orientation		X-
Hauteur maximale à usiner		260
Largeur maximale à usiner		15
Rayon concave minimum		80
Rayon outil max opération		80
Longueur minimale d'outil		300
Variation d'engagement radial		Faible
Axe secondaire d'orientation		X+
Hauteur maximale à usiner		90
Largeur maximale à usiner		15
Rayon concave minimum		80
Rayon outil max opération		80
Longueur minimale d'outil		350
Variation d'engagement radial		Faible
Qualité à atteindre		
Hauteur de crêtes - ressaut		0,5
Défaut de forme		0,75

Mise à jour des informations sur la zone

Figure 49 : Tableau récapitulatif des caractéristiques d'une zone à usiner

Le Tableau 25 représente la version informatique d'une gamme enveloppe. Chaque ligne du tableau représente une opération d'usinage.

Opération	Type	Orientation	Outil	Cycle	Hauteur à usiner (mm)	Largeur à usiner (mm)
OP''111						
OP''112						
OP''113						
OP''114						
OP''115						

Vc (m/min)	Ap (mm)	Ae (mm)	Fz (mm/dent)	N (tr/min)	Vf (mm/min)	Q(cm3/min)	Temps d'usinage	Luni (mm)
							0	
							0	
							0	
							0	
							0	

Tableau 25 : Tableau représentant une gamme enveloppe de la zone considérée

Figure 50 : Masque de saisie des informations pour une opération d'usinage

Les cellules du Tableau 25, représentant une gamme enveloppe, ont un code couleur :

- Orange : Les cellules en orange sont les données d'entrées de la gamme enveloppe. Elles sont renseignées via un masque de saisie (Figure 50) pour chaque opération d'usinage composant la gamme enveloppe.
- Vert : Les cellules vertes sont des informations liées à l'outil choisi pour l'opération, extraites depuis la base de données outils coupants (base de données détaillée ci-après).
- Jaune : Les cellules jaunes représentent les conditions de coupe calculées par l'outil pour l'opération. Ces conditions de coupe sont calculées grâce aux formules définies au chapitre V.
- Rose : Les cellules roses représentent les conditions opératoires qui définissent les mouvements de la machine, ainsi qu'une valeur de débit copeau et une estimation du temps d'usinage. Ces colonnes sont aussi automatiquement calculées.

Le type de l'opération est choisi parmi la liste des types d'opérations définies au chapitre V : Ebauche ; Reprise ; Demi-finition ; Finition ; Super-finition

Le méthodiste peut choisir une orientation pour l'opération parmi les orientations primaires et secondaires renseignées pour la zone considérée. Le méthodiste peut ensuite choisir un outil pour faire l'opération parmi une liste d'outils spécifique à cette opération. Cette liste d'outils est générée en prenant en compte le type d'opération, l'orientation et les limites sur les caractéristiques outils imposées par la géométrie de la zone.

Pour une zone, il est possible de créer cinq gammes enveloppes comportant jusqu'à cinq opérations. Il doit obligatoirement en définir deux au minimum. Une fois les gammes enveloppes créées, le méthodiste revient à l'écran principal pour démarrer l'optimisation à l'aide du bouton associé.

6.4 Gamme d'usinage détaillée

Une fois que l'optimisation est terminée, les gammes générées sont détaillées opération par opération dans un onglet spécifique à chacune. Le nombre d'onglet souhaité par le méthodiste correspond au paramètre « Nombre de solution présentées » de l'écran principal. Chaque onglet est composé d'un tableau regroupant les valeurs du Macro Critère de Performance (MCP) et des indicateurs de performance de la gamme détaillée (Tableau 26) ainsi qu'un tableau regroupant le séquençement des opérations composant la gamme d'usinage (Tableau 27).

Numéro de la gamme	8
Valeur MCP	0,395
Temps VA	625,9
Temps non VA	253,3
Efficacité	0,712
Temps chgt accessoire	80
Temps chgt outil	76
Temps chgt orientation	2,8
Temps chgt plaquette	94,5
Coût carbure	1388

Tableau 26 : Tableau récapitulatif des performances d'une gamme d'usinage

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usinage	Indice de risque	Passe axiale	Passe radiale	Avance à la dent
OP'1	Zone 1	X+	Ebauche	Outil B	Contournage	39,48	0,10	32,5	8,00	0,14
OP'2	Zone 2	X+	Ebauche	Outil D	Contournage	45,24	1,52	43	8,67	0,15
OP'3	Zone 3	Y+	Ebauche	Outil A	Contournage	30,83	0,60	40	6,50	0,15
OP'4	Zone 4	X+	Ebauche	Outil F	Contournage	35,63	0,70	4	24,00	0,47

Tableau 27 : Extrait d'un tableau détaillant une gamme d'usinage

Dans ce tableau, les caractéristiques suivantes sont détaillées pour chaque opération :

- Numéro de l'opération ;
- Zone usinée ;
- Axe d'orientation de l'opération ;
- Type de l'opération ;
- L'outil associé à l'opération ;
- Le cycle d'usinage ;
- Le temps d'usinage estimé de l'opération ;
- Les conditions de coupe.

Ainsi, à la fin de l'étape 3, les gammes sont définies et classées. Il reste maintenant à prendre en compte le risque et d'agréger les données pour que le décideur puisse établir son choix final.

6.5 Etape 4 : utilisation de la théorie du choix social

L'onglet « Résultats » comprend un tableau regroupant les valeurs du MCP et d'indicateurs de performance pour le nombre de gammes que le méthodiste souhaite afficher (Tableau 28).

Gamme N°	gamme 1	gamme 2	gamme 3	gamme 4	gamme 5
Valeur MCP	0,073	0,073	0,074	0,077	0,082
Temps VA (min)	1419,350	1415,078	1412,287	1426,311	1339,048
Temps non VA (min)	155,6	155,6	160,1	170,6	179,6
Efficacité	0,901	0,901	0,898	0,893	0,882
Temps changement accessoire (min)	45	45	45	45	40
Temps changement outil (min)	56	56	56	56	64
Temps changement orientation (min)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Temps changement plaquette (min)	53	53	57,5	68	74
coût carbure (€)	1641	1716	1593	1761,9	1833
Indice de risque	1,154	3,868	1,952	0,875	1,026

Tableau 28 : Tableau regroupant les performances des meilleures gammes générées

Cet onglet comprend également des indications sur les gammes les plus performantes au regard des critères de la théorie du choix social que nous avons choisi d'implémenter (Tableau 29).

Majorité relative	La gamme 1 est la plus performante
Critère de Borda	La gamme 4 est la plus performante
Critère de Condorcet	Il n'y a pas de vainqueur de Condorcet

Tableau 29 : Exemple de résultats de la théorie du choix social

6.6 Base de données outils

Utilisée comme ressource des étapes précédentes, la base de données outils coupants est générée dans l'onglet intitulé « BDD outils ». Les principes et caractéristiques de la base de données outils ont été posés au paragraphe 2.3 du cinquième chapitre. L'onglet intitulé « BDD outils » représente le support informatique de cette base de données outils. Le tableau répertorie les différents outils ligne par ligne et leurs références sont utilisées pour aider le méthodiste à choisir lors de la création des gammes enveloppes (Tableau 30). Un masque de saisie peut être utilisé pour faciliter la rentrée des données (Figure 51)

Ref outil	Type outil	Cycle	∅	L	Rc	As max	Vc	Fz min	Fz max	Ap max	Ae min	Ae max	Durée de vie	Z
Outil A	Fraise en bout	Contournage	20	55	0	0,48	20	0,05	0,15	41	0,5	5	40	4
Outil B	Fraise Grande avance	Surfaçage	25	200	0	0,12	40	0,3	0,5	0,5	2	18	45	3
Outil C	Fraise torique	Surfaçage	25	290	6	0,25	50	0,1	0,2	2,5	5	22	30	2
Outil D	Fraise Grande avance	Rainurage	32	290	1,2	0,5	40	0,3	0,6	1	5	32	25	2

Tableau 30 : Extrait de la base de données outils coupants intégrée

Figure 51 : Masque de saisie d'un nouvel outil coupant

Pour créer les références outils, plusieurs types d'outils sont identifiés afin de guider le methodiste dans la création d'un nouvel outil dans la base de données. Les types d'outils sont présentés dans le Tableau 31 avec leurs abréviations utilisées pour la création des références d'outils :

Type outil	Désignation
Alésoir	AL
Foret	FO
Foret à centrer	FOC
Fraise à aléser	FR AL
Fraise à chanfreiner	FR CH
Fraise à fileter	FR FIL
Fraise torique	FR TOR
Fraise à rainurer	FR RAN
Fraise à rayonner	FR RAY
Fraise à surfacer	FR SURF
Fraise à surfacer-dresser	FR 2T
Fraise à tréfler	FR TRE
Fraise disque 2 tailles	FR D2T
Fraise disque 3 tailles	FR D3T
Fraise en bout	FR BT
Fraise Grande avance	FR GA
Fraise hémisphérique	FR HEM
Fraise hérisson	FR HER
Taraud	TA

Tableau 31 : Types outils et abréviations associées

Des cycles d'usinage ou stratégies d'usinage sont aussi définis. Il en existe plusieurs en fonction des géométries et des outils à disposition (Tableau 32).

type Cycle	Désignation
Alésage	AL
Chanfreinage	CHA
Contournage	CONT
Copiage	COP
Filetage-Taraudage	FIL
Perçage	PER
Rainurage	RAI
Surfaçage	SURF
Surfaçage-Dressage	SURF-DRE
Taraudage	TAR
Tréflage	TREF
Tronçonnage	TRON

Tableau 32 : Cycles d'usinage référencés et leurs abréviations

7. Dimensionnement du cas d'étude

7.1 Présentation de la pièce

Afin d'étalonner les résultats donnés par la méthode proposée, nous reprenons le cas d'étude présenté au chapitre 1. C'est une pièce de structure aéronautique de grande dimension, usinée dans un alliage de titane.

Pour simplifier le traitement de ce cas, nous allons considérer la pièce comme étant symétrique par rapport à un plan vertical (Figure 52). Les zones qui traversent le plan de symétrie seront entièrement considérées (zone centrale bleue et surface plane verte) et les zones qui existent en symétrie ne seront alors analysées qu'une seule fois (zones d'autres couleurs).

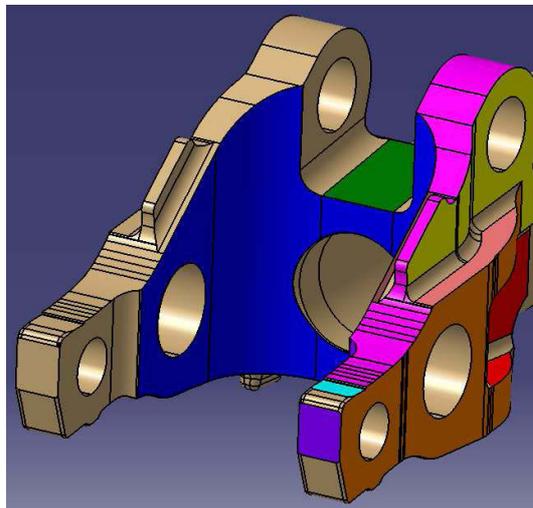


Figure 52 : Zones à usiner

En accord avec les méthodistes actifs sur ce cas d'application, douze zones à usiner sont définies sur la pièce et sont présentées Figure 53. Ces douze zones sont considérées comme indépendantes.

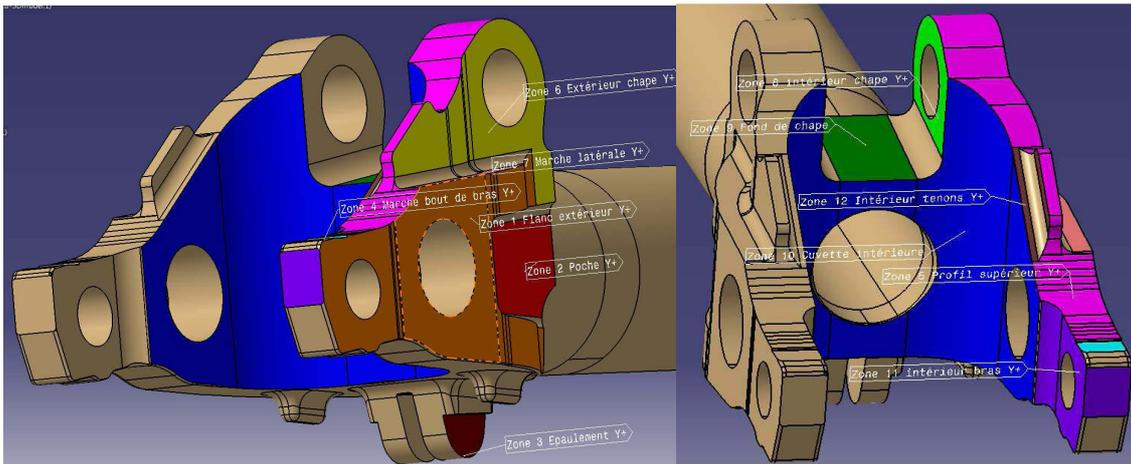


Figure 53 : Identifications des zones à usiner

Cette géométrie est usinée sur une machine à 3 axes continus avec une possibilité d'ajout d'une tête à renvoi d'angle, permettant d'utiliser un quatrième axe positionné. Une matrice des changements d'orientation et de changements d'accessoire est construite pour cette machine et intégrée à l'outil informatique.

Une liste de 36 outils est définie comme base de données pour cet exemple.

7.2 Réalisation de l'AHP pour l'étape 3

Dans le cas d'étude, il est nécessaire de définir un modèle de prise de décision en utilisant la méthode AHP. Ce modèle décisionnel est défini pour représenter de manière la plus fidèle le comportement décisionnel des méthodistes de l'atelier. Dans le cadre de nos travaux, nous avons soumis le modèle hiérarchique présenté au chapitre 4, à un méthodiste. Après l'établissement d'un modèle hiérarchique du problème de décision, les décideurs procèdent à une comparaison deux à deux des critères entre eux ainsi qu'à une comparaison deux à deux des diverses alternatives et solutions au problème étudié vis-à-vis des critères. Cette comparaison se fait au moyen d'une matrice comme celle présentée Tableau 33.

Décideur X	Temps gamme	Coût carbure	Efficacité	Vecteur priorité	Incohérence :
Temps gamme	1	2	1	36,82%	8,16%
Coût carbure	0,5	1	0,2	13,86%	
Efficacité	1	5	1	49,32%	

Tableau 33 : Exemple de matrice de comparaison de critères

Cette matrice montre une comparaison de critères différents (Temps gamme, Coût carbure et efficacité). L'avant dernière colonne indique l'importance de chaque critère, qui correspond au poids qui lui sera attribué pour la somme pondérée, et est le reflet du comportement décisionnel du décideur. La dernière colonne présente l'indice de cohérence du jugement, qui garantit la satisfaction du deuxième axiome de l'AHP si l'indice de cohérence est inférieur à 10%.

Un accompagnement sur la prise en main de la méthode doit être fait car les réponses des décideurs ont un impact important sur les valeurs des poids.

