

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE	3
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE.....	5
2.1 Objectifs généraux.....	5
2.2 Objectifs spécifiques.....	6
2.3 Méthodologie	6
CHAPITRE 3 REVUE DE LA LITTÉRATURE	10
3.1 Formulation des connaissances d'usinage.....	10
3.2 Génération de gammes d'usinage.....	12
3.3 Entités d'usinage	15
3.4 Directions d'accès d'outil	17
3.5 Choix des machines et des outils	21
3.6 Montages d'usinage.....	22
3.7 Parcours d'outil.....	23
3.8 Définitions.....	25
CHAPITRE 4 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES D'USINAGE - LES RESSOURCES	27
4.1 Ressources.....	29
4.1.1 Machines-outils.....	30
4.1.1.1 Axes de la machine-outil	30
4.1.1.2 Changement d'outils	31
4.1.1.3 Performances.....	32
4.1.1.4 Charges admissibles.....	35
4.1.2 Outils.....	36
4.1.2.1 Outils axiaux.....	37
4.1.2.2 Outils radiaux	43
4.1.2.3 Porte-outils	46
4.1.3 Montages d'usinage.....	48
4.1.3.1 Étaux de fraisage (simple et multiple)	48
4.1.3.2 Crampons-plaqueurs.....	50
4.1.3.3 Plaque de montage	51
4.1.4 Matière brute.....	54
4.1.4.1 Procédés de mise en forme	54
4.1.4.2 Dimensions	55
4.1.4.3 Niveau de précision de la coupe	55
4.2 Synthèse des paramètres significatifs pour le choix des ressources d'usinage	56
CHAPITRE 5 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES D'USINAGE - LA PIÈCE À USINER.....	59
5.1 Informations sur la pièce à usiner.....	59
5.1.1 Caractéristiques d'une pièce aéronautique structurale.....	59

5.1.2	Modèle CAO	62
5.1.2.1	Géométrie	62
5.1.2.2	Dimensions	63
5.1.2.3	Tolérances, rugosités et défauts	63
5.1.3	Matériau de la pièce	67
5.1.4	Quantité de pièces à usiner et fréquence	68
5.1.4.1	Pièce unitaire	68
5.1.4.2	Moyenne ou grande série	68
5.1.4.3	Symétrie	69
5.1.4.4	Pièces multiples	69
5.2	Synthèse des paramètres significatifs associés à la pièce à usiner	71
CHAPITRE 6 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES D'USINAGE - LA GÉNÉRATION		
	DE LA GAMME	74
6.1	Génération de la gamme d'usinage	74
6.1.1	Objectifs poursuivis lors de la génération de la gamme d'usinage	75
6.1.1.1	Minimisation du temps d'usinage	75
6.1.1.2	Atteinte de la qualité désirée	75
6.1.1.3	Diminution des posages nécessaires	76
6.1.2	Analyse de la géométrie	76
6.1.2.1	Types de géométrie et enrichissement	77
6.1.2.2	Entités d'usinage	80
6.1.2.3	Directions d'accès	82
6.1.2.4	Orientation de la matière brute	87
6.1.3	Choix des ressources disponibles	88
6.1.3.1	Machine-outil	89
6.1.3.2	Configuration du montage	89
6.1.3.3	Outils de coupe	99
6.1.4	Stratégies d'usinage	105
6.1.4.1	Détermination des opérations d'usinage	106
6.1.4.2	Ordonnancement des opérations	107
6.1.4.3	Cas particuliers et savoir-faire spécifique	113
6.1.5	Paramètres de coupe	122
6.1.5.1	Vitesse de coupe	123
6.1.5.2	Avance de coupe	123
6.1.5.3	Profondeur de coupe	125
6.1.5.4	Arrosage	126
6.1.5.5	Type de mouvement	127
6.1.5.6	Sens de mouvement	128
6.1.5.7	Surépaisseurs de matière	132
6.1.5.8	Entrée en matière	134
6.1.5.9	Mouvement d'approche et de sortie	134
6.1.5.10	Considérations économiques sur l'usure des outils	134
6.2	Synthèse des étapes de génération de la gamme	135
CHAPITRE 7 ÉTUDE DE CAS ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS		
7.1	Génération de la gamme d'usinage	140
7.1.1	Analyse de la géométrie et choix des ressources	140
7.1.1.1	Types de géométrie et enrichissement	142

7.1.1.2	Entités d'usinage	150
7.1.1.3	Dimensionnement de la matière brute	152
7.1.1.4	Configuration du montage	154
7.1.2	Stratégie d'usinage	157
7.1.2.1	Détermination des modes d'usinage	160
7.1.2.2	Choix des outils de coupe	163
7.1.2.3	Ordonnancement des opérations d'usinage	168
7.2	Validation de la gamme d'usinage.....	171
CHAPITRE 8 EXPLOITATION DES RÉSULTATS DANS UN SYSTÈME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE UTILISANT LES RÉSEAUX DE NEURONES		
8.1	Caractéristiques d'un réseau de neurones	176
8.2	Structure proposée de l'outil de génération de gamme	177
8.2.1	Enrichissement du modèle CAO	180
8.2.2	Détermination des entités d'usinage.....	181
8.2.3	Configuration du montage	183
8.2.4	Détermination des opérations d'usinage	185
8.2.5	Sélection des outils	187
8.2.6	Ordonnancement des opérations	188
8.2.7	Sélection des paramètres de coupe	190
8.3	Discussion	192
CONCLUSION		195
ANNEXE I DESSIN DE DÉTAIL DE LA PIÈCE EXEMPLE		199
ANNEXE II REPRÉSENTATION DES ÉTAPES D'USINAGE DE LA PIÈCE DE RÉFÉRENCE		200
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		206

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Classification des entités d'usinage selon Sridharan.....	16
Tableau 3.2 Classification des entités d'usinage selon Méry	17
Tableau 3.3 Classification des critères de sélection d'une machine-outil.....	21
Tableau 3.4 Classification des contraintes d'usinage dans le choix d'une MOCN	21
Tableau 4.1 Surépaisseur recommandée avant l'alésage.....	39
Tableau 4.2 Différents types de tarauds.....	40
Tableau 4.3 Comparaison des fraises selon le nombre de flûtes.....	45
Tableau 4.4 Synthèse des ressources	56
Tableau 5.1 Plage de performance des procédés d'usinage	64
Tableau 5.2 Tolérances des rayons de raccordement	66
Tableau 5.3 Propriétés des matériaux relatives à l'usinage	67
Tableau 5.4 Synthèse des données sur la pièce à usiner	71
Tableau 6.1 Caractérisation des surfaces géométriques	77
Tableau 6.2 Analyse de la visibilité selon la configuration de la machine	90
Tableau 6.3 Surépaisseurs de matière minimale sur la matière brute selon l'épaisseur...	92
Tableau 6.4 Correspondance des outils de coupe aux entités d'usinage	99
Tableau 6.5 Association des modes d'usinage aux entités	106
Tableau 6.6 Niveau de finition selon les requis de conception.....	132
Tableau 6.7 Surépaisseurs d'usinage	133
Tableau 6.8 Synthèse du processus de génération de la gamme.....	135
Tableau 7.1 Enrichissement des arêtes de la pièce exemple	144
Tableau 7.2 Enrichissement des surfaces de la pièce exemple.....	148
Tableau 7.3 Enrichissement détaillé des surfaces 1 et 3	149

Tableau 7.4	Première évaluation des entités de la pièce exemple	150
Tableau 7.5	Enrichissement détaillé des entités 1 et 3	151
Tableau 7.6	Paramètres significatifs pour le dimensionnement de la matière brute	153
Tableau 7.7	Obtention des paramètres significatifs pour la configuration du montage ...	156
Tableau 7.8	Analyse de la visibilité selon le montage en équerre ou en plateau	156
Tableau 7.9	Deuxième évaluation des entités de la pièce exemple	158
Tableau 7.10	Troisième évaluation des entités de la pièce exemple	159
Tableau 7.11	Association des modes et direction d'usinage	161
Tableau 7.12	Paramètres significatifs pour la détermination des opérations d'usinage	163
Tableau 7.13	Association des outils aux opérations d'usinage	164
Tableau 7.14	Paramètres significatifs pour la sélection des outils de coupe	167
Tableau 7.15	Ordonnancement des opérations d'usinage	169
Tableau 7.16	Paramètres significatifs pour l'ordonnancement des opérations	170
Tableau 7.17	Ordonnancement des opérations de la pièce de référence	173

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1	Contraintes géométriques du procédé..... 11
Figure 3.2	Approche générative pour la génération de gammes..... 12
Figure 3.3	Visibilité des machines-outils..... 18
Figure 3.4	Validation de l'accessibilité des entités..... 18
Figure 3.5	Division d'une surface comportant une zone inaccessible. 19
Figure 3.6	Représentation d'un epsi-masque. 20
Figure 3.7	Croisement de trajectoires et matière résiduelle résultante..... 22
Figure 4.1	Centre d'usinage Makino A66..... 29
Figure 4.2	Courbe de puissance de la Makino A66. 33
Figure 4.3	Foret hélicoïdal à pastilles de carbure. 38
Figure 4.4	Outil à pointer/chanfreiner. 39
Figure 4.5	Dispositif de perçage coudé. 42
Figure 4.6	Différents types de fraises. 44
Figure 4.7	Porte-outil allongé favorisant le dégagement pour la broche. 47
Figure 4.8	Étau de fraisage 49
Figure 4.9	Table à rainures en T et crampons-plaqueurs..... 51
Figure 4.10	Plaque de montage..... 52
Figure 4.11	Vue de coupe d'une vis de fixation dans la plaque de montage..... 53
Figure 4.12	Direction des efforts de coupe. 53
Figure 5.1	Enveloppe cylindrique de la Makino A66..... 60
Figure 5.2	Nomenclature d'une pièce structurale aéronautique. 61
Figure 5.3	Pièces structurales simples. 61
Figure 5.4	Tolérances admissibles de l'usinage par balayage. 65