Ainsi lors des entretiens, les décideurs ont dû répondre aux questions suivantes :

Chapitre 6 : Présentation de l'outil informatique et application à un cas industriel

- A valeur de temps égale, auquel accordez-vous le plus d'importance ?
 - o Exemple de réponse : Entre 3 minutes de temps d'usinage et 3 min de temps de changement d'outils, il est préférable d'optimiser le temps d'usinage. Il a donc plus d'importance
- A quel critère accordez-vous le plus d'importance ?
 - o Exemple de réponse : Entre une gamme efficace avec un temps d'usinage plus long qu'une autre gamme ayant une efficacité moindre, il est préférable de choisir la gamme avec le temps d'usinage le plus court. Le temps d'usinage est donc plus important que l'efficacité.

Pour appuyer ces questions, un panel de gammes fictives ayant des caractéristiques différentes selon les critères est présenté aux décideurs. La comparaison de ces différentes gammes aide le décideur à se représenter ses préférences face à un cas concret. Le Tableau 34 présente quelques gammes fictives.

	Temps gamme	Coût carbure	Efficacité
Solution 1	0,1	0,7	0,6
Solution 2	0,2	0,5	0,3
Solution 3	0,7	0,3	0,4
Solution 4	0,5	0,9	0,8

Tableau 34 : Gammes fictives pour les critères de niveau 1

Chaque réponse est notée sur l'échelle de Saaty (T. L. Saaty, 1980) (Tableau 6) pour construire la matrice des importances relatives des critères. Ainsi, le vecteur décisionnel associé à chaque décideur peut être calculé. Les tableaux suivants (Tableau 35 et Tableau 36) présentent les matrices de préférences et les vecteurs décisionnels associés du méthodiste interviewé.

Décideur 1

Temps gamme	Temps de changement d'orientation	Temps de changement d'accessoire	Temps de changement d'outils	Temps de changement de plaquettes	Temps d'usinage	Vecteur priorité	incohérence :
Temps de changement d'orientation	1,00	0,33	0,17	0,17	0,17	4,24%	8,20%
Temps de changement d'accessoire	3,00	1,00	0,33	0,20	0,25	8,37%	
Temps de changement d'outils	6,00	3,00	1,00	0,33	0,20	15,75%	
Temps de changement de plaquettes	6,00	5,00	3,00	1,00	0,50	29,40%	
Temps d'usinage	6,00	4,00	5,00	2,00	1,00	42,24%	

Tableau 35 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste pour les critères de niveau 2

Décideur 1	Temps gamme	Coût carbure	Efficacité	Vecteur priorité	Incohérence :
Temps gamme	1,00	2,00	1,00	41,11%	4,63%
Coût carbure	0,50	1,00	1,00	26,11%	
Efficacité	1,00	1,00	1,00	32,78%	

Tableau 36 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du décideur 1 pour les critères de niveau 1

Ce décideur a un jugement cohérent au regard du critère de la méthode AHP. Son vecteur priorité est utilisé pour les tests qui servent au paramétrage de l'algorithme.

8. Paramétrage de l'algorithme génétique

8.1 Définition des tests

Afin de déterminer les réglages optimaux de l'algorithme génétique, un plan d'expériences complet est réalisé en prenant en compte les facteurs suivants :

- Nombre d'itérations (3 niveaux) : 50, 150, 300 ;
- Taille de la population (3 niveaux) : 20, 50, 100 ;
- Probabilité de croisement (3 niveaux) : 0.2, 0.4, 0.6 ;
- Probabilité de mutation (3 niveaux) : les probabilités de mutation se répartissent sur des mutations de séquençement, de gammes enveloppes et d'outils. Les trois probabilités sont considérées comme égales et ont comme niveaux 0.1, 0.2, 0.3 ;
- Nombre de meilleurs individus conservés (2 niveaux) en pourcentage de la population : les 10% ou 30% meilleurs individus d'une population sont conservés entre deux itérations;
- Pourcentage d'individus conservés (2 niveaux) : 10% et 25% de la population sont conservés.
- Pourcentage de changement de séquençement (2 niveaux) : 25% ou 50% de la population initiale sont générées par changement de séquençement.

8.2 Analyse des tests

Afin de faire ressortir la performance de chaque expérience, la Figure 54 présente la meilleure valeur du macro-indicateur de performance *MCP*, à minimiser, obtenu à chaque test.

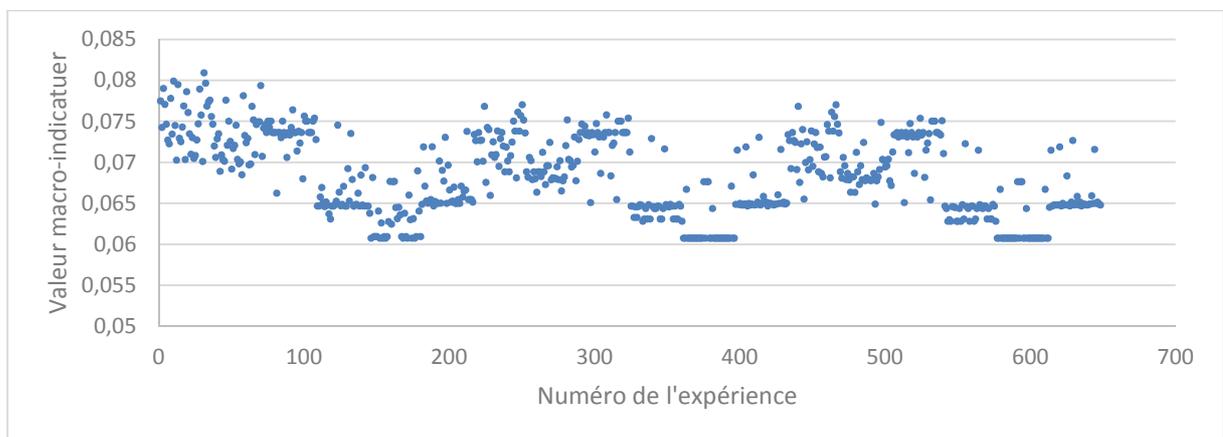


Figure 54 : Meilleure valeur du MCP obtenue pour chaque test

68 expériences ont obtenu la valeur la plus faible du *MCP*, et sont analysées. Les valeurs de leurs différents paramètres sont données en Annexe 1. Ces 68 tests ont pour point commun une taille de population initiale $Nb_{init}^{pop} = 100$ et un pourcentage de changement de séquençement $P_{init}^{seq} = 25\%$.

Les figures suivantes (Figure 55, Figure 56, Figure 57) donnent l'évolution de la valeur du *MCP* au cours des itérations pour les tests à 50, 150 et 300 itérations qui ont obtenu les meilleurs valeurs du *MCP*.

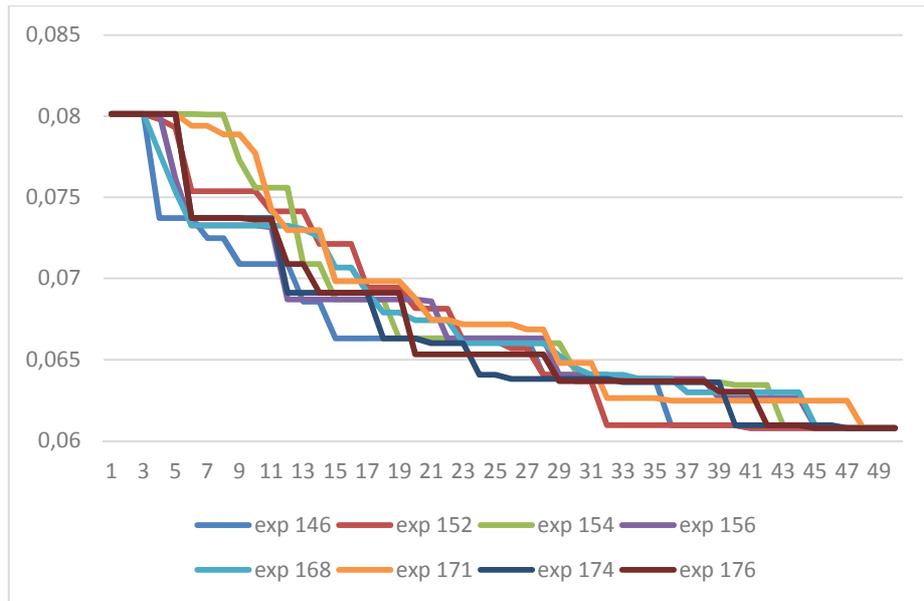


Figure 55 : Convergence MCP sur les tests à 50 itérations

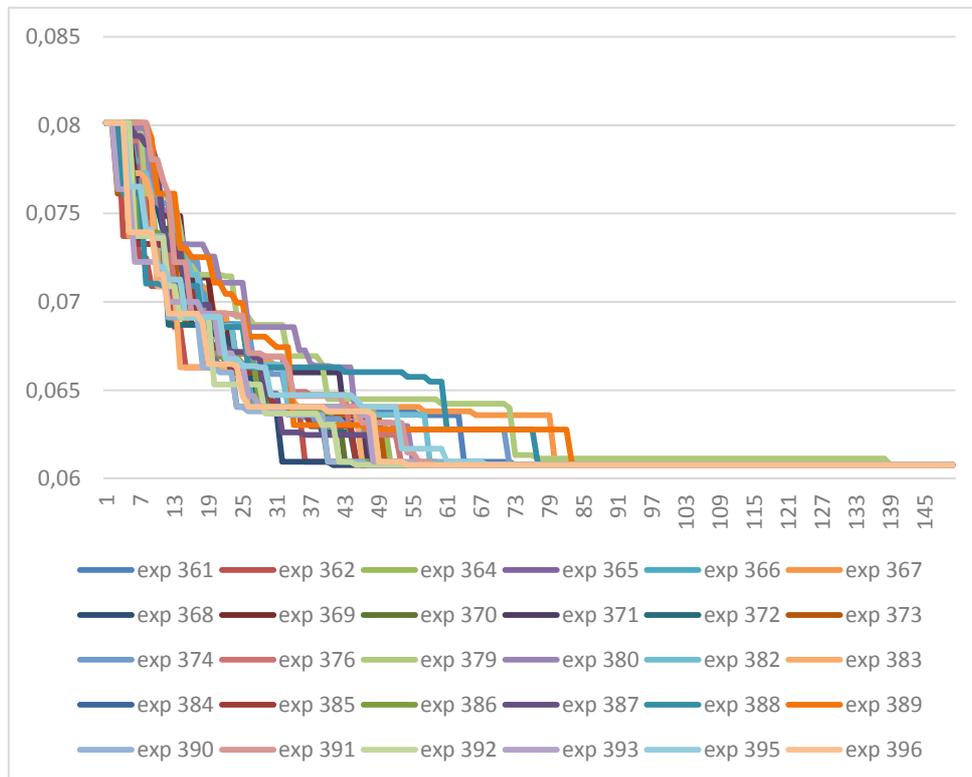


Figure 56 : Convergence MCP sur les tests à 150 itérations

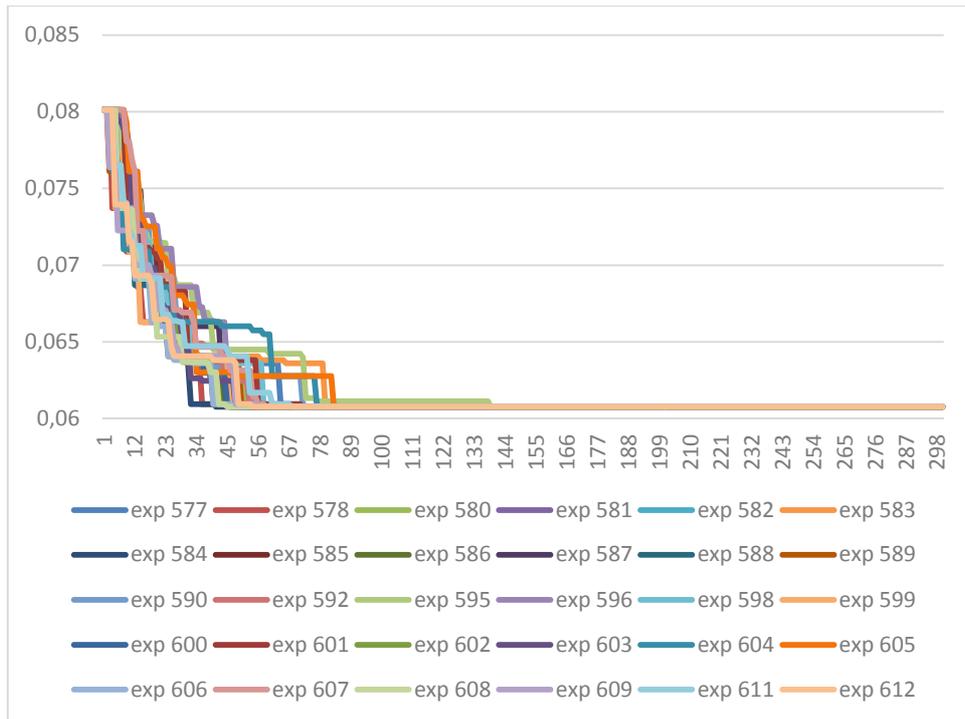


Figure 57 : Convergence MCP sur les tests à 300 itérations

Un nombre plus important de tests ont obtenus la meilleure valeur du *MCP* lorsque le nombre d'itérations Nb_{it} est supérieur à 50. De manière à assurer une exploration importante de l'espace des solutions, le nombre d'itérations est fixé à $Nb_{it} = 300$. De plus, les tests à 300 itérations s'effectuent en environ une heure, ce qui reste compatible avec une utilisation industrielle.

Les valeurs de pourcentage d'individus gardés $P_{tournoi}$ n'ont en revanche pas d'impact significatif sur la vitesse de convergence des tests comme le montre la Figure 58.

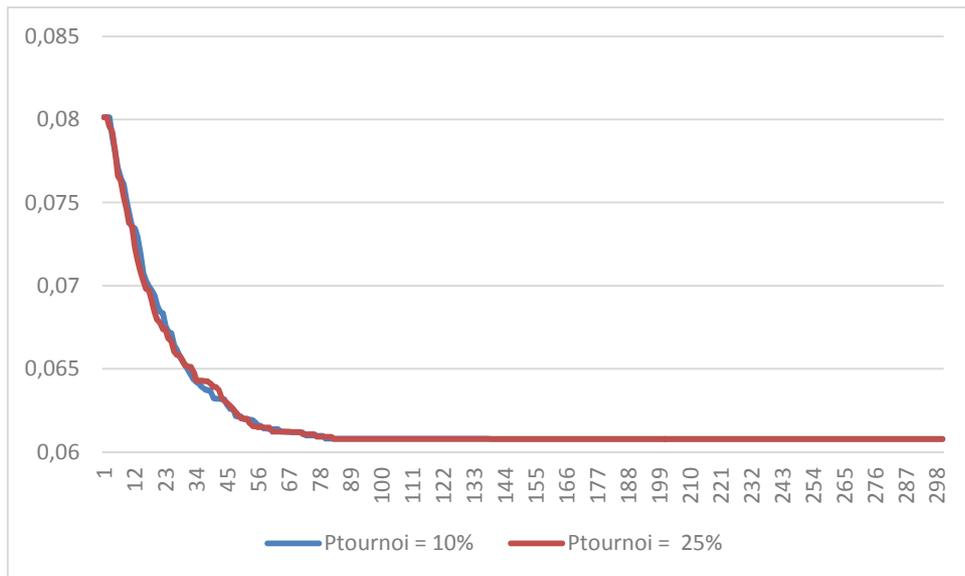


Figure 58 : Comparaison des valeurs de $P_{tournoi}$ sur la vitesse de convergence de l'algorithme

La même conclusion est apportée par l'analyse des résultats obtenus pour les pourcentages de meilleurs individus conservés (Figure 59).

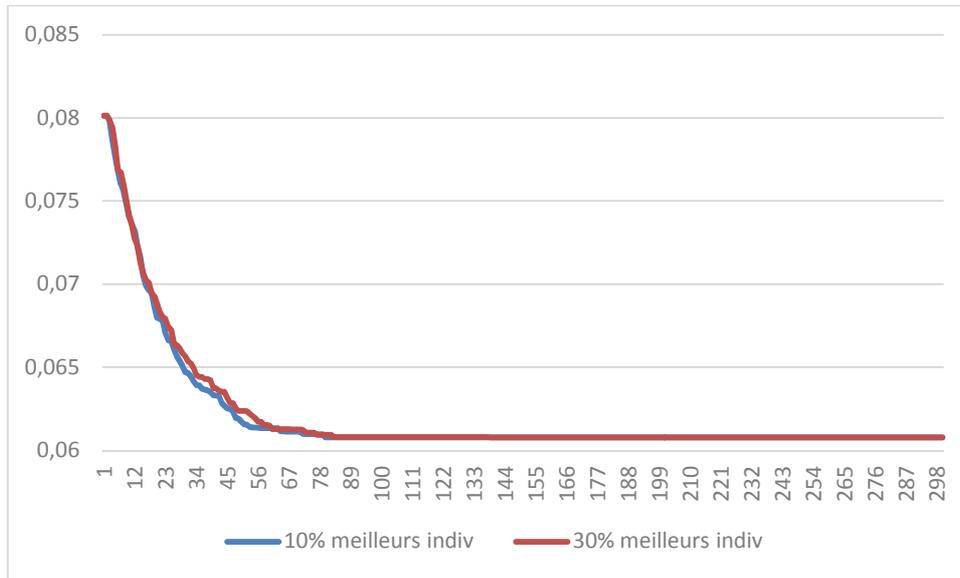


Figure 59 : Comparaison de l'influence du pourcentage de meilleurs individus conservés sur la convergence

De manière à favoriser l'innovation et l'exploration du domaine des solutions possibles par l'algorithme, ces valeurs sont fixées à 10%. 8 tests possèdent ces caractéristiques. Leur analyse montre que la meilleure gamme obtenue est identique pour tous les tests et est présentée dans le Tableau 37 et le Tableau 38.

Gamme N°	1
Valeur MCP	0,12155189
Temps VA	1805,83979
Temps non VA	208,2
Efficacité	0,89662568
Temps chgt accessoire	50
Temps chgt outil	80
Temps chgt orientation	1,2
Temps chgt plaquette	77
Coût carbure	2568

Tableau 37 : Valeurs des indicateurs de performance de la meilleure gamme générée par les tests

Cette gamme respecte les conditions d'antériorité imposées sur l'ordre des opérations pour une zone ainsi que les conditions d'antériorité entre les zones. C'est donc une gamme dont la faisabilité est avérée. De plus, une analyse des valeurs des indicateurs de performance montre des ordres de grandeurs en accord avec les connaissances du cas de fabrication et le savoir-faire de l'entreprise.

Ces tests ont été réalisés sans distinction sur les valeurs de probabilité de mutations. Des expérimentations supplémentaires sont nécessaires afin de déterminer l'impact des différentes mutations sur les résultats, et ainsi définir un réglage final.

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle
OP'1	Zone 1	X+	Finition	Outil A	Copiage
OP'2	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil B	Contournage
OP'3	Zone 3	Z-	Finition	Outil C	Contournage
OP'4	Zone 4	X+	Ebauche	Outil D	Contournage
OP'5	Zone 5	X+	Ebauche	Outil D	Contournage
OP'6	Zone 6	Y+	Ebauche	Outil D	Contournage
OP'7	Zone 6	Y+	Finition	Outil F	Copiage
OP'8	Zone 2	Y+	Finition	Outil F	Copiage
OP'9	Zone 5	Y+	Finition	Outil F	Copiage
OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil E	Contournage
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil D	Contournage
OP'12	Zone 9	X-	Finition	Outil D	Contournage
OP'13	Zone 10	X-	Ebauche	Outil D	Contournage
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil B	Contournage
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil F	Contournage
OP'16	Zone 10	X-	Finition	Outil G	Contournage
OP'17	Zone 4	X+	Finition	Outil G	Contournage
OP'18	Zone 12	X+	Ebauche	Outil G	Contournage
OP'19	Zone 12	X+	Finition	Outil E	Contournage

Tableau 38 : Description de la meilleure gamme générée

8.3 Expérimentations complémentaires

Pour définir les réglages à appliquer sur les valeurs de probabilité de croisement et de mutations, un plan d'expérience complémentaire est mis en place. Les diverses probabilités seront testées avec les valeurs suivantes :

- Probabilité de croisement (3 niveaux) : 0.2, 0.4, 0.6 ;
- Probabilité de mutation de séquençement (3 niveaux) : 0.1, 0.3, 0.6 ;
- Probabilité de mutation de zone (3 niveaux) : 0.1, 0.3, 0.6 ;
- Probabilité de mutation d'outil (3 niveaux) : 0.1, 0.3, 0.6 ;

Les autres paramètres prennent les valeurs déterminées au paragraphe précédent. Le plan d'expériences complet comprend 81 expériences (Annexe 2). Cependant, les probabilités de mutation s'additionnent pour donner la probabilité de mutation globale P_m . Il doit être possible la probabilité pour un individu de ne pas muter $P_{\bar{m}}$. De manière à favoriser l'innovation et la diversité des gammes proposées par l'outil, cette probabilité $P_{\bar{m}}$ doit satisfaire la contrainte suivante :

$$P_{\bar{m}} > 0 \quad (93)$$

Cela amène la contrainte suivante :

$$P_m < 1 \quad (94)$$

Cette contrainte réduit à 33 expériences le nombre d'expériences complémentaires. L'analyse de ces expériences doit permettre la définition complète du réglage final utilisé pour le bon fonctionnement de l'algorithme.

8.4 Analyse des résultats

Les tests ont été analysés selon la meilleure valeur du MCP obtenue, ainsi que selon l'indice de l'itération à laquelle cette valeur est rencontrée pour la première fois. Les mécanismes de croisement et de mutation ont été donnés au chapitre 5.

8.4.a Probabilité de croisement

La Figure 60 présente les valeurs minimales obtenues en fonction de la valeur de la probabilité P_c . On observe que seule la valeur $P_c = 0,6$ permet l'obtention de la meilleure valeur indépendamment des autres paramètres.

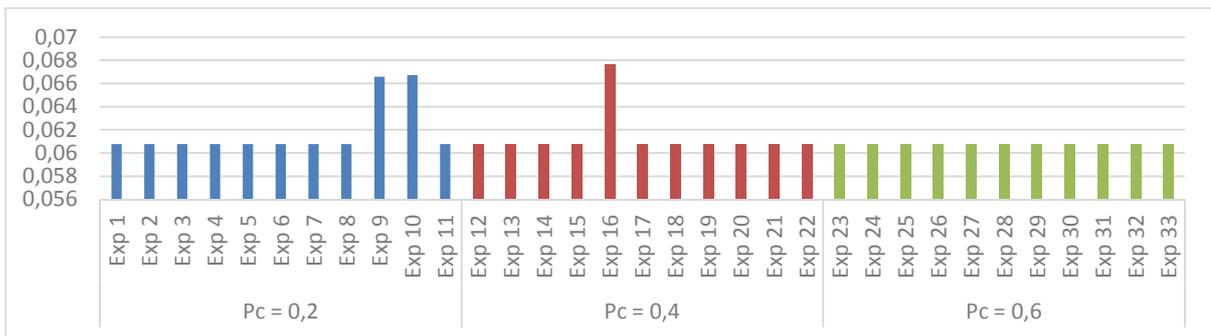


Figure 60 : Valeur minimale du MCP obtenue pour chaque test en fonction de la valeur de P_c

La Figure 61 donne le numéro de l'itération à laquelle la meilleure valeur de chaque test est rencontrée pour la première fois. L'analyse de cette figure indique que lorsque $P_c = 0,4$, l'algorithme a tendance à converger plus vite.

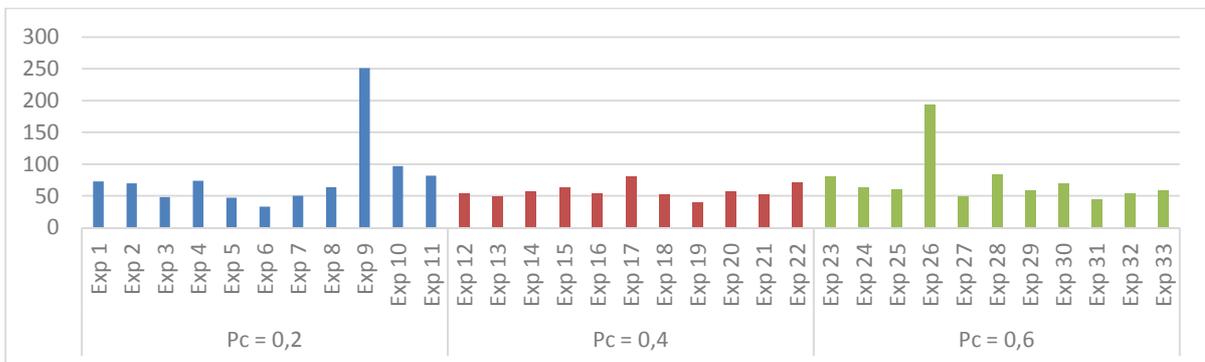


Figure 61 : Numéro de la première itération d'apparition de la meilleure valeur du MCP en fonction de la valeur de P_c

Ainsi, le choix est à faire entre $P_c = 0,4$ et $P_c = 0,6$. La volonté de l'outil étant d'apporter de l'innovation et une diversification des gammes générées, la valeur $P_c = 0,6$ est choisie de manière à favoriser le croisement des individus.

8.4.b Probabilité de mutation de séquençement

La Figure 62 présente les meilleures valeurs obtenues en fonction des valeurs de la probabilité P_{ms} . Lorsque $P_{ms} = 0,6$, les valeurs sont systématiquement les plus basses. Néanmoins, seuls trois tests sur les 33 du plan d'expériences utilisent cette valeur. En comparaison, les valeurs obtenues avec $P_{ms} = 0,1$ sont identiques, à

une exception près, et sont plus nombreuses. La valeur de 0,4 est écartée à cause de résultats moins intéressants.

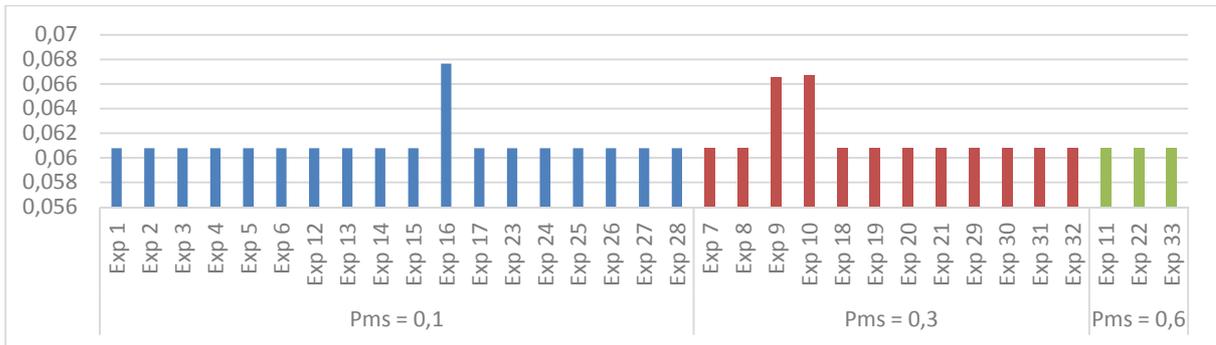


Figure 62 : Valeur minimale du MCP obtenue pour chaque test en fonction de la valeur de P_{ms}

La Figure 63 donne l'indice de l'itération, à laquelle la meilleure valeur de chaque test est rencontrée pour la première fois. L'analyse de la figure confirme le bon fonctionnement de l'algorithme lorsque $P_{ms} = 0,1$ ou $0,6$.

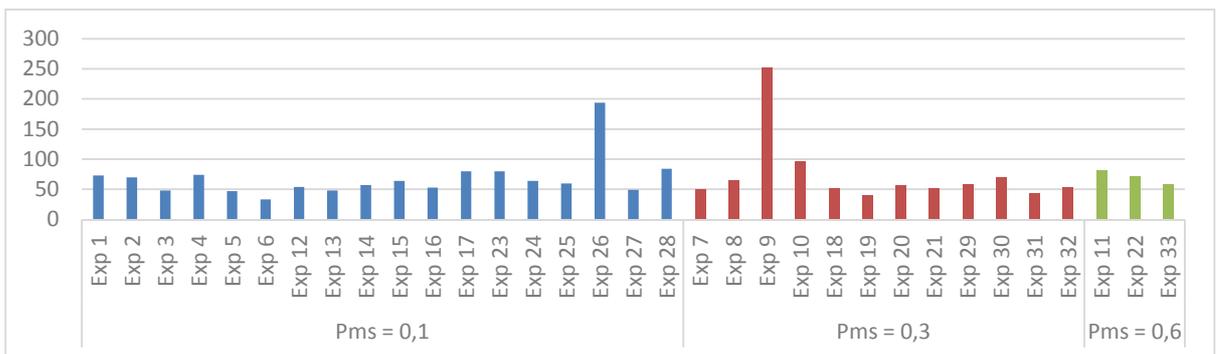


Figure 63 : Numéro de la première itération d'apparition de la meilleure valeur du MCP en fonction de la valeur de P_{ms}

Le choix est à faire entre $P_{ms} = 0,1$ et $P_{ms} = 0,6$. La valeur de 0,6 paraît intéressante car elle présente des meilleures valeurs MCP plus faibles mais elle n'est pas le plus rapide. De plus, il n'y a que 3 expériences faites avec cette valeur, par rapport aux 18 tests effectués avec la valeur de 0,1. Les tests avec $P_{ms} = 0,1$ donnent quasi systématiquement à la même valeur minimale (à une exception près). En moyenne, ce réglage est le plus rapide sur tous les tests effectués.

8.4.c Probabilité de mutation de zone

La Figure 64 présente les meilleures valeurs obtenues en fonction des valeurs de la probabilité P_{mGE} . L'analyse de cette figure permet d'écartier la valeur de 0,3. Les tests associés donnent les résultats les moins satisfaisants au regard de la valeur du MCP.