Figure 5.5	Comparaison des trajectoires d'usinage pour des pièces multiples.....	70
Figure 6.1	Caractérisation des arêtes.....	78
Figure 6.2	Représentation des entités d'usinage.....	81
Figure 6.3	Représentation des modes d'usinage d'une surface plane.....	83
Figure 6.4	Détermination de la direction d'usinage.....	84
Figure 6.5	Relation entre le chevauchement et la hauteur de crête avec un outil torique.....	85
Figure 6.6	Étapes de finition d'une poche.....	86
Figure 6.7	Impact de la minimisation de la matière brute.....	87
Figure 6.8	Représentation du montage d'usinage de la Makino A66.....	90
Figure 6.9	Représentation des configurations de machines-outils.....	91
Figure 6.10	Montage en étau avec un seul posage.....	93
Figure 6.11	Montage avec crampons-plaqueurs (posage 1 de 2 illustré).....	94
Figure 6.12	Mouvement d'entrée en matière.....	95
Figure 6.13	Dimensions caractéristiques d'un montage en étau.....	96
Figure 6.14	Configuration du montage pour une pièce usinée en deux posages.....	97
Figure 6.15	Modèle d'outil torique.....	100
Figure 6.16	Interférence outil/pièce.....	101
Figure 6.17	Matière résiduelle dans un raccordement.....	103
Figure 6.18	Modèle de déflexion d'un outil de coupe.....	104
Figure 6.19	Ordonnancement des opérations selon la rigidité.....	108
Figure 6.20	Usinage d'entités imbriquées.....	110
Figure 6.21	Compensation du rayon de coin d'un outil torique.....	111
Figure 6.22	Comparaison de modes d'usinage.....	114
Figure 6.23	Modèle de dégrossissage facilitant l'évacuation du copeau.....	115
Figure 6.24	Configuration des pattes d'attache en 1 et 2 posages.....	116

Figure 6.25	Raidisseur pour rigidifier un long mur mince.	117
Figure 6.26	Dégagement du contour pour la finition au deuxième posage.	119
Figure 6.27	Dégagement du contour par chanfrein pour la finition au deuxième posage.	120
Figure 6.28	Méthode d'usinage d'un masque.....	122
Figure 6.29	Compensation de l'avance dans un rayon.....	124
Figure 6.30	Épaisseur du copeau selon l'engagement de l'outil.....	125
Figure 6.31	Décentrage de l'outil en surfacage.	126
Figure 6.32	Différents types de mouvements pour l'usinage de poche.	127
Figure 6.33	Sens de mouvement.....	129
Figure 6.34	Traitement du parcours d'une pièce symétrique.....	131
Figure 7.1	Représentation de la pièce exemple.	141
Figure 7.2	Croquis d'épaisseur de la pièce exemple.	142
Figure 7.3	Analyse des arêtes de la pièce exemple.	143
Figure 7.4	Analyse des surfaces de la pièce exemple.....	147
Figure 7.5	Positionnement de la pièce dans le montage d'usinage.....	155
Figure 7.6	Directions d'accès des entités de la pièce exemple.	162
Figure 7.7	Usinage de rayons de raccordement.....	166
Figure 7.8	Montage d'usinage de la pièce de référence.....	171
Figure 7.9	Représentation de l'état usiné de la pièce de référence.....	172
Figure 7.10	Patte d'attache de la pièce référence.	175
Figure 8.1	Représentation d'un réseau de neurones MLP avec rétro-propagation.	178
Figure 8.2	Architecture du générateur de gamme d'usinage.....	181
Figure 8.3	Réseau de neurones d'attribution des entités d'usinage.	182
Figure 8.4	Choix du mode de fixation du montage.	184
Figure 8.5	Réseau de neurones de sélection du mode d'usinage.....	186

Figure 8.6	Réseau de neurones du choix du type d'outil.....	187
Figure 8.7	Réseau de neurones de choix du diamètre de l'outil.....	188
Figure 8.8	Réseau de neurones de l'ordonnancement des opérations.	189
Figure 8.9	Réseau de neurones de sélection du type de mouvement.....	192

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MOCN	Machine-outil à commande numérique
CAO	Conception assistée par ordinateur
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
CFAO	Conception et fabrication assistée par ordinateur
HSS	High-speed steel (acier rapide)
APT	Automatically Programmed Tools
E	Ébauche
F	Finition

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Symbole	Définition
Q	Taux d'enlèvement de matière
A	Avance de coupe
C _r	Profondeur de coupe radiale
C _a	Profondeur de coupe axiale
P _c	Puissance de coupe
k	Puissance spécifique de coupe
E	Facteur d'efficacité
F	Force
R _a	Rugosité moyenne

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

mm	millimètre
μm	micromètre
po	pouce
μpo	micropouce

Volume

cm ³	centimètre cube
-----------------	-----------------

UNITÉS DE MASSE

Masse

kg	kilogramme
g	gramme
lb	livre

UNITÉS DE TEMPS

s	seconde
min	minute

Puissance

kW	kilowatt
HP	horsepower

Contrainte

MPa	mégapascal
ksi	10 ³ livres par pouce carré

Vitesse

angulaire

r/min	rotation par minute
-------	---------------------

INTRODUCTION

L'industrie manufacturière a connu un essor important depuis la venue des outils informatiques. Les machines-outils à commande numérique et les logiciels de conception et de fabrication assistées par ordinateur en sont les grands responsables. Le développement de ces derniers ne cesse de progresser et la demande actuelle consiste à permettre une assistance à la génération des programmes d'usinage. Outre la mécanique de fonctionnement derrière ces applications logicielles, le savoir-faire propre aux entreprises doit être intégré afin de bien refléter leurs pratiques. Cet aspect est souvent manquant dans la littérature et c'est pour cette raison que la recherche proposera une formalisation des connaissances d'usinage.

Les derniers développements sur les outils de génération automatique de gammes d'usinage ont permis de constater qu'il est complexe de généraliser tous les cas possibles dans un outil unique. En effet, l'usinage implique une variété de pièces couvrant des applications infinies, et par le fait même, des géométries qui peuvent grandement différer. Pour cette raison, le présent travail vise la couverture d'un spectre de pièces restreint afin de favoriser les chances de réussite.

L'objectif de la recherche consistera à caractériser ces notions d'usinage appliquées au secteur de l'industrie aéronautique pour des pièces structurales fabriquées sur des centres d'usinage. Les étapes de génération de gammes d'usinage seront analysées et des règles de décisions seront énoncées afin de définir les paramètres significatifs de décision. Une structure de génération de gamme d'usinage utilisant des réseaux de neurones sera proposée.

Le premier chapitre portera sur la présentation de la problématique ciblée par le travail, tout particulièrement en lien avec l'industrie de la fabrication des pièces aéronautiques. Par la suite, des objectifs généraux et spécifiques seront établis afin d'orienter la résolution du problème présenté. La méthodologie du travail accompagnera la présentation des objectifs. Au troisième chapitre, une revue de la littérature permettra d'abord de déterminer l'état des travaux dans ce domaine et de regrouper les informations pertinentes pour la recherche.

Ceci jettera les bases des connaissances actuelles en usinage, à partir desquelles une synthèse sera effectuée.

Afin d'appuyer cette revue de la littérature, les informations recueillies seront corroborées avec des consultations effectuées auprès d'un partenaire industriel. La collaboration d'un partenaire industriel œuvrant dans le secteur aéronautique permettra de recueillir de l'information précieuse sur les méthodes d'usinage. La synthèse des connaissances d'usinage recueillies est présentée à l'intérieur des chapitres 4, 5 et 6. Le chapitre 4 fera état des ressources matérielles essentielles au procédé d'usinage. Ce sont en fait les paramètres fixes du procédé d'usinage, soit les machines-outils, les outils de coupe, les montages d'usinage et la matière brute. Le chapitre suivant traitera des informations extraites de la pièce à usiner. Ces informations sont les paramètres variables du procédé d'usinage, provenant de données transmises au bureau des méthodes par le département de design. En effet, c'est la géométrie de la pièce qui affectera la méthode de fabrication d'une pièce à une autre, de même que son matériau ou bien la quantité de pièces à fabriquer. Le chapitre 6 discutera de la méthode de génération de la gamme d'usinage dans un contexte d'assistance logicielle, qui consiste en réalité en une mise en commun des ressources exposées au chapitre 4 et des informations sur la pièce à usiner présentées au chapitre 5. Cette partie traitera d'une méthode d'analyse de la géométrie à usiner et des choix qui sont faits pendant la création de la gamme, tant au niveau des ressources, des stratégies que des paramètres. Au chapitre 7, la méthode proposée sera mise à l'épreuve par une gamme exemple s'appuyant sur la synthèse des connaissances élaborée dans les chapitres précédents. Cette gamme sera ensuite comparée à celle du partenaire industriel. Finalement, au chapitre 8, une proposition de l'architecture des réseaux de neurones pouvant être utilisés pour les décisions prises lors de la génération de la gamme de fabrication est présentée.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

En aéronautique, une multitude de composants sont réalisés par usinage. Pour assurer la qualité et l'intégrité des pièces, l'usinage s'effectue généralement à partir d'une plaque de matière brute, ce qui implique un fort pourcentage d'enlèvement de matière. Il devient alors essentiel de produire des parcours d'outil qui seront optimaux. De plus, une quantité énorme de composants différents contraint le département des méthodes d'accentuer sa productivité pour la génération des parcours d'usinage afin de maintenir une utilisation continue des machines-outils à commande numérique. Les pièces aéronautiques structurales se distinguent également par la complexité de leur géométrie. Ceci nécessite de longues heures de programmation avant l'usinage. Toutefois, un degré de similitude élevé d'une pièce à une autre permet de croire qu'elles se prêtent bien à une assistance à la génération de la gamme d'usinage.

La génération des trajectoires est effectuée par un programmeur en fabrication assistée par ordinateur (FAO), qui procède à des décisions pendant la programmation basées sur son expérience et ses connaissances. Puisque chacun possède une expérience distincte, les programmes d'usinage diffèrent les uns des autres pour une même pièce. Il y a donc lieu d'établir une structure et des méthodes de travail qui permettront d'uniformiser et de mettre en commun l'expérience de chacun. Ceci passe alors par la constitution d'une base de connaissances qui réunira les bonnes pratiques de l'entreprise.