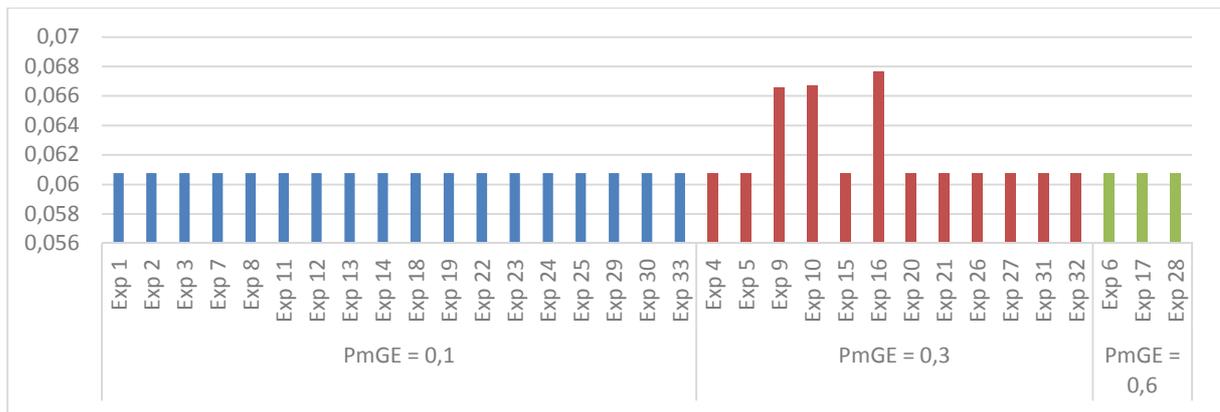


Figure 64 : Valeur minimale du MCP obtenue pour chaque test en fonction de la valeur de P_{mGE}

La Figure 65 donne l'indice de l'itération à laquelle la meilleure valeur de chaque test est rencontrée pour la première fois. L'analyse de cette figure confirme l'éviction de la valeur de 0,3.

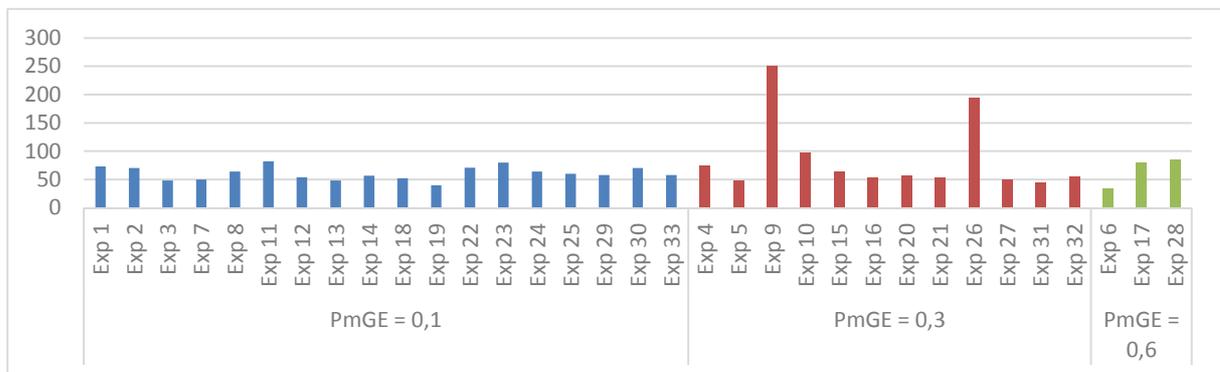


Figure 65 : Indice de la première itération d'apparition de la meilleure valeur du MCP en fonction de la valeur de P_{mGE}

Le choix est donc à faire entre $P_{mGE} = 0,1$ et $P_{mGE} = 0,6$. L'analyse seule de ces figures ne permet pas de choisir l'une ou l'autre.

8.4.d Probabilité de mutation d'outil

La Figure 66 présente les meilleures valeurs obtenues en fonction des valeurs de la probabilité P_{mo} .

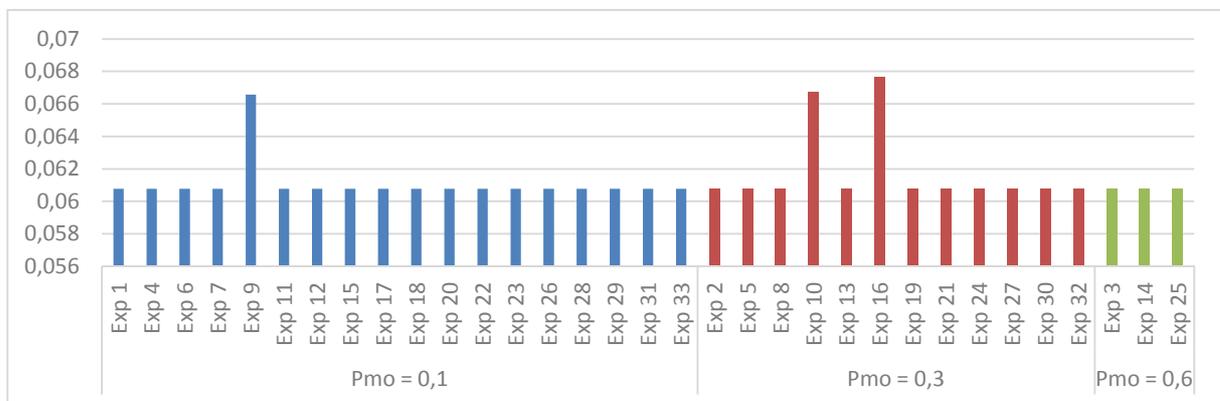


Figure 66 : Valeur minimale du MCP obtenue pour chaque test en fonction de la valeur de P_{mo}

La Figure 67 donne l'indice de l'itération à laquelle la meilleure valeur de chaque test est rencontrée pour la première fois.

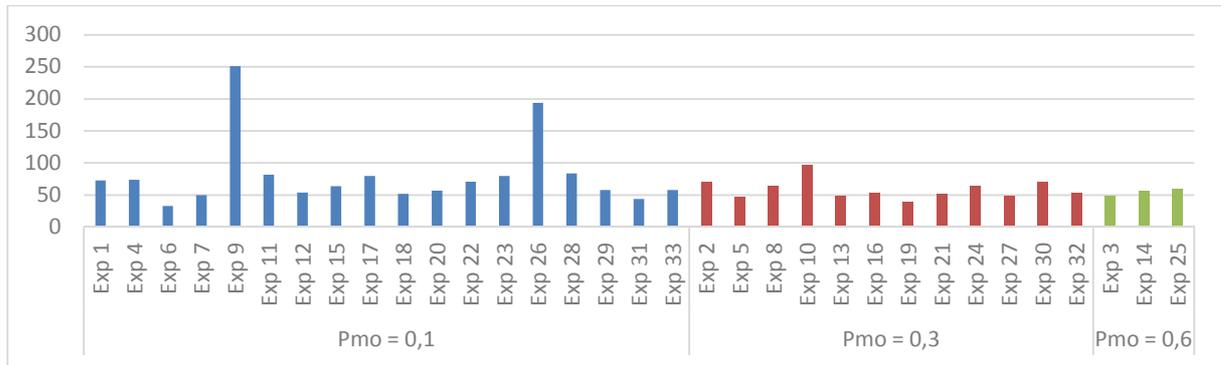


Figure 67 : Numéro de la première itération d'apparition de la meilleure valeur du MCP en fonction de la valeur de P_{mo}

Les cas où $P_{mo} = 0,1$ sont les plus nombreux et donnent presque systématiquement les meilleurs valeurs du MCP, mais montrent une certaine irrégularité sur la vitesse à laquelle cette valeur est atteinte.

Les cas où $P_{mo} = 0,3$ sont ceux qui donnent le plus de hautes valeurs du MCP mais sont stables et performantes au regard de la vitesse à laquelle cette valeur est atteinte.

Les cas où $P_{mo} = 0,6$ donnent systématiquement les meilleurs valeurs du MCP et apparaissent rapides et stables mais seulement 3 tests utilisent cette valeur.

L'analyse seule de ces résultats ne permet pas de statuer sur une valeur particulière. Ils devront être confrontés aux autres résultats

8.5 Choix du réglage final

Dans notre contexte d'étude, les méthodistes sont confrontés à des géométries simples. Ces géométries offrent peu de solutions différentes pour être usinées. Ainsi, les mutations de zone et de séquençement ne représentent pas des gisements importants de gain ou d'innovation. A contrario, un grand nombre de références d'outils coupants différents, connus ou non connus, peut être exploité au sein d'un bureau des méthodes et représente un levier important pour l'amélioration des performances d'une fabrication par usinage.

Ainsi, la probabilité de mutation d'outils P_{mo} est fixée à 0,6 de manière à favoriser l'innovation venant de l'utilisation de plusieurs outils coupants différents.

Avec $P_{mo} = 6$, la contrainte (94) impose $P_{mGE} = 0,1$ et $P_{ms} = 0,1$.

Le réglage final de l'algorithme est donc :

- Nombre d'itérations Nb_{it} : 300 ;
- Taille de la population Nb_{init}^{pop} : 100 ;
- Pourcentage de changement de séquençement P_{init}^{seq} : 25% ;
- Pourcentage de meilleurs individus conservés $P_{meilleurs}$: 10% ;

- Pourcentage d'individus gardés $P_{tournoi}$: 10%
- Probabilité de croisement P_c : 0,6 ;
- Probabilité de mutation de séquençement P_{ms} : 0,1 ;
- Probabilité de mutation de zones P_{mGE} : 0,1 ;
- Probabilité de mutation d'outils P_{mo} : 0,6 ;

Ainsi, il est à présent possible d'appliquer l'algorithme au cas d'étude afin de vérifier la pertinence des gammes d'usinage générées.

9. Application au cas d'étude

9.1 Présentation des résultats données par l'outil

En utilisant les valeurs de paramètres déterminées auparavant sur le cas d'étude présenté au début de ce chapitre, l'outil informatique donne 100 gammes de fabrication. Sur ces 100 gammes, 50 sont des gammes différentes, les autres sont une copie d'une gamme déjà existante.

Nous allons nous intéresser ici aux 5 meilleures gammes différentes proposées par l'outil informatique. Le détail des 5 gammes est présenté en Annexe 3. Le Tableau 39 regroupe les valeurs de chaque indicateur de performance pour ces 5 gammes proposées à la fin de l'étape 3 au méthodiste.

Gamme N°	1	2	3	4	5
Valeur Macro Indicateur	0,12155	0,12191	0,12312	0,12338	0,12476
Temps VA	1805,8	1792,7	1887,7	1874,5	1892,9
Temps NVA	208,2	214,2	217,2	223,2	231,2
Efficacité	0,8966	0,8933	0,8968	0,8936	0,8912
Temps changement accessoire	50	50	50	50	50
Temps changement outil	80	72	80	72	64
Temps changement orientation	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Temps changement plaquette	77	91	86	100	116
Coût carbure	2568	2228	2792	2452	2942
Risque Optimiste	0,0964	0,0964	0,0964	0,0964	0,0964
Risque Neutre	2,0284	1,9198	3,165	3,0564	2,9483
Risque Pessimiste	6,6217	6,6217	23,1148	23,1148	23,1148
Risque Sensible	-8,5073	-8,1127	-15,4519	-15,375	-15,2199

Tableau 39 : Récapitulatif des valeurs de performances des 5 meilleures gammes générées par le logiciel

Nous pouvons observer que les 5 meilleures gammes proposées par l'outil informatique sont proches en termes de valeur de MCP , avec des écarts se situant entre 0,3% et 2,6%. Néanmoins, elles présentent des écarts plus importants, pouvant aller jusqu'à 50%, lorsque l'on analyse les indicateurs de performance.

L'analyse détaillée des gammes nous apprend que les séquençements d'opérations sont identiques entre les 5 gammes et que les différences se font à raison d'un ou deux outils coupants qui diffèrent d'une gamme à

l'autre. Afin de vérifier la pertinence et la performance réelles de ces gammes, il est nécessaire de les comparer aux gammes existantes utilisées sur le cas de production étudié.

Pour finaliser l'étape 4, nous devons appliquer les méthodes du vote social (Méthode de la majorité relative, Méthode de Condorcet, Méthode de Borda) pour guider le méthodiste dans une analyse plus fine des performances élémentaires en intégrant l'indicateur de risque. Nous pouvons remarquer que les 5 gammes ont les mêmes valeurs de performance sur les indicateurs suivants : Temps de changement accessoire, Temps de changement orientation et Risque optimiste. Par conséquent, nous ne les prendrons pas en compte dans notre analyse. Le Tableau 40 résume l'application des 3 méthodes précitées en fonction des attitudes décisionnelles du méthodiste face au risque (pessimiste, neutre, et sensible). Nous pouvons remarquer que la gamme 1 ressort dans la plupart des situations. Par conséquent nous retenons cette gamme pour la suite de l'analyse.

	Majorité relative	Condorcet	Borda
attitude pessimiste face au risque	Gamme 1	Gamme 1	Gammes 1 et 2
attitude neutre face au risque	Gammes 1 et 2	Gamme 2	Gamme 2
attitude sensible face au risque	Gamme 1	Gamme1	Gamme 1

Tableau 40 : Application de la théorie du vote social.

9.2 Comparaison avec la gamme initiale et la méthode d'ingénierie classique

La première gamme mise en place sur le cas d'étude ainsi que celle ayant été élaborée par ingénierie classique ont été modélisées conformément au formalisme mis en place lors de ces travaux. Le Tableau 41 regroupe leurs niveaux de performance sur les indicateurs élémentaires ainsi que sur le MCP. Le détail de ces gammes est donné en Annexe 4.

	Gamme initiale	Gamme optimisée classique	Gamme optimisée logiciel
Valeur Macro Indicateur	0,27514	0,25767	0,12155
Temps VA	2650,1	1600,9	1805,8
Temps NVA	833,8	726,4	208,2
Efficacité	0,7607	0,6879	0,8966
Temps changement accessoire	50	30	50
Temps changement outil	176	104	80
Temps changement orientation	2,8	2,4	1,2
Temps changement plaquette	605	590	77
Coût carbure	7460,8	3169,8	2568
Risque Optimiste	0,3952	0,0964	0,0964
Risque Neutre	2,6661	2,4478	2,0284
Risque Pessimiste	13,4034	7,9461	6,6217
Risque Sensible	-12,547	-9,6295	-8,5073

Tableau 41 : Comparaison des niveaux de performances entre les gammes initiales, optimisée et fournie par le logiciel

Il est à noter que la gamme fournie par le logiciel a un *MCP* inférieur de plus de 50% par rapport aux autres gammes. Cet écart est expliqué par la forte différence entre les temps composant le temps NVA, ce qui crée une augmentation de l'efficacité de la gamme logiciel par rapport aux autres gammes. Si les philosophies présentes dans la gamme initiale et celle optimisée en ingénierie classique semblent proches, avec l'usinage de certaines zones situées à des positions voisines dans le séquençement, elles diffèrent fortement de celle utilisée par le logiciel. Cette dernière respectant également les conditions d'antériorités imposées, elle permet de confronter le méthodiste à des solutions qui n'avaient pas été envisagées de prime abord.