L'industrie actuelle connaît également une crise de la main-d'œuvre. La population vieillit et les départs à la retraite ne cessent d'augmenter. Ces départs constituent plus qu'une perte de main-d'œuvre, c'est également une partie des connaissances et du savoir-faire qui quitte l'entreprise. Ces retraites massives occasionnent une offre d'emploi dans tous les secteurs, favorisant une mobilité grandissante de la main-d'œuvre. Cette instabilité préoccupante du savoir-faire des entreprises et de leurs précieuses ressources humaines incite également l'implantation d'une structure interne et l'élaboration de bases de connaissances.

Tous ces arguments appuient la volonté des entreprises de fabrication d'intégrer les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) et de FAO et d'apporter une assistance à la génération de la gamme et du programme d'usinage. Toutefois, depuis de nombreuses années, plusieurs recherches (Chang, 1990; Chep, 1990) ont été effectuées afin d'atteindre cet objectif, sans obtenir de résultats fracassants. Ceci incite donc à croire que cette volonté d'intégrer les logiciels de CAO et de FAO représente un défi de taille.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

L'idée ou l'objectif de ce travail consiste à déterminer la faisabilité de formaliser les connaissances d'usinage dans un contexte bien délimité, soit les pièces aéronautiques structurales. L'exercice permettra de vérifier si les gammes de fabrication peuvent être associées à des paramètres de décision, si des caractéristiques de la pièce à fabriquer se révèlent significatives lors du choix de la stratégie de fabrication. Le présent travail s'intègre dans un projet global visant à développer un outil d'assistance à la génération de gamme d'usinage. Ce projet global est donc divisé en plusieurs phases : la transformation, la préparation et la génération. La transformation consiste à effectuer le traitement de la géométrie de la pièce, c'est-à-dire la reconnaissance de forme à partir du modèle CAO. La préparation consiste quant à elle à utiliser le traitement effectué sur le modèle CAO afin d'y associer des opérations d'usinage, leur ordonnancement et les ressources matérielles utilisées. Enfin, la génération constitue la phase finale de génération des trajectoires d'usinage incorporant tous les paramètres nécessaires. Les travaux se veulent donc un élément de la phase de préparation, menant à la construction d'un système d'aide à la génération de gamme d'usinage. Ce système comportera un module de décision qui reposera sur des bases d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones. Puisque les réseaux de neurones appuient leurs décisions sur des paramètres d'entrée multiples, il importe de mettre en évidence les paramètres significatifs qui dictent les choix. De plus, ces paramètres significatifs doivent être quantitatifs plutôt que qualitatifs.

2.1 Objectifs généraux

Les objectifs généraux de ce travail sont les suivants :

- Formaliser les connaissances d'usinage par fraisage pour des pièces aéronautiques;
- Énumérer les choix relatifs à la génération d'une gamme d'usinage et les associer à des paramètres de décisions associés à des réseaux de neurones.

2.2 Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre les objectifs généraux, des objectifs spécifiques devront d'abord être atteints. Les points qui suivent représentent donc les étapes du projet :

- Déterminer les ressources disponibles pour l'usinage par fraisage d'une pièce aéronautique structurale;
- Lister les requis associés à la pièce à usiner;
- Recenser les différentes stratégies d'usinage utilisées;
- Établir des caractéristiques reliées aux opérations d'usinage et aux géométries de la pièce;
- Énoncer des règles de décision permettant d'associer les caractéristiques aux paramètres entrants (ressources, requis, stratégies);
- Structurer et synthétiser les résultats;
- Proposer une structure pour un système de génération de gamme d'usinage utilisant des réseaux de neurones;
- Proposer l'architecture des différents réseaux de neurones nécessaires.

Afin de garantir l'atteinte des objectifs mentionnés plus haut, il est indispensable de suivre une méthodologie rigoureuse.

2.3 Méthodologie

Les éléments suivants constituent les grandes lignes directrices du projet qui ont permis de déterminer l'état actuel des travaux en génération de gammes d'usinage et de planifier les étapes pertinentes à la progression de la recherche.

L'intérêt pour la génération automatique de gamme d'usinage ne date pas d'hier. De nombreux chercheurs se sont penchés sur la question, chacun proposant une méthode, une approche différente. Puisque ces travaux représentent une source d'information inestimable, la revue de la littérature constitue le point de départ de ce travail de recherche. La revue de la littérature effectuée porte évidemment sur la génération automatique de gammes d'usinage, mais aussi sur l'usinage en général. En effet, puisqu'un des objectifs

consiste à identifier les paramètres significatifs affectant les décisions lors de la génération de la gamme d'usinage d'une pièce mécanique, une recherche beaucoup plus large sur des connaissances du domaine s'imposait. Cette ouverture pouvait donc s'étendre aux techniques d'usinage de pièces mécaniques sur des machines-outils conventionnelles. Il fallait donc revenir à la base pour faire ressortir les éléments qui paraissent parfois tellement évidents qu'ils sont ancrés dans le subconscient des machinistes ou des gammistes.

Et puisque le travail de recherche est appliqué à un cadre bien délimité que sont les pièces aéronautiques structurales, une recherche d'information ciblée à ce secteur est essentielle. Les sources de références sur les techniques d'usinage de pièces aéronautiques sont toutefois peu nombreuses. Il est opportun de croire que ces connaissances sont détenues par des entreprises privées qui conservent jalousement leur savoir-faire. Afin d'appuyer et d' étoffer les connaissances universelles en usinage recueillies dans la littérature, des rencontres ont été réalisées auprès de spécialistes en usinage de pièces aéronautiques. Ces rencontres visaient à recueillir l'expertise d'usinage des spécialistes sur des machines-outils à commande numérique (MOCN). La démarche s'est répartie selon deux approches : sous la forme d'entrevues ainsi que sous la forme de consultation individuelle de la base de données.

La première approche réalisée auprès de trois programmeurs d'expérience, sur une durée d'environ 50 heures, a permis d'établir un certain nombre de règles spécifiques à l'entreprise. Ces entrevues ont permis de remettre en question des façons de faire afin de déterminer les règles et les éléments qui guident les choix effectués pendant la programmation des parcours d'outil pour l'usinage. Ceci représente un défi puisqu'il est parfois difficile d'expliquer les raisons qui motivent une décision qui paraît évidente au premier regard. Les entrevues ont donc servi à faire ressortir les raisons profondes liées aux décisions prises par les programmeurs.

La seconde approche consistait à explorer la base de données des programmes d'usinage déjà réalisés. Ainsi, des programmes d'usinage ont été révisés afin de soulever des éléments communs à chacun des cas. Il était alors possible de vérifier l'universalité des façons de faire d'un programmeur à un autre. De plus, des règles générales ont pu être

énoncées, notamment quant à la méthode de montage ou à la structure de construction des parcours d'outil.

Une fois les informations recueillies, elles ont été formalisées et structurées afin de les présenter sous une forme qui permettra leur utilisation pour des travaux futurs. Rappelons que les résultats de la recherche sont destinés à un outil de génération de gamme d'usinage dont les décisions sont basées sur un réseau de neurones. Puisque le fonctionnement d'un réseau de neurones nécessite, comme entrée, des paramètres significatifs et quantitatifs pour sa prise de décision, il importait de présenter les résultats en faisant ressortir ces paramètres et en les associant aux décisions auxquelles ils sont liés. Ceci implique également qu'il n'était pas essentiel de présenter les résultats sous forme de règles de décision, cette opération étant incluse dans le réseau de neurones lors de la phase d'apprentissage. Il est tout de même pertinent de présenter les règles dans cette recherche afin de permettre la vérification des décisions du réseau de neurones. Les observations recueillies ont été groupées en trois catégories : les ressources, les informations sur la pièce à usiner et la génération de la gamme d'usinage. Les ressources représentent donc les éléments fixes d'un ensemble borné. Ces éléments seront associés aux paramètres variables d'un ensemble ouvert correspondant à la pièce à usiner. Ces ensembles seront alors mis en relation afin de construire la gamme d'usinage.

Une fois les connaissances d'usinage caractérisées et formalisées, une vérification de la justesse de ces informations s'imposait. Cette vérification est effectuée par une simulation manuelle de la génération d'une gamme de fabrication basée sur la synthèse des informations recueillies. Une pièce aéronautique structurale est donc sélectionnée chez le partenaire industriel, sans consulter au préalable la gamme d'usinage de la pièce. L'exercice de validation consiste à produire la gamme d'usinage de cette pièce basée sur les informations contenues dans cette recherche. Les paramètres significatifs sont donc extraits manuellement, en veillant à ce que ceux-ci soient extractibles de façon automatique. Sur la base de ces données recueillies, des décisions sont prises pour générer la gamme d'usinage, selon le raisonnement qu'un réseau de neurones poserait. Cette gamme est ensuite comparée à la gamme d'usinage du partenaire industriel. Les ressources utilisées sont donc celles disponibles chez le partenaire industriel, pour le cas spécifique contenu dans l'étude. Les informations sur la pièce à usiner sont également celles dont dispose le

gammiste ou le programmeur pour la réalisation du parcours d'usinage, donc le modèle CAO, les dessins de fabrication et les requis spécifiques provenant du département de conception. L'analyse de la géométrie est effectuée manuellement, de la même façon qu'un module d'enrichissement automatisé incorporant un réseau de neurones pourrait le faire. Des entités d'usinage en sont ensuite extraites. Toujours de façon manuelle, le choix des ressources est effectué selon les éléments et les règles énoncées. Enfin, la stratégie d'usinage est élaborée en sélectionnant les opérations d'usinage, leur ordonnancement et le choix des outils de coupe. Au cours de cet exercice, une attention particulière est attribuée à vérifier si le réseau de neurones disposera de suffisamment d'information pour poser un choix représentatif du celui qui serait pris par un gammiste.

À l'achèvement de cet exercice, cette gamme est comparée à la gamme de référence du partenaire industriel. Ceci permet ainsi de valider la justesse et l'exhaustivité des informations qui ont été formalisées dans le cadre de ce travail de recherche. De plus, cet exercice permet également de mettre en lumière les difficultés pouvant être rencontrées lors du processus d'automatisation de la méthode de génération de la gamme. La pertinence des variables significatives énoncées peut également être vérifiée en partie, afin de s'assurer de fournir seulement les paramètres d'entrée utiles pour le réseau de neurones.

CHAPITRE 3

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La création de la gamme d'usinage est primordiale afin de produire les parcours d'outils optimaux, puisque l'ordonnancement des opérations d'usinage influence de façon marquée la qualité et la durée de l'usinage. Curieusement, les étapes constitutives de la gamme d'usinage ont peu évolué depuis la venue des MOCN, la logique de fabrication ayant conservé une certaine similitude avec les méthodes conventionnelles. Malgré ce fait, peu d'informations sur les méthodes sont publiées. Il semble que ce savoir appartienne aux responsables de la programmation ou aux machinistes d'expérience, que ce soit l'expertise confidentielle d'une entreprise qu'on ne veuille partager (Derigent, 2005). Pourtant, force est de constater que la logique directrice est inévitablement la même et que des principes directeurs doivent justifier les différentes façons de procéder entre deux méthodes logiques et optimales. Afin de vérifier ce qu'en pense la communauté scientifique, une revue de la littérature s'impose.

La recherche sur le sujet a permis de faire ressortir sept thèmes principaux rencontrés à travers les différents travaux publiés. On retrouve la formulation des connaissances d'usinage, la génération de gammes d'usinage, les entités d'usinage, les directions d'accès d'outil, le choix des machines et des outils, les montages d'usinage et enfin la création des parcours d'outil.

3.1 Formulation des connaissances d'usinage

La base de la génération de gammes d'usinage repose sur les connaissances de l'entreprise, détenues par le préparateur, le gammiste, le programmeur ou l'opérateur. Afin de bien transposer ces informations, il faut les présenter de façon adéquate (Chang, 1990). Les paramètres les plus importants à communiquer sur le procédé sont les suivants :

- La forme et la dimension qu'un procédé peut produire;
- Les tolérances dimensionnelles et géométriques qui peuvent être obtenues pour une géométrie prédéfinie;

- Les contraintes géométriques et technologiques du procédé;
- Les paramètres économiques du procédé.

La figure suivante illustre des exemples de contraintes géométriques.

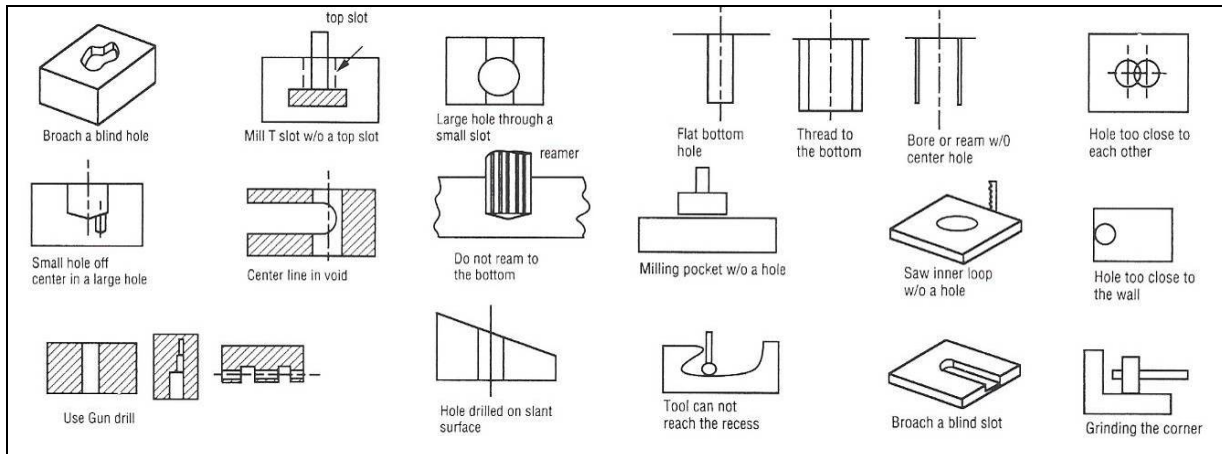


Figure 3.1 Contraintes géométriques du procédé.
(Chang, 1990)

Source : Cette figure a été tirée du livre de M. Chang, *Expert process planning for manufacturing*, p. 130.

Chang présente les connaissances à un niveau universel, associant des valeurs obtenues dans des tables à différents procédés. Pour un système génératif, un système expert est utilisé pour modéliser les connaissances du procédé. Les connaissances sont composées de faits et de règles, correspondant respectivement aux données du problème à résoudre et au savoir-faire d'un expert du procédé. Chaque procédé est énoncé sous un format condition-action (IF...THEN...). Ensuite, un moteur d'inférence permet d'interpréter et de résoudre le problème.

D'autres approches permettent de représenter les connaissances et la résolution du problème. Les systèmes algorithmiques comme les arbres et les tables de décision sont également utilisés (Anselmetti, 1990). Pour l'approche générative, la structuration des connaissances peut se présenter sous deux formes, la forme algorithmique (les tables ou les arbres de décision) ou bien sous la forme d'intelligence artificielle (Cordebois, 2003).

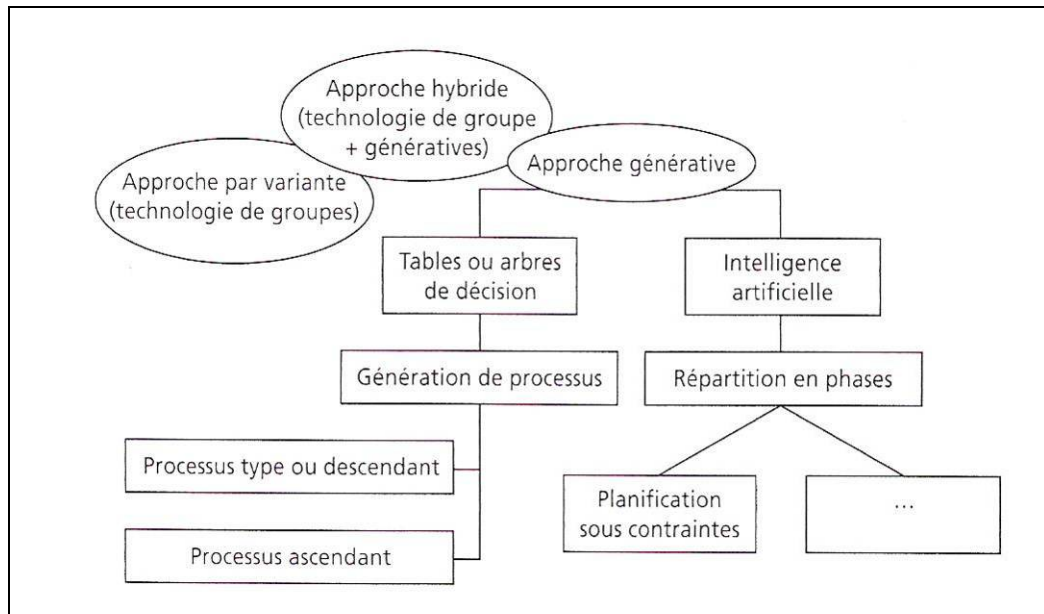


Figure 3.2 Approche générative pour la génération de gammes.
(Cordebois, 2003)

Source : Cette figure a été tirée du livre de M. Cordebois, *Fabrication par usinage*, figure 8.7 p. 361.

Peu importe l'approche choisie, elle doit être capable de s'adapter à l'évolution des procédés, permettant de représenter aussi bien les connaissances pour une pièce simple qu'une pièce complexe. De plus, elle doit permettre une maintenance rapide et efficace (Chep, 1990).

3.2 Génération de gammes d'usinage

Évidemment, une multitude d'articles recensés traitent de systèmes de préparation à l'usinage. Sarma & Wright (Sarma & Wright, 1996) mentionnent que l'objectif le plus important dans la génération de la gamme d'usinage est de minimiser le nombre de montages, et ce, pour deux raisons. On invoque d'abord l'argument des coûts qui seront augmentés et également la perte de précision. Un second objectif est la diminution des changements d'outils. Les mêmes arguments sont alors évoqués pour justifier l'affirmation. C'est d'ailleurs un argument qui justifie la grande popularité de l'usinage à haute performance. Cet article propose des modèles et des algorithmes pour minimiser le nombre

de montages d'usinage et de changements d'outils pour des pièces de fraisage permettant un montage facile, que l'on définit par « simply fixturable ». On indique aussi que la gamme comportera deux niveaux distincts, que l'on définit comme « macroplanning » et « microplanning ». Le premier niveau regroupe la définition des directions d'accès aux entités d'usinage, l'ordonnancement des opérations d'usinage, les posages et les montages d'usinage, que l'on réfère aux décisions de niveau primaire. Le « microplanning » représente quant à lui le choix des opérations d'usinage, la définition du parcours d'outil, le choix des outils et les paramètres d'usinage. On introduit le fait qu'un minimum de décisions doit être pris dans les étapes préliminaires afin de maximiser les possibilités pour la génération de la gamme d'usinage. L'autre objectif considéré vise la diminution du nombre de changements d'outils par un ordonnancement judicieux des opérations, en tentant de mettre toutes les opérations utilisant le même outil ensemble. Fait intéressant à remarquer, on tente de minimiser le nombre d'outils, mais aussi les changements d'outil. L'ordonnancement est réalisé sur la base de règles, mais celles-ci pourront être violées selon des cas exceptionnels. Par exemple, Sarma & Wright indiquent qu'on exécute généralement les opérations de perçage après les opérations de fraisage, mais on pourrait aussi utiliser le perçage pour ébaucher une poche compte tenu de son taux d'enlèvement de matière élevé et de son aisance à plonger dans la matière. Évidemment, pour atteindre les différents objectifs tout en faisant un compromis entre différentes options, il faut des critères de décision. On propose alors des contraintes d'antériorité hiérarchisées selon des niveaux, basées sur la qualité, l'efficacité ou bien le temps par exemple.

Différentes façons sont proposées pour l'ordonnancement des opérations d'usinage. Généralement, l'expert en programmation ou le responsable des gammes de fabrication basera sa décision sur son expérience et sur les méthodes développées au sein de l'entreprise. Dans un objectif d'automatisation de la génération de la gamme d'usinage, il est primordial de définir clairement les critères de décision et de s'assurer qu'ils reflètent bien la réalité. Sharma & Hayes (Sharma & Hayes, 2001) proposent une série de principes d'ordonnancement pour les opérations d'usinage qui produisent deux types de contraintes; rigides et souples. Les contraintes rigides sont celles qui affectent fortement la faisabilité de l'opération, tandis que les contraintes souples affectent l'efficacité, la qualité, le temps ou le coût de l'opération. Certains principes sont également énoncés pour l'ordonnancement des posages.