De plus, le système propose des solutions pour l'usinage de certaines zones selon des solutions envisagées par les méthodistes, mais qui ne sont pas mis en œuvre, actuellement, pour des considérations technologiques. Cela veut dire que l'outil propose des solutions cohérentes avec le savoir-faire de l'entreprise tout en favorisant l'innovation.

Cette remarque concerne également les choix d'outils et de conditions de coupe. Les outils utilisés par la gamme optimisée par le logiciel sont proches de ceux choisis par la gamme optimisée en ingénierie, validant également le respect du logiciel vis-à-vis du savoir-faire et des connaissances de l'entreprise et du bureau des méthodes. La gamme optimisée en ingénierie propose un temps VA plus faible et une macro-performance moins bonne que la gamme proposée par le logiciel. Cela vient du fait qu'elle a été optimisée avec pour seul objectif la baisse du temps VA et sa performance est donc moindre sur les autres indicateurs. Elle n'aura donc pas été forcément retenue par le système tel qu'il a été réglé. Cela souligne une nouvelle fois que l'expression du vecteur priorité joue un rôle important sur le comportement de l'optimisation. Il est donc nécessaire que le bureau des méthodes définisse précisément ses priorités. Toutefois, dans une méthode manuelle tel que l'ingénierie classique, il est difficile d'appréhender globalement l'ensemble des critères.

10. Impact de l'AHP sur les résultats

De manière à illustrer l'impact du comportement décideur sur le comportement de l'algorithme, trois autres méthodistes ont été sollicités pour modéliser leurs préférences à l'aide de l'AHP, selon les tableaux suivants (Tableau 42, Tableau 43, Tableau 44, Tableau 45, Tableau 46, Tableau 47).

Décideur 2

Temps gamme	Temps de changement d'orientation	Temps de changement d'accessoire	Temps de changement d'outils	Temps de changement de plaquettes	Temps d'usinage	Vecteur priorité	incohérence :
Temps de changement d'orientation	1,00	0,33	0,20	0,14	0,11	3,33%	11,60%
Temps de changement d'accessoire	3,00	1,00	0,20	0,20	0,11	5,75%	
Temps de changement d'outils	5,00	5,00	1,00	0,33	0,14	13,50%	
Temps de changement de plaquettes	7,00	5,00	3,00	1,00	0,20	21,33%	
Temps d'usinage	9,00	9,00	7,00	5,00	1,00	56,09%	

Tableau 42 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 2 pour les critères de niveau 2

Chapitre 6 : Présentation de l'outil informatique et application à un cas industriel

Décideur 2	Temps gamme	Coût carbure	Efficacité	Vecteur priorité	Incohérence :
Temps gamme	1,00	3,00	5,00	60,70%	11,88%
Coût carbure	0,33	1,00	5,00	30,33%	
Efficacité	0,20	0,20	1,00	8,97%	

Tableau 43 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 2 pour les critères de niveau 1

Décideur 3

Temps gamme	Temps de changement d'orientation	Temps de changement d'accessoire	Temps de changement d'outils	Temps de changement de plaquettes	Temps d'usinage	Vecteur priorité	incohérence :
Temps de changement d'orientation	1,00	1,00	0,33	0,33	0,20	7,37%	1,24%
Temps de changement d'accessoire	1,00	1,00	0,33	0,33	0,20	7,37%	
Temps de changement d'outils	3,00	3,00	1,00	1,00	0,33	19,52%	
Temps de changement de plaquettes	3,00	3,00	1,00	1,00	0,33	19,52%	
Temps d'usinage	5,00	5,00	3,00	3,00	1,00	46,24%	

Tableau 44 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 3 pour les critères de niveau 2

Décideur 3	Temps gamme	Coût carbure	Efficacité	Vecteur priorité	Incohérence :
Temps gamme	1,00	5,00	2,00	58,13%	0,32%
Coût carbure	0,20	1,00	0,33	10,96%	
Efficacité	0,50	3,00	1,00	30,92%	

Tableau 45 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 3 pour les critères de niveau 1

Décideur 4

Temps gamme	Temps de changement d'orientation	Temps de changement d'accessoire	Temps de changement d'outils	Temps de changement de plaquettes	Temps d'usinage	Vecteur priorité	incohérence :
Temps de changement d'orientation	1,00	0,50	0,20	0,20	0,14	4,30%	9,62%
Temps de changement d'accessoire	2,00	1,00	0,33	0,20	0,14	6,14%	
Temps de changement d'outils	5,00	3,00	1,00	0,33	0,14	13,11%	
Temps de changement de plaquettes	5,00	5,00	3,00	1,00	0,20	21,69%	
Temps d'usinage	7,00	7,00	7,00	5,00	1,00	54,76%	

Tableau 46 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 4 pour les critères de niveau 2

Décideur 4	Temps gamme	Coût carbure	Efficacité	Vecteur priorité	Incohérence :
Temps gamme	1,00	3,00	4,00	61,96%	9,42%
Coût carbure	0,33	1,00	0,50	15,60%	
Efficacité	0,25	2,00	1,00	22,43%	

Tableau 47 : Matrice de préférence et vecteur décisionnel du méthodiste 4 pour les critères de niveau 1

L'indicateur de cohérence est un indicateur de qualité du jugement. On voit que la cohérence du méthodiste 2 est supérieure au seuil donné par Saaty pour les deux niveaux de critères. Ce comportement est à

Chapitre 6 : Présentation de l'outil informatique et application à un cas industriel

mettre en parallèle de celui du méthodiste 4, dont les valeurs de préférences sont très proches du méthodiste 2. Néanmoins, le méthodiste 4 a une cohérence de jugement plus satisfaisante que le méthodiste 2 et serait donc plus à même d'obtenir des gammes d'usinages répondant à ses attentes. Enfin le méthodiste 3 a une cohérence de jugement très forte. Lorsque nous analysons ses matrices, on voit que ce méthodiste n'a pas nuancé son jugement de manière importante entre les critères. Ses préférences appariées ont été réfléchies de manière cohérente, faisant baisser le niveau d'incohérence mais ne faisant pas émerger une réelle prise de position quant à l'importance relative des critères.

Ainsi, la compréhension des questions vis-à-vis de l'expérience acquise, ainsi que le niveau de maîtrise des concepts de l'AHP peuvent induire une fluctuation importante de la cohérence du jugement, ce qui souligne l'importance de la formulation des questions.

Ces fluctuations de cohérence ainsi que ces différences de jugement ont également un impact certain sur le comportement de l'optimisation. En utilisant le réglage déterminé précédemment, l'algorithme a été utilisé sur le cas d'étude en remplaçant le comportement du méthodiste 1 par les trois autres comportements.

Le Tableau 48 regroupe les valeurs des indicateurs de performances et de risque pour la meilleure gamme générée par l'algorithme pour chaque décideur.

Décideur	1	2	3	4
Valeur Macro Indicateur	0,122	0,1	0,142	0,122
Temps VA	1805,84	1458,612	1811,048	1792,706
Temps non VA	208,2	212,4	222,2	214,2
Efficacité	0,897	0,873	0,891	0,893
Temps changement accessoire	50	60	50	50
Temps changement outil	80	96	64	72
Temps changement orientation	1,2	4,4	1,2	1,2
Temps changement plaquette	77	52	107	91
Coût carbure	2568	1939,8	2718	2228
Risque Optimiste	0,192	0,192	0,192	0,192
Risque Neutre	4,056	3,066	3,624	3,84
Risque Pessimiste	13,244	15,684	9,644	13,244
Risque Sensible	-17,014	-14,54	-14,43	-16,226

Tableau 48 : Valeurs des indicateurs de performance de la meilleure gamme générée pour chaque méthodiste

Nous remarquons que malgré des comportements proches, les gammes données pour les méthodistes 2 et 4 sont éloignées en termes de performance.

Les séquencements de ces gammes sont données en Annexe 5. Pour les méthodistes 1, 3 et 4 les séquencements sont identiques, seuls un à deux outils changent, ce qui est cohérent avec leurs performances, également proches sur chaque indicateur.

La gamme du méthodiste 2 est fondamentalement différente dans son séquençement ainsi que dans certains choix d'outils coupants. Cette gamme présente pour caractéristique une efficacité moindre comparativement à celle des autres décideurs. Ainsi, elle intègre des outils coupants plus productifs lors des phases d'usinage mais pénalisants lors des phases sans valeur ajoutée. De plus, elle autorise plus de changement d'accessoire et d'orientation de manière à pouvoir utiliser ces outils plus productifs. Malgré des comportements décideurs considérés proches avec le méthodiste 4, nous observons bien une différence importante dans la solution optimale à la fin de l'étape 3.

La sensibilité de l'optimisation aux comportements décisionnels des méthodistes est donc importante. Ainsi, il convient de ne pas négliger cette modélisation afin de rendre fidèlement compte des attentes du bureau des méthodes. Le comportement décisionnel permet de guider l'algorithme dans son optimisation, et les solutions qu'il génère ne sont qu'une image de ce comportement. Il est important de noter également qu'il n'existe pas un optimum absolu lors de l'optimisation, mais des optimums propre à chaque décideur.

11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons dans une première partie, l'outil ergonomique implantant la méthode proposée dans ces travaux de recherche. Dans une seconde partie, nous avons présenté le réglage des paramètres de l'algorithme proposé. Enfin sur un cas d'étude industriel nous avons comparé la gamme optimisée par la méthodologie proposée dans ces travaux de recherche avec celle industrialisée au départ et celle optimisée par la méthode d'ingénierie classique obtenu après plusieurs mois et plusieurs fabrications.

Il apparaît que l'outil permet de proposer des solutions innovantes alternatives mais qui restent cohérentes avec le savoir-faire de l'entreprise. Nous assistons ainsi à une innovation incrémentale qui peut apporter des bénéfices importants sans susciter de rejets de la part du bureau des méthodes, ni lors de l'implémentation de la gamme au sein de l'atelier de fabrication.

La mise en œuvre des algorithmes génétiques a permis de tester un très grand nombre de solutions en un temps court, ce qui n'était pas envisageable traditionnellement, et rend compatible l'utilisation du logiciel informatique dans un contexte industriel. Les résultats de la méthode sont très encourageants sur le cas d'étude. Toutefois, l'outil doit être confronté à de nouveaux cas de fabrication pour conforter les résultats et les apports de cette méthodologie

Le point-clé de cette méthode reste la définition du comportement décisionnel du ou des méthodistes par la méthode AHP. Sa mise en œuvre suppose que le bureau des méthodes formalise précisément ses attentes en terme de performance. La méthode AHP accompagne cette formalisation car elle guide le méthodiste dans l'expression de ses préférences et fait apparaître les incohérences lors des entretiens sur les importances relatives des critères.

En conclusion, sur le cas industriel posé, la méthode propose une gamme alternative 55% plus performante que la gamme initiale et 53% plus performante que la gamme optimisée par ingénierie classique *au regard du*

Chapitre 6 : Présentation de l'outil informatique et application à un cas industriel

MCP. Elle introduit de l'innovation dans le choix des outils ainsi que dans le séquençement sans toutefois être à l'orthogonal des habitudes des méthodistes pour ne pas provoquer le rejet des gammes proposées par l'outil.

Chapitre 7 : Conclusions et perspectives

Le contexte actuel du marché aéronautique montre un accroissement de la concurrence, qui se répercute sur l'industrie de la sous-traitance industrielle de ces travaux. Pour se démarquer, les sous-traitants ont un besoin nécessaire de gain en productivité, notamment dans le cas des pièces de structures aéronautiques en alliages de titane. Les gains en productivité portent sur l'ensemble des activités du processus de fabrication des pièces, dont notamment les activités d'usinage. L'usinage doit permettre d'atteindre les exigences de qualité et de précision requises, dans un processus de réduction des coûts et des délais de fabrication.

Une première solution possible pour atteindre ces objectifs de productivité est l'utilisation d'une méthode utilisant des techniques de l'ingénierie classique. Grâce à une analyse des fabrications existantes, la mise en avant des gisements de performances permet l'optimisation des gammes d'usinages par des tests du type essais-erreurs et par la recherche d'innovations incrémentales en apprenant des pièces lancées en fabrication pour être facilement intégrées à l'atelier. Néanmoins cette solution nécessite un temps conséquent de mise en œuvre et il est difficile de pouvoir tester de multiples solutions pour guider l'optimisation. Dans le cadre de ces travaux, nous avons exposé une telle démarche appliquée à une pièce de structure aéronautique de grande dimension en alliage réfractaire, composant d'un train d'atterrissage. L'étude conduite en situation industrielle a permis d'atteindre les objectifs de réduction significative du temps d'usinage, mais a pris plusieurs mois et concernés de nombreux ordre de fabrication

Ces travaux ont exploré une seconde voie, qui vise à développer une approche innovante dans la conception et l'optimisation de gammes d'usinage. L'objectif est ici de tester un très grand nombre de gammes diverses en un temps limité, et de les classer au regard de leur performance multicritères perçue, afin d'obtenir la ou les gammes les plus performantes, à partir des données techniques en usage au bureau des méthodes. Pour lever ces deux difficultés, l'approche s'appuie sur un algorithme génétique pour le test et la génération d'un grand nombre de gammes différentes, qui sont classées en utilisant la méthode Analytic Hierarchy Process pour pondérer les différentes performances élémentaires d'une gamme de fabrication Enfin, nous avons voulu formaliser dans ces travaux, le concept de risque lié à la mise en œuvre d'une gamme d'usinage. L'estimation du risque est fondamentale, pour envisager la mise en œuvre d'une nouvelle gamme d'usinage, en sécurité. Le gain est toujours estimé au regard du risque que l'on peut prendre. Dans un premier temps, le risque est estimé par la flexion des outils coupants lors de l'usinage.

Le paramétrage et la validation de la méthode d'optimisation proposée dans ces travaux ont été réalisés sur un cas industriel connu. 300 itérations de 100 solutions sont évaluées en une heure. Parmi celles-ci, les cinq meilleures sont identifiées. Ainsi, ces solutions sont plus performantes au regard de la macro-performance perçue par le bureau des méthodes et cohérentes par rapport au savoir-faire de l'entreprise. Ce qui est fondamental dans le cadre de la mise en place d'un processus d'innovation en situation industrielle. Néanmoins, ces travaux ont montré, que la maîtrise de la méthode AHP reste fondamentale pour le bon fonctionnement de la méthode. En effet, la nature des questions et l'expertise du niveau des réponses jouent un rôle critique dans la formulation du macro-indicateur.

Chapitre 7 : Conclusion et perspectives

Validée sur un cas industriel, cette méthode va être déployée et généralisée au sein du bureau des méthodes d'Aubert et Duval.

Au terme de ces travaux de thèse, plusieurs perspectives apparaissent.

Tout d'abord, nous avons proposé une modélisation spécifique de l'usinage particulièrement adaptée au type de pièces étudiées. Il convient, dorénavant d'élargir le panel des pièces envisageable en enrichissant le modèle de zone à usiner, de manière à prendre en compte le côté complexe de certaines zones identifiables, et notamment la possibilité de traiter l'usinage 5 axes

Puis, au niveau de l'algorithme génétique, il peut être envisagé de développer de nouveaux processus d'enrichissement. En particulier, la mutation outil peut être modifiée de manière à devenir moins restrictive. En effet, aujourd'hui, seul un outil plus petit que celui proposé par le methodiste est choisi. D'autres types de mutations peuvent être ajoutés. Notamment, la modification dimensionnelle de la partie retirée par une opération semble intéressante à définir afin d'optimiser plus précisément les gammes d'usinage.