Comme mentionné précédemment, le développement technologique des logiciels de FAO est impressionnant. Mais pour les utiliser, ils requièrent encore une bonne connaissance en usinage et de nombreux efforts. Li, Huang & Shen (Li, Huang, & Shen, 1994) présentent un outil de génération de gammes d'usinage assistée par ordinateur pour des pièces aéronautiques structurales complexes. Une bonne part d'intervention est nécessaire de la part de l'utilisateur afin de convertir les informations géométriques du modèle CAO en entités technologiques. Ensuite, une base de données permet de prendre les décisions technologiques selon les théories générales et techniques des gammes d'usinage ainsi que selon l'expertise de programmeurs en FAO. Patil & Pande (Patil & Pande, 2002) proposent une stratégie pour la réalisation d'une opération de perçage, en énonçant la logique de décision à appliquer selon les conditions et en proposant l'action à prendre.

Sakal & Chow (Sakal & Chow, 1994) ont développé un logiciel de gestion pour la préparation à l'usinage en lien avec des logiciels commerciaux de CAO et de FAO. Comme d'autres auteurs avant eux, ils ont soulevé le fait que ce type d'outil peut fonctionner selon deux types de modèles, soit un modèle par variantes ou bien un modèle génératif (Chang, 1990). Le premier consiste à modifier un programme existant semblable à la pièce que l'on veut usiner. Des logiciels utilisant cette approche sont proposés. Opas et al. (Opas, Kanerva, & Mantyla, 1994) proposent l'utilisation de ce type de modèles pour des applications précises comme pour une entreprise manufacturière se spécialisant dans des produits rattachés à un nombre limité de groupes technologiques. Toutefois, l'inconvénient souvent reproché est lié à la lourdeur de la maintenance de la base de données. Le second modèle nécessite la création complète du programme d'usinage à partir de zéro. Pour ce cas, des exemples de ce type de logiciel sont proposés, en mentionnant toutefois qu'il est rare qu'une automatisation complète soit implantée avec un logiciel de FAO. Dans cet article on présente le développement fait pour lier les logiciels Autocad et Mastercam, pour l'usinage de pièces prismatiques en 2½ axes. On utilise alors une reconnaissance des formes pour déterminer les entités d'usinage et en ressortir les contours. Les informations d'usinage sont ensuite inscrites dans un fichier et l'opérateur utilise ce fichier pour générer les étapes d'usinage dans le logiciel Mastercam.

Souvent, les gens sont réticents à l'automatisation puisque ceci représente une barrière à leur liberté. Ils ne veulent pas être restreints aux possibilités qu'offre le logiciel, et ceci est tout à fait compréhensible. Il est donc essentiel qu'un système d'aide à la génération de la gamme d'usinage propose plusieurs alternatives à l'utilisateur. En fait, il existe une multitude de façons de procéder pour la mise en forme d'une pièce, et plusieurs parmi celles-ci peuvent être tout à fait adéquates. Dans ces circonstances, la décision appartiendra plutôt à l'entreprise de décider celle qui lui convient le mieux, celle qui correspond à ses pratiques habituelles. Prabhu et al. (Prabhu, Elhence, Wang, & Wysk, 1990) présentent cette approche sous la forme d'une arborescence afin de mettre en évidence les relations existant entre les opérations et ainsi permettre la génération d'alternatives. L'ouvrage décrit également ce que doit contenir la gamme d'usinage. Dans (Wang & Prabhu, 1990), on détaille également ce que doit contenir la gamme d'usinage, notamment au niveau du choix des opérations, leur ordonnancement ainsi que l'identification des surfaces intermédiaires pour le tournage. Ces dernières peuvent représenter les surfaces pour l'ébauche ou la semi-finition. On conclut finalement en indiquant que la construction d'une base de données permettant de caractériser de quelle façon sont prises les décisions est une lourde tâche et qu'il est important qu'elle soit facile à mettre à jour.

Un autre facteur pouvant affecter la gamme d'usinage est la sélection des outils. Mamalis et al. (Mamalis, Ganovsky, & Guenova, 1994) soulèvent un point intéressant, soit le fait que la sélection du meilleur outil pour chacune des opérations ne constitue pas nécessairement la meilleure gamme. Il est important de considérer la pièce dans son ensemble, puisqu'il existe des interrelations entre les opérations.

3.3 Entités d'usinage

Afin de permettre le lien entre les étapes de CAO et de FAO, il est nécessaire qu'un module intermédiaire puisse associer la géométrie de la pièce à des entités d'usinage. Pour y arriver, on passe alors d'une représentation de bas niveau, soit la représentation géométrique par les frontières, à une représentation de haut niveau fournissant des informations explicites sur la pièce afin de procéder à la génération de la gamme d'usinage, souvent nommée caractéristiques de forme ou "form features". Une telle approche est

élaborée par Tseng & Joshi (Tseng & Joshi, 1994), dans laquelle une décomposition du volume est réalisée pour ensuite reconstruire les entités d'usinage, comme des poches.

Le projet USIQUICK impliquant des centres de recherche universitaires et des partenaires industriels français apporte également une contribution très intéressante. Les thèses de Derigent et Harik (Derigent, 2005; R. F. Harik, 2007) traitent du module de transformation qui permet de combler le vide sémantique entre le modèle CAO et le modèle FAO, pavant la voie aux modules de génération de gammes d'usinage et des trajectoires d'outil. Leur approche utilise le concept d'entités d'usinage élémentaires, répondant à la définition suivante : « Une entité d'usinage élémentaire est composée d'une et une seule face élémentaire dont les frontières sont figées. Elle est associée à au moins un processus d'usinage de finition, identifié et validé, et indépendant des autres processus ». Il est ainsi assumé qu'une opération d'ébauche globale a été effectuée sur la totalité de la pièce avant de procéder à la finition des surfaces.

Cette hypothèse porte toutefois préjudice à un des objectifs initiaux qui est de minimiser les déformations en procédant à la finition de la pièce dans son état de rigidité maximale, c'est-à-dire au fur et à mesure que l'on s'approche de l'étau par exemple dans le cas d'une pièce nécessitant un posage unique.

Plusieurs auteurs ont proposé leur classification des entités d'usinage. Sridharan (Sridharan & Shah, 2004) propose 3 catégories d'entités, chacune d'elles étant subdivisées en sous catégories, comme présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.1 Classification des entités d'usinage selon Sridharan

Débouchante (<i>Cut-thru</i>)	Contour externe (<i>Cut-around</i>)	En bout (<i>Cut-on</i>)
Cylindrique	Profil	Surface ouverte plane
Réglée	Ébauche et profil	Surface ouverte complexe
Complexe		Fermée (cylindrique)
		Fermée générale

Pour chaque catégorie, des caractéristiques topologiques et géométriques sont énoncées afin de faire l'association avec le modèle CAO.

Méry (Méry, 1997) a aussi dénombré les différentes entités d'usinage rencontrées. Il propose la classification suivante, associée à un ou plusieurs outils de coupe :

Tableau 3.2 Classification des entités d'usinage selon Méry

Types d'entités	Outils associés
Surfaçages	Fraises à surfacer
Surfaçages avec îlots	Fraises à surfacer
Surfaçages avec usinages latéraux associés	Fraises à 2 tailles
Contournages	Fraises à 2 tailles Fraises à 3 tailles Fraises de forme
Rainures	Fraises à 2 tailles Fraises de forme
Poches simples	Fraises à 2 tailles à coupe centrale
Poches avec îlots	Fraises à 2 tailles à coupe centrale
Usinages axiaux simples	Fraises à 2 tailles à coupe centrale Forets Alésoirs Tarauds
Familles d'usinages axiaux	Fraises à 2 tailles à coupe centrale Forets Alésoirs Tarauds

3.4 Directions d'accès d'outil

Un concept souvent introduit au sujet des applications de génération de gammes d'usinage est la direction d'accès des outils. Le cône d'accessibilité permet de déterminer les directions d'accès d'une entité, en discrétisant cette entité en surfaces infinitésimales (Spyridi & Requicha, 1990).

La visibilité d'une surface correspond à une surface sur la sphère de Gauss, tandis que la visibilité associée à une machine correspond soit à un point, à un cercle ou à une surface sur la sphère de Gauss selon le type de machine (3, 4 ou 5 axes), tel qu'illustré à la figure 3.3. La visibilité de chacune des surfaces est analysée séparément et les solutions sont ensuite comparées à la visibilité de la machine. Ceci permet de déterminer la faisabilité de

l'usinage selon un ou plusieurs montages (Risacher, Hascoet, & Bennis, 1997), comme illustré à la figure 3.4.

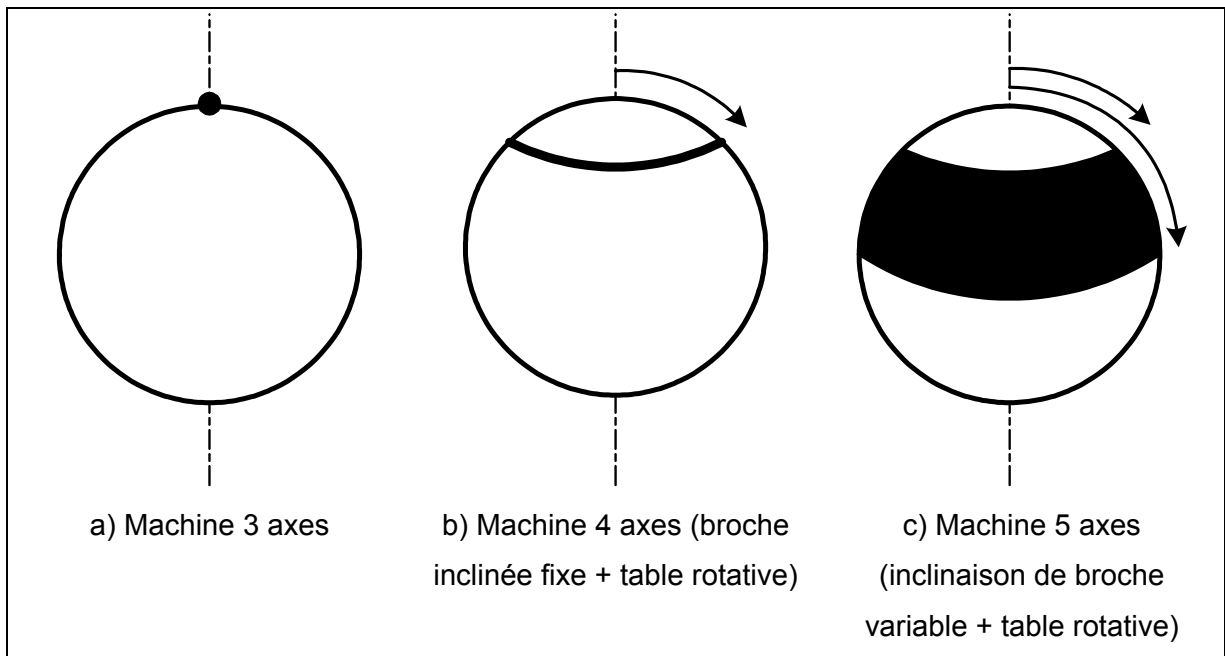


Figure 3.3 Visibilité des machines-outils.

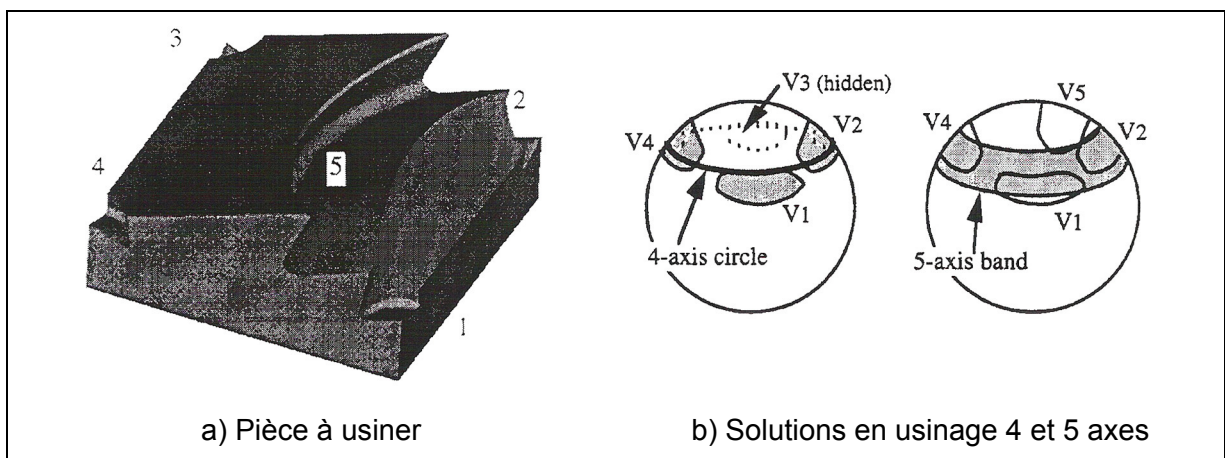


Figure 3.4 Validation de l'accessibilité des entités selon la configuration de la machine.
(Risacher et al., 1997)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de M. Risacher, *Workpiece shape and setup in milling*, figure 10.

Les directions admissibles représentées par un cône peuvent être associées à une sphère d'accessibilité correspondant aux limites de la machine (Capponi, Zirmi, Brissaud, & Villeneuve, 2006). Si une seule direction est envisageable, le cône se réduit alors à un seul vecteur. L'étude des directions d'accès est appropriée dans un contexte aéronautique compte tenu de la complexité des pièces rencontrées. Dans certains cas, une surface ne peut être totalement accessible par un procédé donné. Elle doit alors être divisée en plusieurs faces, chacune étant accessible par un procédé d'usinage. Ainsi, une surface se prolongeant sous une paroi à angle fermé comportera une partie inatteignable par un usinage en bout comme illustré à la figure 3.5.

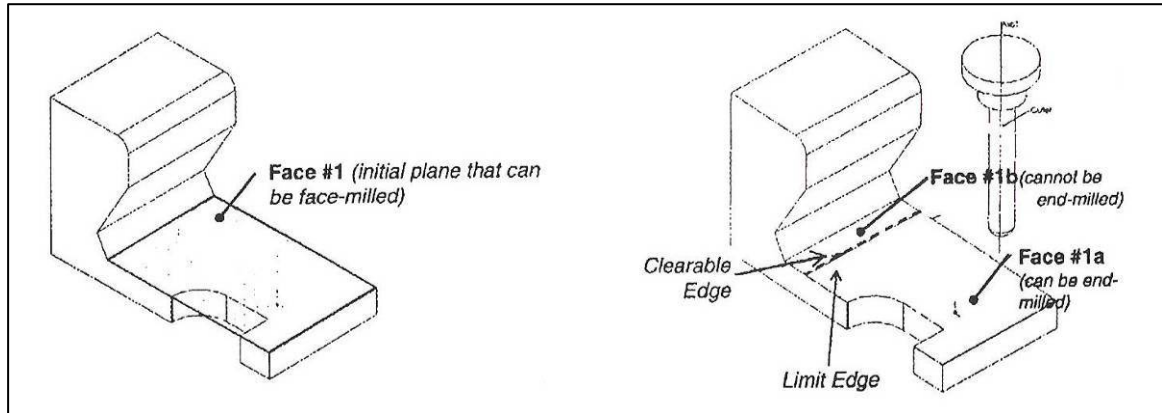


Figure 3.5 Division d'une surface comportant une zone inaccessible.
(Capponi et al., 2006)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de M. Capponi, *Computer aided process planning, strategy, and models in the aircraft industry*, figure 6.

Cette situation est aussi présentée comme étant un masque par Derigent (Derigent, 2005). Il introduit également le concept d'epsi-masque (voir figure 3.6), correspondant à de la matière résiduelle résultant du choix de l'outil. Ces résidus nécessitent alors une reprise d'usinage pour enlever la matière restante.

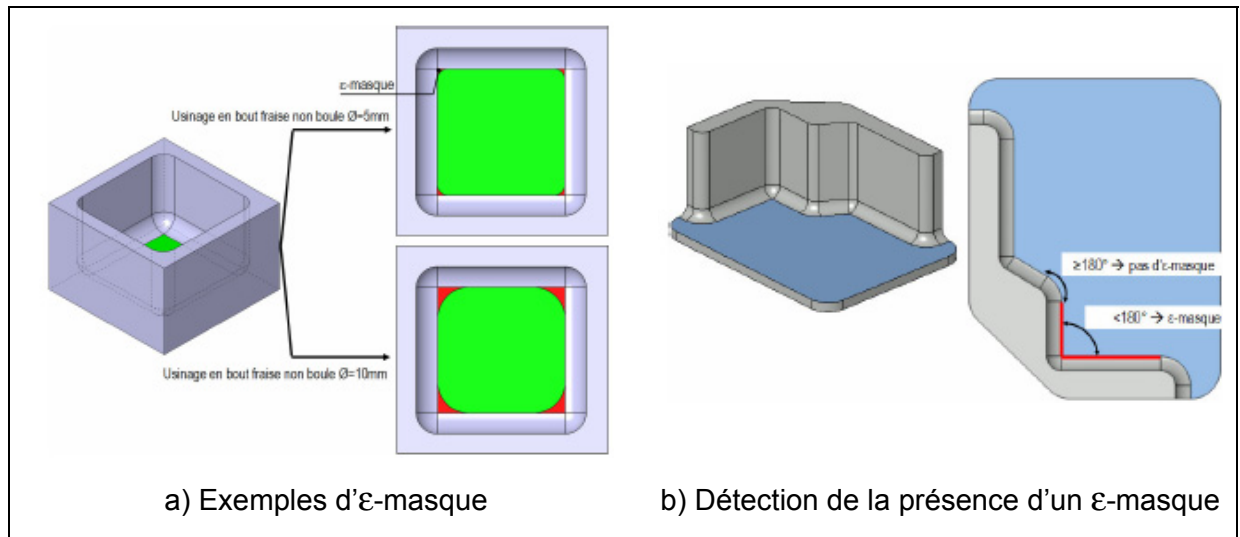


Figure 3.6 Représentation d'un ε-masque.
(Derigent, 2005)

Source : Cette figure a été tirée de la thèse de M. Derigent, *Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques: Prototypage logiciel dans le cadre du projet USIQUICK*, figures 3.47 et 3.49.

L'accessibilité est aussi étudiée pour l'usinage en flanc des surfaces planes, où la combinaison de différentes orientations comportant des zones inaccessibles (*L-zone*) conduit à la détermination d'une zone d'inaccessibilité globale (*G-zone*). Le ratio de la « *G-zone* » est comparé à l'aire totale de la surface afin d'agir comme indicateur de l'usinabilité en flanc, un ratio supérieur à 95 % étant jugé acceptable pour les pièces aéronautiques (R. Harik & Ris, 2006).

Giardini et al. (Giardini, Maccarini, Ceretti, & Bugini, 1994) proposent une méthode matricielle afin de déterminer les entités d'usinage accessibles selon les différentes orientations possibles sur une pièce prismatique. Ensuite, une série de règles permettent de construire la gamme d'usinage et de sélectionner la séquence qui répondra aux contraintes et priorités choisies.

3.5 Choix des machines et des outils

La base de connaissances permettant de faire le choix des machines-outils et des outils doit être basée sur des critères de décision. Pour la sélection d'une machine-outil, des entretiens menés par Ben Khalifa et al. (Ben Khalifa, Ben Yahia, & Zghal, 2005) auprès de gammistes, d'opérateurs de MOCN et d'enseignants en production mécanique ont conduit à la classification suivante des critères.

Tableau 3.3 Classification des critères de sélection d'une machine-outil

Ordre	Critères de sélection d'une machine-outil
1	Opération d'usinage
2	Dimensions de l'entité d'usinage
3	Morphologie de la pièce à usiner
4	Précisions d'usinage demandées
5	Diversité et complexité des usinages
6	Dureté des matériaux
7	Conditions de coupe
8	Disposition (nombre de faces à usiner et leur orientation)
9	Nombre de pièces à usiner
10	Encombrement au sol
11	Données économiques

Le classement de l'influence des contraintes d'usinage mène au tableau suivant :

Tableau 3.4 Classification des contraintes d'usinage dans le choix d'une MOCN

Ordre	Contraintes d'usinage
1	Contraintes dimensionnelles
2	Contraintes géométriques
3	Contraintes technologiques
4	Contraintes économiques

Le choix du diamètre des outils de coupe pour l'usinage des poches a été abordé par plusieurs auteurs (Hatna, Grieve, & Broomhead, 1998; Hinduja, Roaydi, Philimis, & Barrow, 2001). Ils proposent une synthèse intéressante de différents algorithmes. Une première estimation est en général effectuée selon le plus grand cercle inscrit dans la poche. Une combinaison d'outils (un grand diamètre et un plus petit) plutôt qu'un seul contribue à

réduire de façon significative la matière résiduelle, les outils de grand diamètre ne pouvant atteindre certaines zones, comme démontré sur les trois cas de la figure 3.7.