Enfin, au niveau du choix de la gamme d'usinage optimale, le modèle AHP proposé dans ces travaux peut être enrichi afin d'intégrer la décision floue ou multi-décideur, dans l'objectif d'être toujours plus représentatif du comportement réel des décideurs concernés. De même, il est pertinent d'intégrer un indicateur de distance entre les différentes gammes candidates pour diversifier les populations sur lesquelles travaille l'algorithme génétique, et augmenter la variété des solutions offertes au methodiste. Ainsi, l'utilisation du vote social peut être remplacée par l'utilisation de la méthode TOPSIS car l'idée de la solution certes fictive mais idéale est très intéressante pour évaluer les solutions issues de l'optimisation.

La formalisation et la modélisation du risque reste une perspective majeure de ces travaux. En particulier, il convient d'intégrer un indice de connaissance de l'outil dans la méthode développée, pour mieux prendre en compte de nouveaux outils de coupe et évaluer leur performance au regard du risque induit. Ainsi, une modélisation de la "qualité" ou à la fiabilité de l'information concernant les données fournisseurs peut être proposée, pour améliorer la complétude des informations liées à l'utilisation des outils coupants.

Annexes

1. Annexe 1 : Réglages donnant la meilleure valeur du MCP

	Nb_{it}	Nb_{init}^{pop}	P_{init}^{seq}	$P_{meilleurs}$	$Nb_{meilleurs}$	$P_{tournoi}$	P_c	P_{ms}	P_{mGE}	P_{mo}	$P_{\bar{m}}$
exp 146	50	100	25	0,10	10	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 152	50	100	25	0,10	10	10	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 154	50	100	25	0,10	10	25	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 156	50	100	25	0,10	10	25	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 168	50	100	25	0,30	30	10	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 171	50	100	25	0,30	30	10	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 174	50	100	25	0,30	30	25	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 176	50	100	25	0,30	30	25	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 361	150	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 362	150	100	25	0,10	10	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 364	150	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 365	150	100	25	0,10	10	10	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 366	150	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 367	150	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 368	150	100	25	0,10	10	10	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 369	150	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 370	150	100	25	0,10	10	25	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 371	150	100	25	0,10	10	25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 372	150	100	25	0,10	10	25	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 373	150	100	25	0,10	10	25	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 374	150	100	25	0,10	10	25	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 376	150	100	25	0,10	10	25	0,6	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 379	150	100	25	0,30	30	10	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 380	150	100	25	0,30	30	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 382	150	100	25	0,30	30	10	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 383	150	100	25	0,30	30	10	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 384	150	100	25	0,30	30	10	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 385	150	100	25	0,30	30	10	0,6	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 386	150	100	25	0,30	30	10	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 387	150	100	25	0,30	30	10	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 388	150	100	25	0,30	30	25	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 389	150	100	25	0,30	30	25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 390	150	100	25	0,30	30	25	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 391	150	100	25	0,30	30	25	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 392	150	100	25	0,30	30	25	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 393	150	100	25	0,30	30	25	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 395	150	100	25	0,30	30	25	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 396	150	100	25	0,30	30	25	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1

Annexes

exp 577	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 578	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 580	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 581	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 582	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 583	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 584	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 585	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 586	300	100	25	0,10	10	25	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 587	300	100	25	0,10	10	25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 588	300	100	25	0,10	10	25	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 589	300	100	25	0,10	10	25	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 590	300	100	25	0,10	10	25	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 592	300	100	25	0,10	10	25	0,6	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 595	300	100	25	0,30	30	10	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 596	300	100	25	0,30	30	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 598	300	100	25	0,30	30	10	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 599	300	100	25	0,30	30	10	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 600	300	100	25	0,30	30	10	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 601	300	100	25	0,30	30	10	0,6	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 602	300	100	25	0,30	30	10	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 603	300	100	25	0,30	30	10	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 604	300	100	25	0,30	30	25	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 605	300	100	25	0,30	30	25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 606	300	100	25	0,30	30	25	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 607	300	100	25	0,30	30	25	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 608	300	100	25	0,30	30	25	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 609	300	100	25	0,30	30	25	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 611	300	100	25	0,30	30	25	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4
exp 612	300	100	25	0,30	30	25	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1

2. Annexe 2 : Plan d'expériences complémentaires

	Nb_{it}	Nb_{init}^{pop}	P_{init}^{seq}	$P_{meilleurs}$	$Nb_{meilleurs}$	$P_{tournoi}$	P_c	P_{ms}	P_{mGE}	P_{mo}	$P_{\bar{m}}$
exp 1	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 2	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,1	0,3	0,5
exp 3	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,1	0,6	0,2
exp 4	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,3	0,1	0,5
exp 5	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3
exp 6	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,3	0,6	0
exp 7	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,6	0,1	0,2
exp 8	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,6	0,3	0
exp 9	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,1	0,6	0,6	-0,3

exp 10	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,1	0,1	0,5
exp 11	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3
exp 12	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,1	0,6	0
exp 13	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3
exp 14	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 15	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,3	0,6	-0,2
exp 16	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,6	0,1	0
exp 17	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,6	0,3	-0,2
exp 18	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,3	0,6	0,6	-0,5
exp 19	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,1	0,1	0,2
exp 20	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,1	0,3	0
exp 21	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,1	0,6	-0,3
exp 22	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,3	0,1	0
exp 23	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,3	0,3	-0,2
exp 24	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,3	0,6	-0,5
exp 25	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,6	0,1	-0,3
exp 26	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,6	0,3	-0,5
exp 27	300	100	25	0,10	10	10	0,2	0,6	0,6	0,6	-0,8
exp 28	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 29	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,1	0,3	0,5
exp 30	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,1	0,6	0,2
exp 31	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,3	0,1	0,5
exp 32	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,3	0,3	0,3
exp 33	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,3	0,6	0
exp 34	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,6	0,1	0,2
exp 35	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,6	0,3	0
exp 36	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,1	0,6	0,6	-0,3
exp 37	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,1	0,1	0,5
exp 38	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,1	0,3	0,3
exp 39	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,1	0,6	0
exp 40	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,3	0,1	0,3
exp 41	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 42	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,3	0,6	-0,2
exp 43	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,6	0,1	0
exp 44	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,6	0,3	-0,2
exp 45	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,3	0,6	0,6	-0,5
exp 46	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,1	0,1	0,2
exp 47	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,1	0,3	0
exp 48	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,1	0,6	-0,3
exp 49	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,3	0,1	0
exp 50	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,3	0,3	-0,2
exp 51	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,3	0,6	-0,5
exp 52	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,6	0,1	-0,3
exp 53	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,6	0,3	-0,5

exp 54	300	100	25	0,10	10	10	0,4	0,6	0,6	0,6	-0,8
exp 55	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,1	0,1	0,7
exp 56	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,1	0,3	0,5
exp 57	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,1	0,6	0,2
exp 58	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,3	0,1	0,5
exp 59	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,3	0,3	0,3
exp 60	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,3	0,6	0
exp 61	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,6	0,1	0,2
exp 62	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,6	0,3	0
exp 63	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,1	0,6	0,6	-0,3
exp 64	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,1	0,1	0,5
exp 65	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,1	0,3	0,3
exp 66	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,1	0,6	0
exp 67	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,3	0,1	0,3
exp 68	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1
exp 69	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,3	0,6	-0,2
exp 70	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,6	0,1	0
exp 71	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,6	0,3	-0,2
exp 72	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,3	0,6	0,6	-0,5
exp 73	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,1	0,1	0,2
exp 74	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,1	0,3	0
exp 75	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,1	0,6	-0,3
exp 76	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,3	0,1	0
exp 77	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,3	0,3	-0,2
exp 78	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,3	0,6	-0,5
exp 79	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,6	0,1	-0,3
exp 80	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,6	0,3	-0,5
exp 81	300	100	25	0,10	10	10	0,6	0,6	0,6	0,6	-0,8

3. Annexe 3 : Détails des 5 meilleures gammes obtenues par le réglage identifié (Méthodiste 1)

Gamme 1

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usinage	Risque opération
OP'1	Zone 12	X+	Finition	Outil 13	Copiage	85,25	1,15
OP'2	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 19	Contournage	74,79	3,87
OP'3	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'4	Zone 10	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	140,36	0,87
OP'5	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	189,46	1,03
OP'6	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'7	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82
OP'8	Zone 5	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	89,76	2,41
OP'9	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	15,26	0,10

OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil 12	Contournage	104,72	1,52
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	94,25	0,60
OP'12	Zone 3	X-	Finition	Outil 33	Contournage	18,73	0,70
OP'13	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	130,90	0,50
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 19	Contournage	102,72	4,82
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil 23	Contournage	57,91	6,62
OP'16	Zone 1	X-	Finition	Outil 34	Contournage	132,65	0,77
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	234,57	1,73
OP'18	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 12	Contournage	56,30	1,71

Gamme 2

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usage	Risque opération
OP'1	Zone 12	X+	Finition	Outil 13	Copiage	85,25	1,15
OP'2	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 22	Contournage	61,66	1,80
OP'3	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'4	Zone 10	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	140,36	0,87
OP'5	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	189,46	1,03
OP'6	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'7	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82
OP'8	Zone 5	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	89,76	2,41
OP'9	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	15,26	0,10
OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil 12	Contournage	104,72	1,52
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	94,25	0,60
OP'12	Zone 3	X-	Finition	Outil 33	Contournage	18,73	0,70
OP'13	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	130,90	0,50
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 19	Contournage	102,72	4,82
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil 23	Contournage	57,91	6,62
OP'16	Zone 1	X-	Finition	Outil 34	Contournage	132,65	0,77
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	234,57	1,73
OP'18	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 12	Contournage	56,30	1,71

Gamme 3

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usage	Risque opération
OP'1	Zone 12	X+	Finition	Outil 13	Copiage	85,25	1,15
OP'2	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 19	Contournage	74,79	3,87
OP'3	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'4	Zone 10	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	140,36	0,87
OP'5	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	189,46	1,03
OP'6	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'7	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82
OP'8	Zone 5	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	89,76	2,41

Annexes

OP'9	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	15,26	0,10
OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil 7	Contournage	186,54	23,11
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	94,25	0,60
OP'12	Zone 3	X-	Finition	Outil 33	Contournage	18,73	0,70
OP'13	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	130,90	0,50
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 19	Contournage	102,72	4,82
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil 23	Contournage	57,91	6,62
OP'16	Zone 1	X-	Finition	Outil 34	Contournage	132,65	0,77
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	234,57	1,73
OP'18	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 12	Contournage	56,30	1,71

Gamme 4

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usage	Risque opération
OP'1	Zone 12	X+	Finition	Outil 13	Copiage	85,25	1,15
OP'2	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 22	Contournage	61,66	1,80
OP'3	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'4	Zone 10	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	140,36	0,87
OP'5	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	189,46	1,03
OP'6	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'7	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82
OP'8	Zone 5	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	89,76	2,41
OP'9	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	15,26	0,10
OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil 7	Contournage	186,54	23,11
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	94,25	0,60
OP'12	Zone 3	X-	Finition	Outil 33	Contournage	18,73	0,70
OP'13	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	130,90	0,50
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 19	Contournage	102,72	4,82
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil 23	Contournage	57,91	6,62
OP'16	Zone 1	X-	Finition	Outil 34	Contournage	132,65	0,77
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	234,57	1,73
OP'18	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 12	Contournage	56,30	1,71

Gamme 5

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usage	Risque opération
OP'1	Zone 12	X+	Finition	Outil 13	Copiage	85,25	1,15
OP'2	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 22	Contournage	61,66	1,80
OP'3	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'4	Zone 10	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	140,36	0,87
OP'5	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	189,46	1,03
OP'6	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'7	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82

OP'8	Zone 5	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	89,76	2,41
OP'9	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	15,26	0,10
OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil 7	Contournage	186,54	23,11
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	94,25	0,60
OP'12	Zone 3	X-	Finition	Outil 33	Contournage	18,73	0,70
OP'13	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	130,90	0,50
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 19	Contournage	102,72	4,82
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil 19	Contournage	76,25	4,57
OP'16	Zone 1	X-	Finition	Outil 34	Contournage	132,65	0,77
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	234,57	1,73
OP'18	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 12	Contournage	56,30	1,71

4. Annexe 4 : Détails des gammes initiale et optimisée en ingénierie

Gamme initiale

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usinage	Risque opération
OP'1	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 36	Contournage	113,22	4,51
OP'2	Zone 3	X-	Finition	Outil 36	Contournage	36,63	3,86
OP'3	Zone 1	Y+	Ebauche	Outil 37	Surfaçage	57,10	1,28
OP'4	Zone 1	X-	Reprise	Outil 38	Contournage	87,52	13,40
OP'5	Zone 10	X-	Ebauche	Outil 41	Contournage	303,69	1,12
OP'6	Zone 10	X-	Reprise	Outil 39	Contournage	134,64	2,11
OP'7	Zone 1	X-	Reprise	Outil 39	Contournage	128,23	0,60
OP'8	Zone 11	X+	Finition	Outil 38	Contournage	87,52	13,40
OP'9	Zone 1	X+	Reprise	Outil 37	Surfaçage	19,29	1,31
OP'10	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 36	Contournage	136,08	2,50
OP'11	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 36	Contournage	74,65	3,86
OP'12	Zone 8	X+	Ebauche	Outil 36	Contournage	116,41	3,43
OP'13	Zone 10	X+	DemiFinition	Outil 41	Contournage	353,52	1,12
OP'14	Zone 8	X+	Finition	Outil 41	Contournage	44,88	0,58
OP'15	Zone 1	X+	DemiFinition	Outil 39	Contournage	128,23	0,60
OP'16	Zone 6	X+	Reprise	Outil 41	Contournage	40,39	0,49
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 39	Contournage	134,64	2,04
OP'18	Zone 1	X+	Finition	Outil 42	Contournage	47,87	2,65
OP'19	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 37	Surfaçage	44,11	0,87
OP'20	Zone 7	X+	Ebauche	Outil 39	Contournage	38,47	1,05
OP'21	Zone 9	X+	Finition	Outil 15	Copiage	15,71	0,49
OP'22	Zone 12	X+	Finition	Outil 11	Copiage	134,64	0,96
OP'23	Zone 6	X+	DemiFinition	Outil 43	Contournage	5,98	0,40
OP'24	Zone 5	Y+	Finition	Outil 9	Tréflage	25,85	2,61
OP'25	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 37	Surfaçage	149,39	0,94
OP'26	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82
OP'27	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	74,80	0,96