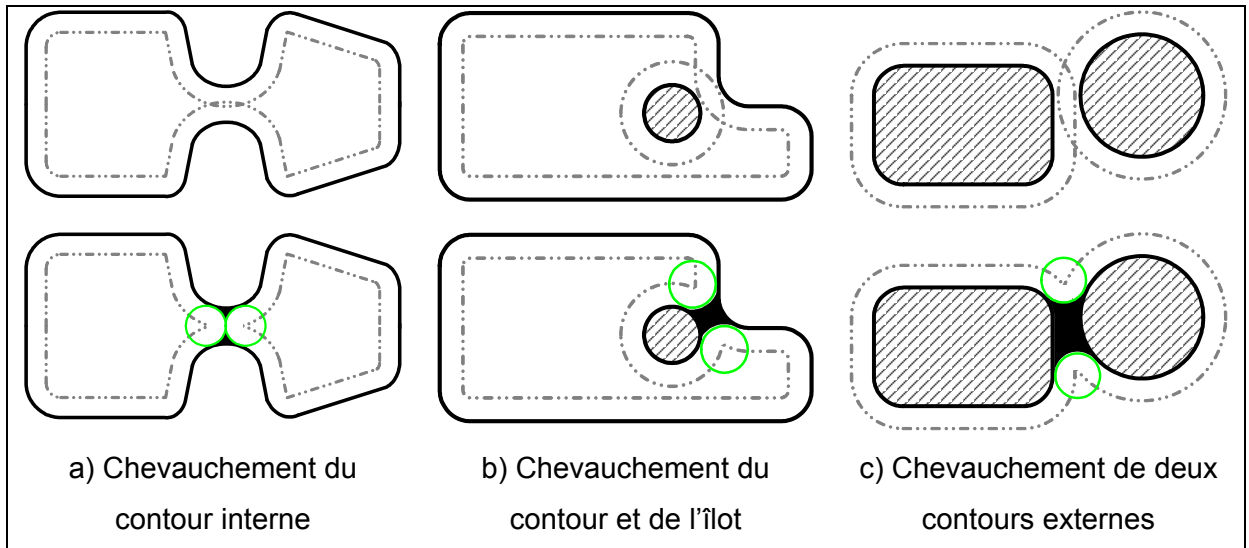


Figure 3.7 Croisement de trajectoires et matière résiduelle résultante.

Le diamètre de l'outil de coupe est également choisi en considérant le coût d'usinage minimum qui est une fonction du taux associé au temps de l'usinage et du coût de l'outil. Une optimisation peut être réalisée en partant du diamètre maximum admissible pour la géométrie, celle-ci pouvant être déterminée à l'aide du diagramme de Voronoi (Hinduja & Sandiford, 2004). Le diamètre est ensuite diminué jusqu'à l'obtention d'une longueur totale du parcours supérieure de 30 % comparativement à la longueur associée à l'outil de diamètre maximum. La profondeur de coupe radiale exerce également une forte influence sur la longueur du parcours d'outil dans le cas de l'usinage d'une poche (Hinduja et al., 2001). Une simulation démontre que le chevauchement radial optimal est de 15 %.

3.6 Montages d'usinage

En règle générale, une attention particulière est portée sur la minimisation du nombre de posages, puisque ceci affecte directement la précision et le temps de l'usinage. En génération de gamme assistée par ordinateur, la qualité du montage doit aussi être évaluée selon des indices de performance. La qualité du positionnement respectivement aux

tolérances à atteindre sur la pièce, la stabilité de la matière brute soumise aux efforts de coupe pendant l'usinage et l'accessibilité de l'outil de coupe sont des indicateurs permettant d'évaluer le montage d'usinage (Paris & Brissaud, 2005).

Le critère généralement utilisé pour déterminer le nombre de montages est la direction d'accès aux entités d'usinage. Kannan & Wright (Kannan & Wright, 2004) proposent un algorithme pour minimiser le nombre de montages et pour déterminer la configuration des éléments de fixation, que ce soit en étau ou bridé. L'application est dédiée à des pièces en 2½D, c'est-à-dire que les entités d'usinage peuvent être définies par un contour en 2D, une profondeur et une direction d'accès. On relate également une caractéristique importante de la génération de la gamme d'usinage, soit le fait que cette activité est non linéaire. Ceci provient du fait que l'on cherche à minimiser le nombre de posages, mais ceci dépend du choix de la direction d'accès des entités d'usinage. Comme ces dernières peuvent comporter plus d'une option, il est nécessaire de procéder à des itérations afin de trouver la meilleure solution.

Chou et al. (Chou, Srinivas, & Saraf, 1994) proposent une approche plus globale pour la conception des montages d'usinage. On énonce des règles générales permettant d'orienter les choix du montage, ainsi que les fonctions et requis d'un bon montage.

3.7 Parcours d'outil

La génération des parcours d'outils est une étape importante dans la création du programme d'usinage. Elle peut avoir un impact non négligeable sur la longueur du trajet d'outil et par le fait même sur le temps d'usinage. Différentes stratégies sont proposées par les logiciels de FAO pour enlever de la matière. On peut ainsi faire l'ébauche d'une poche par une série de trajectoires décalées par rapport au contour (en spirale), par zigzag ou bien en suivant une seule direction avec des retraits entre les passes. Le mode en spirale est moins sensible aux erreurs et plus efficace pour les formes complexes, mais la trajectoire plus lourde à générer, tandis que l'approche en zigzag produit des parcours plus courts si la dernière passe de contournage n'est pas considérée (Hatna et al., 1998). Le type d'entrée en matière peut également être adapté selon le besoin par une plongée verticale ou sur une rampe rectiligne ou spirale (hélicoïdale). Les approches sur les parois peuvent aussi être

choisies, tangentielles ou à angle. Bref, une multitude de stratégies existent et il est nécessaire de déterminer dans quelles circonstances celles-ci sont optimales et efficaces. Suh & Shin (Suh & Shin, 1996) proposent une méthode pour ébaucher des poches complexes à l'aide d'un réseau de neurones. L'emphase est mise sur la génération du parcours d'outil comportant un trajet minimum, en permettant de multiples plongées et retraits. Ceci donne alors lieu à une ébauche incomplète qui peut comporter des discontinuités défavorables à l'obtention d'un fini de surface optimal pour l'opération de finition. Ils mentionnent également quelques conclusions énoncées par différents auteurs au sujet des stratégies et de leurs avantages.

En usinage surfacique avec un outil à bout sphérique, il a été démontré que la qualité de la surface peut être améliorée en optimisant l'angle d'inclinaison de l'outil. Chen et al. (Chen, Chang, & Chang, 2000) ont développé un outil de génération automatique de l'angle d'inclinaison de l'outil en tout point d'une surface usinée utilisant un réseau de neurones. Parmi les avantages de l'utilisation du réseau de neurones, ils citent la possibilité de surmonter les difficultés reliées aux non-linéarités et aux grandes quantités de données.

Tout système de génération de gamme d'usinage comporte aussi un module de choix des paramètres de coupe. L'objectif principal est de maximiser le taux d'enlèvement de matière lors des opérations d'ébauche, alors que l'emphase est mise sur la qualité des surfaces et le respect des tolérances pour les opérations de finition (Hatna et al., 1998). Certains sont basés sur des tables provenant de livres de référence (Fidan & Elsayy, 2002; Tolouei-Rad & Bidhendi, 1995), alors que d'autres procèdent à une optimisation des paramètres. Reddy & Ghosh (Reddy & Ghosh, 1994) utilisent la méthode Taguchi afin de déterminer les paramètres influents en tournage et pour minimiser les facteurs de bruit. On mentionne également que le modèle CAO doit contenir des informations essentielles comme le matériau, la géométrie et la rugosité des surfaces. Verma et al. (Verma, Holcomb, Blessner, Tilman, & Johnston, 2003) ont plutôt orienté leur recherche afin de déterminer les paramètres nécessaires pour atteindre un fini de surface désiré, toujours selon la méthode Taguchi. Parmi ces paramètres, on retrouve le type d'outil, la vitesse d'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe, classés en ordre décroissant selon l'influence sur le fini de surface.

Une attention particulière doit également être portée au contexte d'usinage. Les paramètres de coupe affectent grandement les efforts de coupe et pour cette raison, la rigidité de la pièce doit être considérée dans les décisions prises. Ceci peut se produire en raison de l'évolution de l'usinage de la pièce qui affaiblit le lien entre la pièce et la matière brute ou lors de l'usinage de parois minces, affectant la qualité du résultat (Ratchev, Govender, Nikov, Phuah, & Tsiklos, 2003).

Boogert et al. (Boogert, Kals, & van Houten, 1996) évoquent le fait que l'utilisation d'une base de données sur les paramètres de coupe comporte de nombreux désavantages, notamment un stockage important d'informations, la difficulté de gérer ces données et la dépendance des paramètres selon les conditions (outils, machine, tolérances, objectifs d'optimisation). Ils proposent alors une approche générative pour calculer les conditions de coupe. Des modèles du procédé sont utilisés afin de représenter les conditions de coupe, les efforts de coupe, la rugosité de surface et l'usure de l'outil. On propose également un modèle de calcul de trajectoire d'outil afin de minimiser l'usure en déterminant judicieusement le décalage radial lors de l'usinage d'une face ou d'une poche. El-Mounayri et al. (El-Mounayri, Kishawy, & Tandon, 2002) proposent l'utilisation d'un réseau de neurones pour calculer les efforts de coupe et l'optimisation par essaim de particules (« particle swarm optimization ») pour déterminer les paramètres de coupe.