Gamme optimisée classique

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usinage	Risque opération
OP'1	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'2	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 22	Contournage	75,06	3,47
OP'3	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 22	Contournage	68,63	2,78
OP'4	Zone 3	X-	Finition	Outil 22	Contournage	18,50	2,50
OP'5	Zone 10	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	152,71	0,87
OP'6	Zone 10	X-	Reprise	Outil 34	Contournage	94,25	1,72
OP'7	Zone 1	X-	Reprise	Outil 23	Contournage	72,38	7,95
OP'8	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 22	Contournage	90,48	2,59
OP'9	Zone 8	X+	Ebauche	Outil 22	Contournage	54,29	2,41
OP'10	Zone 10	X+	Reprise	Outil 22	Contournage	59,51	2,50
OP'11	Zone 10	X+	DemiFinition	Outil 33	Contournage	67,37	0,87
OP'12	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	31,42	0,58
OP'13	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	69,81	1,74
OP'14	Zone 6	X+	Reprise	Outil 34	Contournage	43,98	2,29
OP'15	Zone 7	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	20,94	2,26
OP'16	Zone 1	X+	Finition	Outil 34	Contournage	73,30	0,77
OP'17	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'18	Zone 11	X+	Finition	Outil 23	Contournage	57,91	6,62
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 15	Copiage	18,97	3,70
OP'20	Zone 12	X+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	0,96
OP'21	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 22	Contournage	61,66	1,80
OP'22	Zone 7	Y+	DemiFinition	Outil 22	Contournage	6,03	1,11
OP'23	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'24	Zone 7	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	14,96	0,10
OP'25	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82
OP'26	Zone 5	Y+	Finition	Outil 8	Surfaçage	53,86	3,92

5. Détails des meilleures gammes obtenues pour les methodistes 2, 3 et 4

Décideur 2

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usinage	Risque opération
OP'1	Zone 12	X+	Finition	Outil 13	Copiage	85,25	1,15
OP'2	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 19	Contournage	74,79	3,87
OP'3	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'4	Zone 10	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	140,36	0,87
OP'5	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	189,46	1,03
OP'6	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'7	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82
OP'8	Zone 5	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	89,76	2,41

OP'9	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	15,26	0,10
OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil 12	Contournage	104,72	1,52
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	94,25	0,60
OP'12	Zone 3	X-	Finition	Outil 33	Contournage	18,73	0,70
OP'13	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	130,90	0,50
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 19	Contournage	102,72	4,82
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil 23	Contournage	57,91	6,62
OP'16	Zone 1	X-	Finition	Outil 34	Contournage	132,65	0,77
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	234,57	1,73
OP'18	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 12	Contournage	56,30	1,71

Décideur 3

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usinage	Risque opération
OP'1	Zone 12	X+	Finition	Outil 13	Copiage	85,25	1,15
OP'2	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 22	Contournage	61,66	1,80
OP'3	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'4	Zone 10	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	140,36	0,87
OP'5	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	189,46	1,03
OP'6	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'7	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82
OP'8	Zone 5	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	89,76	2,41
OP'9	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	15,26	0,10
OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil 12	Contournage	104,72	1,52
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	94,25	0,60
OP'12	Zone 3	X-	Finition	Outil 33	Contournage	18,73	0,70
OP'13	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	130,90	0,50
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 19	Contournage	102,72	4,82
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil 19	Contournage	76,25	4,57
OP'16	Zone 1	X-	Finition	Outil 34	Contournage	132,65	0,77
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	234,57	1,73
OP'18	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 12	Contournage	56,30	1,71

Décideur 4

Opération	Zone	Axe	Type	Outil	Cycle	Temps d'usinage	Risque opération
OP'1	Zone 12	X+	Finition	Outil 13	Copiage	85,25	1,15
OP'2	Zone 5	Y+	Ebauche	Outil 19	Contournage	74,79	3,87
OP'3	Zone 4	Z-	Finition	Outil 22	Contournage	10,72	1,95
OP'4	Zone 10	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	140,36	0,87
OP'5	Zone 6	X+	Ebauche	Outil 33	Contournage	189,46	1,03
OP'6	Zone 2	Y+	Ebauche	Outil 33	Contournage	117,65	0,94
OP'7	Zone 2	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	116,69	4,82

Annexes

OP'8	Zone 5	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	89,76	2,41
OP'9	Zone 6	Y+	Finition	Outil 11	Copiage	15,26	0,10
OP'10	Zone 7	Y+	Finition	Outil 12	Contournage	104,72	1,52
OP'11	Zone 8	X+	Finition	Outil 33	Contournage	94,25	0,60
OP'12	Zone 3	X-	Finition	Outil 33	Contournage	18,73	0,70
OP'13	Zone 1	X-	Ebauche	Outil 33	Contournage	130,90	0,50
OP'14	Zone 11	X-	Ebauche	Outil 19	Contournage	102,72	4,82
OP'15	Zone 11	X-	Finition	Outil 23	Contournage	57,91	6,62
OP'16	Zone 1	X-	Finition	Outil 34	Contournage	132,65	0,77
OP'17	Zone 10	X+	Finition	Outil 34	Contournage	234,57	1,73
OP'18	Zone 9	X+	Ebauche	Outil 34	Contournage	33,16	2,43
OP'19	Zone 9	X+	Finition	Outil 12	Contournage	56,30	1,71

Références

- Abbas, A. E., Yang, L., Zapata, R., & Schmitz, T. L. (2009). Application of decision analysis to milling profit maximisation : an introduction. *Systems Engineering*, 35, 64–88. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2009.025220>
- AFNOR NF E 66-520, N. (1994). *Couple Outil-Matière : Domaine de Fonctionnement des Outils Coupants*.
- Agrawal, R., Shukla, S., Kumar, S., & Tiwari, M. (2009). Multi-agent system for distributed computer-aided process planning problem in e-manufacturing environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(5–6), 579–594. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1844-3>
- Airbus. (2014). Global Market Forecast. Retrieved from <http://www.airbus.com/company/market/forecast/>
- Aissanou, F. (2014). *Décisions multicritères dans les réseaux de télécommunications autonome*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- Alberti, M., Ciurana, J., & Casadesús, M. (2005). A system for optimising cutting parameters when planning milling operations in high-speed machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(1), 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.092>
- Almeida, A. T. (2005). Multicriteria modelling of repair contract based on utility and ELECTRE I method with dependability and service quality criteria. *Annals of Operations Research*, 138(1), 113–126.
- Alting, L., & Zhang, H. (1989). Computer Aided Process Planning : the state of the art survey. *International Journal of Production Research*.
- Altintas, Y., & Tulsyan, S. (2015). Prediction of part machining cycle times via virtual CNC. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(1), 361–364. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.100>
- Anselmetti, B. (1994). *Génération automatique de gammes de tournage et contribution à la gestion d'une cellule de production*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Nancy 1.
- Antomarchi, A.-L. (2016). *Développement d'un outil d'aide à la décision pour le choix de gamme de fabrication optimale en présence de données incertaines*. Master de Recherche : Sigma Clermont, Ecole des Mines de Saint-Etienne.
- Arbis, D., Dixit, V. V., & Rashidi, T. H. (2016). Impact of risk attitudes and perception on game theoretic driving interactions and safety. *Accident Analysis & Prevention*, 94, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.05.027>
- Arezoo, B., Ridgway, K., & Al-Ahmari, A. (2000). Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system. *Computers in Industry*, 42(1), 43–58. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(99\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(99)00051-2)
- Arrow, K. J., & Raynaud, H. (1986). *Social choice and multicriterion decision-making*. MIT Press Books.
- Back, T., Fogel, D. B., & Michalewicz, Z. (1997). *Handbook of evolutionary computation*. IOP Publishing Ltd.
- Bana e Costa, C. A., Ensslin, L., Cornêa, É. C., & Vansnick, J.-C. (1999). Decision Support Systems in action: Integrated application in a multicriteria decision aid process. *European Journal of Operational Research*, 113(2), 315–335. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00219-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00219-7)
- Ben Ammar, O. (2014). *Planification des réapprovisionnements sous incertitudes pour lessys emes d'assemblage à plusieurs niveaux*. Thèse de doctorat : Ecole des Mines de Saint-Etienne.
- BenMena, S. (2000). Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 4(2), 83–93.
- Bhutta, K. S., & Huq, F. (2002). Supplier selection problem : a comparison of the total cost of ownership and analytic herarchy process approaches. *Supply Chain Management : An International Journal*, 7(3), 126–135.
- Bley, H., & Stadelmeyer, V. (1993). Flexible Interface Between a Data Base Management System and a Decision Support-System for Tool Selection. In *25th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems* (pp. 333–345).
- Boeing. (2006). Boeing Aero Magazine. Retrieved from <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/>
- Borda, J.-C. (1781). Memoire sur les élections au scrutin. *Histoire de l'Academie Royale de Science, Paris*, 657–664. <https://doi.org/citeulike-article-id:792703>
- Bouyssou, D. (1990). Building Criteria : A Prerequisite For MCDA. In *Readings in multiple criteria decision aid* (pp. 59–80). Springer Berlin Heidelberg.
- Bouyssou, D., Dubois, D., Pirlot, M., & Prade, H. (2006a). *Concepts et Méthodes pour l'aide à la décision - analyse multicritère* (Vol 3). Lavoisier.
- Bouyssou, D., Dubois, D., Pirlot, M., & Prade, H. (2006b). *Concepts et Méthodes pour l'aide à la décision - outils de modélisation* (Vol 1). Lavoisier.
- Bouyssou, D., Marchant, T., & Perny, P. (2005). Théorie du choix social et aide multicritère à la décision. In *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision* (Vol. 3). Hermès : Lavoisier.

Références

- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., & Vincke, P. (2006). *Evaluation and decision models with multiple criteria : Stepping stones for the analyst*. Springer, Boston.
- Bouyssou, D., Perny, P., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., & Vincke, P. (1993). A Manifesto for the new MCDA era. *Journal of Multi Criteria Decision Analysis*, 2(3), 125–127.
- Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)
- Campatelli, G., Scippa, A., & Lorenzini, L. (2014). Workpiece orientation and tooling selection to reduce the environmental impact of milling operations. *Procedia CIRP*, 14, 575–580. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.031>
- Chanal, H., Duc, E., & Ray, P. (2006). A study of the impact of machine tool structure on machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(2), 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.05.004>
- Chang, T.-C. (1990). *Expert process planning for manufacturing*. Addison-Wesley Longman.
- Chen, S. J., Hinduja, S., & Barrow, G. (1989). Automatic tool selection for rough turning operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 29(4), 535–553. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(89\)90070-9](https://doi.org/10.1016/0890-6955(89)90070-9)
- Chen, Y., Hui, A., & Du, R. (1995). A fuzzy expert system for the design of machining operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(12), 1605–1621. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00024-R](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00024-R)
- Choudhury, I. A., & El-Baradie, M. A. (1999). Machinability assessment of inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 95(1–3), 30–39. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00085-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00085-0)
- Conradie, P., Dimitrov, D., & Oosthuizen, G. (2016). A Cost Modelling Approach for Milling Titanium Alloys. *Procedia CIRP*, 46, 412–415. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.014>
- Costa, C. A. B. e. (1996). Les problématiques de l' aide à la décision : vers l'enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement. *Recherche opérationnelle/Opérations Research*, 30(2), 191–216.
- D'Addona, D. M., & Teti, R. (2013). Genetic algorithm-based optimization of cutting parameters in turning processes. *Procedia CIRP*, 7, 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.055>
- D'Souza, R. M., Sequin, C., & Wright, P. K. (2004). Automated tool sequence selection for 3-axis machining of free-form pockets. *CAD Computer Aided Design*, 36(7), 595–605. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(03\)00137-4](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(03)00137-4)
- De Condorcet, M. J. A. N. (1785). *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix*. Imprimerie Royale, Paris.
- Denkena, B., Shpitalni, M., Kowalski, P., Molcho, G., & Zipori, Y. (2007). Knowledge management in process planning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.042>
- Dépincé, P., & Hascoët, J. Y. (2006a). Active integration of tool deflection effects in end milling. Part 1. Prediction of milled surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(9), 937–344. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.08.014>
- Dépincé, P., & Hascoët, J. Y. (2006b). Active integration of tool deflection effects in end milling. Part 2. Compensation of tool deflection. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(9), 945–956. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.08.014>
- Dereli, T., & Filiz, I. H. (1999). Optimisation of process planning functions by genetic algorithms. *Computers and Industrial Engineering*, 36(2), 281–308. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00133-3)
- Dhage, S., & Usher, J. M. (1993). Computer-aided tool selection for turning and boring. *Computers and Industrial Engineering*, 25(1–4), 207–210. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(93\)90257-X](https://doi.org/10.1016/0360-8352(93)90257-X)
- Droesbeke, J. J., Saporta, G., & Fine, J. (1997). *Plans d'expériences : Applications à l'entreprise*. (E. Technip, Ed.).
- Edwards, W. (1971). *Social utilities. Proceedings of a symposium : Decision and Risk Analysis - Powerful new tools for management*. Annapolis : U.S. Naval Academy.
- ElMaraghy, H. A. (1993). Evolution and Future Perspectives of CAPP. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42(2), 739–751.
- Eskicioglu, H., & Davies, B. J. (1981). An interactive process planning system for prismatic parts (ICAPP). *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 21(3–4), 193–206. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(81\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0020-7357(81)90017-2)
- Eversheim, W., Fucks, H., & Zons, K. H. (1980). Automated Process Planning with Regard to Production by Application of the System AUTAP for Control Problems. In *12th CIRP international seminar on Manufacturing Systems*.
- Eversheim, W., & Schneewind, J. (1993). Computer-aided process planning—State of the art and future development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 10(1–2), 65–70. [https://doi.org/10.1016/0736-5845\(93\)90027-H](https://doi.org/10.1016/0736-5845(93)90027-H)
- Faure, R., Lemaire, B., & Picouleau, C. (2014). *Précis de recherche opérationnelle - 7e éd. : Méthodes et exercices d'application*. Dunod.
- Fishburn, P. C. (1970). *Utility Theory for Decision Making*. Wiley. Research analysis corp McLean VA.

- Fujimoto, A., & Takahashi, H. (2016). Flexible modulation of risk attitude during decision-making under quota. *NeuroImage*, 139, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.06.040>
- Gardiner, L. R., & Steuer, R. E. (1994). Unified interactive multiple objective programming: an open architecture for accommodating new procedures. *Journal of Operation Research Society*, 45(12), 1456–1466.
- Giusti, F., Santochi, M., & Dini, G. (1986). COATS: an Expert Module for Optimal Tool Selection. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 35(1), 337–340. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61901-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61901-5)
- Gouda, S., & Taraman, K. (1989). CAPP : PAST, Present and Future. *Society of Manufacturing Engineers*.
- Grierson, D. E. (2008). Pareto multi-criteria decision making. *Advanced Engineering Informatics*, 22(3), 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2008.03.001>
- Guitouni, A., Martel, J., & Vincke, P. (1999). *Un cadre de référence pour le choix d'une procédure d'agrégation multicritère*.
- Ham, I., & Lu, S. C. Y. (1988). Computer-Aided Process Planning : The present and the future. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 37(2), 591–601.
- Hammami, A. (2013). *Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau*. ENS des Mines de Saint-Etienne, Université Laval.
- Harik, R. F. (2007). Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la génération automatique de gamme d'usinage : Application aux pièces aéronautiques de structure, prototype logiciel dans le cadre du projet RNTL USIQUICK. *Thèse de Doctorat*, 178.
- Hassini, S. (2015). *Qualification multi-critères des gammes d'usinage : Application aux pièces de structure aéronautique en alliage Airware®*. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal.
- Heo, E. Y., Kim, D. W., Kim, B. H., & Frank Chen, F. (2006). Estimation of NC machining time using NC block distribution for sculptured surface machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(5–6), 437–446. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.12.008>
- Heo, E. Y., Kim, D. W., Lee, J. Y., Lee, C. S., & Frank Chen, F. (2011). High speed pocket milling planning by feature-based machining area partitioning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(4), 706–713. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.12.007>
- Hnaïen, F., Delorme, X., & Dolgui, A. (2010). Multi-objective optimization for inventory control in two-level assembly systems under uncertainty of lead times. *Computers & Operations Research*, 37(11), 1835–1843. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.002>
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (Second Edi). MIT Press Books.
- Hua, Z., Gong, B., & Xu, X. (2008). A DS-AHP approach for multi-attribute decision making problem with incomplete information. *Expert Systems with Applications*, 34(3), 2221–2227. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.02.021>
- Hupman, A. C., Abbas, A. E., & Schmitz, T. L. (2015). Incentives versus value in manufacturing systems: An application to high-speed milling. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.004>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making : Methods and Applications, a State-of-the-Art Survey. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 186.
- Ignizio, J. (1978). A review of goal programming : a tool for multiobjective analysis. *Journal of Operation Research Society*, 10(2), 151–164.
- Ihara, T., & Ito, Y. (1991). A New Concept of CAPP Based on Flair of Experienced Engineers - Analyses of Decision-Making Processes of Experienced Process Engineers. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(1), 437–440. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62024-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62024-1)
- Iqbal, A., He, N., Li, L., & Dar, N. U. (2007). A fuzzy expert system for optimizing parameters and predicting performance measures in hard-milling process. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 1020–1027. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.02.003>
- Jacquet-Lagrange, E., & Siskos, J. (1982). Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European Journal of Operational Research*, 10(2), 151–164. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(82\)90155-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(82)90155-2)
- Jung, J. Y. (2002). Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13(4), 227–238. <https://doi.org/10.1023/A:1016092808320>
- Kahraman, C., Ertay, T., & Büyükoçkan, G. (2006). A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 390–411. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.016>
- Karandikar, J., & Kurfess, T. (2015). Cost optimization and experimental design in milling using surrogate models and value of information. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.10.002>
- Kast, R. (2002). *La théorie de la décision* (Repères). La Découverte.
- Kianfar, F., & Mokhtari, G. (2009). Lot Sizing and lead time quotations in assembly systems. *Scientia Iranica*, 16(2), 100–113.

Références

- Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-76249097015&partnerID=40&md5=e51169d56622de1c8c0c826c516a870f>
- Kiritsis, D., Neuendorf, K. P., & Xirouchakis, P. (1999). Petri net techniques for process planning cost estimation. *Advances in Engineering Software*, 30(6), 375–387. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(98\)00126-4](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00126-4)
- Krause, F. (1990). Technological Planning Systems for the Future. *Computers in Industry*, 14, 109–116.
- Lau, H. C. W., Lee, C. K. M., Jiang, B., Hui, I. K., & Pun, K. F. (2005). Development of a computer-integrated system to support CAD to CAPP. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(9–10), 1032–1042. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2094-7>
- Le Gall, A.-C. (2009). *Panorama des méthodes d'analyse multicritères comme outils d'aide à la décision*.
- Lee, B. Y., & Tarn, Y. S. (2000). Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(1), 61–66. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00582-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00582-3)
- Lee, E. K., Ha, S., & Kim, S. K. (2001). Supplier selection and management system considering relationships in supply chain management. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), 307–318. <https://doi.org/10.1109/17.946529>
- Leonesio, M., Molinari Tosatti, L., Pellegrinelli, S., & Valente, A. (2013). An integrated approach to support the joint design of machine tools and process planning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(3), 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.03.002>
- Liu, C., Li, Y., Wang, W., & Shen, W. (2013). A feature-based method for NC machining time estimation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(4), 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.10.001>
- Llanes-Coronel, D. S., Gámez-Díaz, L. Y., Suarez-Quintero, L. P., Páez, L. J., Torres, F., Echeverri, F., ... Trujillo-Vargas, C. M. (2011). New promising Euphorbiaceae extracts with activity in human lymphocytes from primary cell cultures. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*, 33(2), 279–290. <https://doi.org/10.3109/08923973.2010.502173>
- Lopez De Lacalle, L. N., Perez, J., Llorente, J. I., & Sanchez, J. A. (2000). Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00372-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00372-6)
- Luce, R. D., & Raiffa, H. (1957). *Games and decisions*. (J. Wiley, Ed.). New York, John Wiley.
- Mammeri, M. (2013). *Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : Construction d'un modèle d'évaluation*. Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine.
- Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications - Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, 42(8), 4126–4148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.003>
- Marri, H. B., Gunasekaran, A., & Grieve, R. J. (1998). Computer-aided process planning: A state of art. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(4), 261–268. <https://doi.org/10.1007/BF01199881>
- Martel, J. (1999). *L'aide multicritère à la décision : méthodes et applications*. Université Laval, Québec, Canada.
- Martin, P. (2002). Méthodologie de génération des processus de fabrication. In *Fabrication assistée par ordinateur*. Lavoisier.
- Maystre, L. Y., Pictet, J., & Simos, J. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. PPUR presses polytechniques. <https://doi.org/10.1080/03043799408928313>
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. MIT Press Books.
- Monreal, M., & Rodriguez, C. A. (2003). Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. *CAD Computer Aided Design*, 35(4), 395–401. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(02\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(02)00060-X)
- Mousseau, V. (1993). *Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : Réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques*. Doctoral dissertation.
- Nafi, A., & Wery, C. (2010). Aide à la décision multicritère : Introduction aux méthodes d'analyse multicritère de type ELECTRE. *Cours ENGEES Module Ingénierie Financière*, 1–21.
- Niebel, B. (1965). Mechanized process selection for planning new designs. *ASME Paper*, 737.
- Noël, G., & Brzakowski, S. (1990). A la recherche du temps à gagner, pourquoi la technologie de groupe. In *La gamme automatique en usinage* (pp. 54–64). Hermès.
- Ong, S. K., Sun, M. J., & Nee, A. Y. C. (2003). A fuzzy set AHP-based DFM tool for rotational parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1–3), 223–230. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00076-1)
- Ounnar, F., Naamane, A., Pujo, P., & M'Sirdi, N.-K. (2013). Intelligent Control of Renewable Holonic Energy Systems. *Energy Procedia; Mediterranean Green Energy Forum 2013: Proceedings of an International Conference MGEF-13*, 42, 465–472. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.047>

- Öztürk, N., & Öztürk, F. (2001). Neural network based non-standard feature recognition to integrate CAD and CAM. *Computers in Industry*, 45(2), 123–135. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(01\)00090-2](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(01)00090-2)
- Pateloup, V. (2005). Amélioration du comportement cinématique des machines outils UGV lors du calcul de trajets d'usinage : Application à la génération de trajets d'évidement de poches. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Perkgoz, C., Azaron, A., Katagiri, H., Kato, K., & Sakawa, M. (2007). A multi-objective lead time control problem in multi-stage assembly systems using genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 180(1), 292–308. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.024>
- Porumbel, D. C. (2009). *Algorithmes Heuristiques et Techniques d'Apprentissage - Applications au Problème de Coloration de Graphe*. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00481253>
- Poulton, E. C. (1994). *Behavioral decision theory : A new approach*. Cambridge University Press.
- Pujo, P., & Ounnar, F. (2012). Pull control for job shop : holonic manufacturing system approach using multicriteria decision-making. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(1), 141–153. <https://doi.org/10.1007/s10845-009-0288-4>
- Raiffa, H. (1969). *Preferences for Multi-Attributed Alternatives*.
- Ramsey, C. L., Reggia, J. a, Nau, D. S., & Ferrentino, a. (1986). A comparative analysis of methods for expert systems. *International Journal of Manmachine Studies*, 24(5), 475–499.
- Reeves, C. R. (1995). A genetic algorithm for flowshop sequencing. *Computers and Operations Research*, 22(1), 5–13. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(93\)E0014-K](https://doi.org/10.1016/0305-0548(93)E0014-K)
- Renard, M. (2015). *Etude bibliographique : Application de la méthode AHP aux problèmes industriels et logistiques*. ENS de Saint-Etienne, IFMA.
- Rico, A., Grabisch, M., Labreuche, C., & Chateaufneuf, A. (2005). Preference modeling on totally ordered sets by the Sugeno integral. *Discrete Applied Mathematics*, 147(1), 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2004.06.025>
- Roy, B. (1990). Decision_aid and Decision-making. *European Journal of Operational Research*, 45(2–3), 324–331.
- Roy, B., & Bertier, P. (1971). La méthode ELECTRE II, une méthode de classement en présence de critères multiples (p. 25). Note de travail 142, Paris : Direction Scientifique, Sema.
- Roy, B., & Bouyssou, D. (1993). *Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas*. Economica.
- Roy, B., & Giard, V. E. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. (E. Economica, Ed.).
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T. L. (1984). *Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision (Vol. 7)* (Collection). Entreprise Moderne d'Édition.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Salehi, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(8), 1179–1187. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.04.005>
- Samvedi, A., Jain, V., & Chan, F. T. (2012). An integrated approach for machine tool selection using fuzzy analytical hierarchy process and grey relational analysis. *International Journal of Production Research*, 50(12), 3211–3221.
- Schärlig, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision multicritère*. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Shehab, E. M., & Abdalla, H. S. (2001). Manufacturing cost modelling for concurrent product development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 17(4), 341–353. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(01)00009-6)
- Shen, W., Hao, Q., Yoon, H. J., & Norrie, D. H. (2006). Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Advanced Engineering Informatics*, 20(4), 415–431. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2006.05.004>
- Shih, H. S., Shyr, H. J., & Lee, E. S. (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7–8), 801–813. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.03.023>
- So, B. S., Jung, Y. H., Park, J. W., & Lee, D. W. (2007). Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, 187, 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.159>
- Stuedel, H. J. (1984). Computer-aided process planning: past, present and future. *International Journal of Production Research*, 22(2), 253–266. <https://doi.org/10.1080/00207548408942452>
- Suh, S.-H., Cho, J.-H., & Hascoet, J.-Y. (1996). Incorporation of tool deflection in tool path computation: Simulation and

Références

- analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(3), 190–199. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(96\)89571-9](https://doi.org/10.1016/0278-6125(96)89571-9)
- Taylor, F. (1907). *On the art of cutting metals*.
- Triantaphyllou, E., & Mann, S. H. (1995). Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications : Some Challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 2(1), 35–44.
- Tsoukiàs, A. (2006). De la théorie de la décision à l'aide à la décision. In D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot, & H. Prade (Eds.), *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision* (pp. 25–69). Hermès, Paris.
- Tsoukiàs, A. (2008). From decision theory to decision aiding methodology. *European Journal of Operational Research*, 187(1), 138–161.
- Vant Erve, A. H., & Kals, H. J. J. (1986). XPLANE, a Generative Computer Aided Process Planning System for Part Manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 35(1), 325–329. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61899-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61899-X)
- Vieille, B. (2005). *Usinage*. Conservatoire National des Arts et Métiers. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Villeneuve, F. (2002). Génération automatique des processus de fabrication. In *Fabrication assistée par ordinateur* (pp. 295–350). Lavoisier.
- Vincke, P. (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Editions Ellipses.
- Vincke, P. (1994). Recent progresses in multicriteria decision-aid. *Rivista Di Matematica per Le Scienze Economiche E Sociali*, 2, 21–32.
- Vivancos, J., Luis, C. J., Costa, L., & Ortiz, J. A. (2004). Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156(1–3), 1505–1512. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.260>
- Wagner, V., & Duc, E. (2014). Study of Ti-1023 milling with toroidal tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(9–12), 1473–1491. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6217-5>
- Wan, S., Gao, J., Li, D., Tong, Y., & He, F. (2015). Web-based process planning for machine tool maintenance and services. *Procedia CIRP*, 38, 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.018>
- Wang, H.-P. (ben), & Wysk, R. A. (1986). An expert system for machining data section. *Computers & Industrial Engineering*, 10(2), 99–107. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(86\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0360-8352(86)90031-8)
- Wang, L., Adamson, G., Holm, M., & Moore, P. (2012). A review of function blocks for process planning and control of manufacturing equipment. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(3), 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.02.004>
- Wang, L., Holm, M., & Adamson, G. (2010). Embedding a process plan in function blocks for adaptive machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 433–436. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.144>
- Wang, M.-J. J. (1995). Tool steel materials selection under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 72(3), 263–270. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(94\)00289-J](https://doi.org/10.1016/0165-0114(94)00289-J)
- Wang, X., Wang, W., Huang, Y., Nguyen, N., & Krishnakumar, K. (2008). Design of neural network-based estimator for tool wear modeling in hard turning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(4), 383–396. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0090-8>
- Wang, Z. G., Rahman, M., Wong, Y. S., & Sun, J. (2005). Optimization of multi-pass milling using parallel genetic algorithm and parallel genetic simulated annealing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(15), 1726–1734. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.03.009>
- Weill, R., Spur, G., & Eversheim, W. (1982). Survey of Computer-Aided Process Planning Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 31(2), 539–551. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60176-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60176-0)
- Wright, A., Darbyshir, I., Park, M., & Davis, B. (1987). Excap and Icap : knowledge-based systems for process planning. *19th CIRP Seminer on Manufacturing Systems*, 309–313.
- Wysk, R. A. (1977). *An automated process planning and selection program: appas*. Thèse de doctorat, Purdue University.
- Xu, X., Wang, L. H., & Newman, S. T. (2011). Computer-aided process planning: a critical review of recent developments and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(1), 1–31. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2010.518632>
- Yang, C., & Lin, T. S. (1997). Developing an Integrated Framework for Feature-Based Early Manufacturing Cost Estimation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 307–320.
- Yang, D. H., Kim, S., Nam, C., & Min, J. W. (2007). Developing a decision model for business process outsourcing. *Computers & Operations Research*, 34(12), 3769–3778.
- Yao, Z., Gupta, S. K., & Nau, D. S. (2003). Algorithms for selecting cutters in multi-part milling problems. *CAD Computer Aided Design*, 35(9), 825–839. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(02\)00110-0](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(02)00110-0)

- Yeo, S. H. (1994). Knowledge-based feature recognizer for machining. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 7(1), 29–37. [https://doi.org/10.1016/0951-5240\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0951-5240(94)90051-5)
- Yifei, T., Dongbo, L., Changbo, L., & Minjian, Y. (2008). A feature-extraction-based process-planning system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(11–12), 1192–1200. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1161-2>
- Yildiz, A. R. (2013). A new hybrid differential evolution algorithm for the selection of optimal machining parameters in milling operations. *Applied Soft Computing Journal*, 13(3), 1561–1566. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.12.016>
- Yurdakul, M. (2004). AHP as a strategic decision-making tool to justify machine tool selection. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(3), 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.026>
- Yusof, Y., & Latif, K. (2014). Survey on computer-aided process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1–4), 77–89. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6073-3>
- Zuperl, U., & Cus, F. (2003). Optimization of cutting conditions during cutting by using neural networks. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 19, pp. 189–199). [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(02\)00079-0](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(02)00079-0)