Les programmeurs en FAO expérimentés possèdent une connaissance indéniable sur les paramètres à utiliser pour l'usinage optimum. Ce savoir-faire est présent dans les programmes d'usinage et il est possible de le récupérer par de l'ingénierie inverse. Yan et al. (Yan, Yamazaki, & Liu, 2000) proposent cette option à partir du programme d'usinage, de la liste des outils et des informations sur la matière brute. On extrait ainsi les entités d'usinage, la séquence des opérations, les paramètres de coupe associés aux opérations ainsi que les temps d'usinage.

3.8 Définitions

Afin d'assurer une bonne compréhension et une interprétation juste de la terminologie employée, la définition de quelques expressions est présentée ci-dessous.

Entité d'usinage : « Résultat, sur une pièce mécanique, du passage d'un outil donné, qui parcourt un ensemble de trajectoires de topologie déterminée » (Méry, 1997). Cette définition recoupe celle de Bourdet qui la définit comme « une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu. Ce processus est quasi indépendant des processus des autres entités » (Bourdet, 1990).

Copeau minimal : « Lors de l'usinage, une quantité de matière minimale est nécessaire à la coupe en évitant l'écrouissage ou le broutement. Ce volume indispensable pour garantir la coupe est appelé copeau minimal. Les valeurs d'épaisseur du copeau minimal sont fonction des procédés d'usinage et du niveau de finition (ébauche, semi-finition et finition) des surfaces. Ces valeurs sont déterminées par expérimentation. » (Cordebois, 2003).

Opération d'usinage : « Travail d'un outil qui produit une et une seule forme géométrique. Citons par exemple, le perçage au foret, une passe en surfacage, une passe en finition d'alésage » (Cordebois, 2003).

Gamme d'usinage : « Ce terme très général regroupe l'ensemble des informations, plus ou moins détaillées, relatives à la réalisation d'une pièce. La gamme d'usinage représente l'ensemble des informations selon des degrés de détails et des points de vue différents (fabrication, gestion de production, bureaux d'études ou des méthodes), relatifs à la réalisation d'une pièce » (Cordebois, 2003).

Masque : Entité d'usinage qui « caractérise certaines formes géométriques dont une zone est « masquée », c'est-à-dire qu'elle est inaccessible en mode usinage en flanc ou usinage en bout. C'est une entité qui est usinée en appliquant des stratégies métier particulières. Ces stratégies permettent de résoudre le problème d'usinabilité de sa surface masquée par modification de la géométrie ou utilisation d'outils spéciaux (outil conique) » (Derigent, 2005).

CHAPITRE 4

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES D'USINAGE - LES RESSOURCES

La revue de la littérature a permis de relever des informations intéressantes sur la génération de gammes de fabrication. Par contre, cette exploration a été jugée incomplète, notamment en raison du caractère général des informations disponibles. Pour cette raison, des rencontres ont été réalisées auprès de spécialistes en fabrication assistée par ordinateur. Celles-ci ont permis d'appuyer les renseignements recueillis lors de la revue de la littérature et même d'apporter des précisions particulières au secteur de l'industrie aéronautique.

Les rencontres auprès des spécialistes se sont déroulées en deux temps. Premièrement, des entrevues ont été réalisées avec les spécialistes en programmation des parcours d'outil pour l'usinage de pièces structurales aéronautiques. Deuxièmement, une consultation individuelle de la base de données a permis d'explorer différents programmes d'usinage. Pour restreindre la complexité du travail et l'éventail de possibilités, les rencontres ont porté sur des pièces structurales simples usinées sur une machine-outil spécifique, soit un centre d'usinage à quatre axes. Les pièces sélectionnées pouvaient être usinées en un ou deux posages.

La première approche consiste à accompagner le programmeur lors de la réalisation d'un programme d'usinage. Il est alors possible de suivre le raisonnement du programmeur lors des prises de décision nécessaires à chacune des opérations d'usinage. L'interaction directe avec le spécialiste favorise la remise en question des façons de faire lors de la génération des parcours d'outil pour l'usinage. Une attention particulière est portée sur les paramètres significatifs ayant une influence sur les décisions prises. Par exemple, pour une opération d'usinage en flanc, le choix du diamètre de l'outil de coupe a été questionné et les éléments occupant une place dans cette décision ont été soulevés. Puisque cette étude vise à déterminer des paramètres d'entrée d'un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage utilisant une forme d'intelligence artificielle, il importe de remonter à la base de l'usinage et de questionner des décisions qui paraissent évidentes pour un programmeur

expérimenté. Inévitablement, la connaissance de ces paramètres de base est primordiale afin d'orienter correctement l'outil d'assistance avec des données d'entrée révélatrices. De plus, la phase d'accompagnement est effectuée auprès de plusieurs programmeurs afin d'élargir le champ de l'étude et de représenter de façon optimale le savoir-faire de l'entreprise. L'exercice a ainsi permis de mettre en lumière les variables impliquées dans le processus décisionnel.

La deuxième approche consiste quant à elle en une consultation de la base de données des programmes d'usinage déjà réalisés. Pour ce faire, des programmes sont sélectionnés au hasard, toujours en retenant des pièces simples usinées sur le même centre d'usinage. Les programmes sont analysés afin de noter des façons de faire communes qui se répètent d'un programme à l'autre et pour confirmer les informations recueillies lors de la première phase d'accompagnement. La sélection aléatoire des programmes permet de mieux généraliser le savoir-faire de l'entreprise en augmentant le nombre de programmeurs étudiés. L'exercice a permis de réfléchir sur les méthodes utilisées et a soulevé de nombreux questionnements. Les interrogations ont ensuite été discutées avec les programmeurs afin de bien comprendre les choix effectués et surtout les raisons derrière ces choix. Les conclusions retenues au cours de ces rencontres, jumelées à celles recensées lors de la revue de la littérature, ont permis de faire ressortir des paramètres de décision significatifs qui seront présentés à l'intérieur des prochains chapitres.

Puisque la FAO consiste en un éventail exorbitant de possibilités, il serait fort prétentieux de croire réalisable la synthèse d'un procédé si complexe en ces quelques pages. Il est alors plus réaliste de cibler un type de pièces particulier et une configuration de machine-outil unique. L'industrie aéronautique offre cette opportunité puisque les pièces peuvent être subdivisées en un nombre restreint de familles comportant des caractéristiques communes. De plus, l'approche préconisée correspond totalement à leurs besoins compte tenu de la variété de pièces rencontrées dans chaque famille et des petites séries qu'elles représentent.

Au cours du présent chapitre, les ressources disponibles lors de l'usinage d'une pièce sont exposées. Parmi ces ressources, les informations pertinentes qui jouent un rôle décisif dans les choix effectués lors de la génération de la gamme d'usinage sont mises en évidence.

Ces informations ont été relevées au cours de la revue de la littérature ainsi que lors des consultations menées auprès d'experts en usinage rencontrés chez le partenaire industriel. La justification de l'importance et de la nécessité de ces paramètres sera illustrée au cours des chapitres subséquents.

4.1 Ressources

Avant de pouvoir programmer le parcours d'outil pour l'usinage d'une pièce, il est essentiel de bien connaître les ressources disponibles et les caractéristiques de celles-ci. Les machines-outils, les outils de coupe, les montages d'usinage et la matière brute sont les bases de tout programme en FAO. D'ailleurs, ce sont habituellement les premières informations qui sont requises à l'élaboration de la gamme permettant de réaliser l'usinage de la pièce. Les ressources utilisées pour la présente étude et leurs particularités sont présentées ci-dessous, dont l'illustration de la MOCN à la figure 4.1.



Figure 4.1 Centre d'usinage Makino A66.
<http://www.bluestarmachinery.com>

4.1.1 Machines-outils

Une panoplie de machines-outils existe dans les ateliers, chacune d'elles étant adaptée au type de pièces, de matériau ou de production. Les caractéristiques associées aux machines-outils sont énoncées ci-dessous.

4.1.1.1 Axes de la machine-outil

La plupart des machines utilisées dans l'industrie aéronautique comportent 4 ou 5 axes afin de minimiser le nombre de montages en plus de s'adapter au niveau de complexité des pièces. Ainsi, en plus des trois axes en translation, un axe rotatif permet généralement l'orientation d'un bloc de montage comportant cinq faces accessibles. Un axe rotatif additionnel fournit des possibilités d'accès supérieures. L'usinage des surfaces réglées est simplifié, pouvant être réalisé par un usinage en flanc plutôt qu'en balayage. Des économies importantes en temps et en qualité en résultent.

La machine Makino (voir figure 4.1) utilisée pour l'étude comporte 4 axes, l'axe rotatif (B) étant autour de l'axe Y. Cette machine est donc utilisée pour des pièces de complexité faible et moyenne. L'axe rotatif est plutôt utilisé pour permettre le positionnement de la table d'usinage. Les mouvements d'usinage en simultané avec l'axe rotatif sont plutôt rares.

La topologie des axes est également significative du comportement de la machine-outil. La topologie indique la structure de la machine-outil, et par le fait même la dépendance des axes. La construction d'une machine-outil repose sur une fondation, le bâti de la machine. Sur cette fondation, des axes se déplacent afin de créer un mouvement relatif entre la pièce et l'outil. La topologie permet donc de définir la chaîne de dépendance entre les mouvements des axes. Cette topologie peut être définie par une chaîne entre la pièce, désignée par W et l'outil de coupe désigné par T. La chaîne incorpore ainsi les différents axes de la machine-outil et leur dépendance par rapport à la fondation de la machine désignée par F. Par exemple, une machine pourrait être représentée par une topologie WBFXYZT. Ainsi, cette configuration correspond à une machine munie d'un axe rotatif relié à la fondation et supportant la pièce, tandis que l'outil dépend simultanément des axes Z, Y et X, ce dernier axe reposant sur la fondation de la machine. Ceci donne une indication

quant à la propagation des erreurs de positionnement de la machine, dues aux écarts géométriques des axes et aux écarts cinématiques des articulations.

La longueur des axes linéaires et la plage angulaire des axes rotatifs permettent de déterminer l'enveloppe de la machine-outil. La dimension de la pièce sera ensuite comparée à cette enveloppe et constituera un des premiers critères de sélection de la MOCN.

Pour le cas présent, la machine utilisée est dédiée à des pièces de faibles dimensions. De plus, le bloc de montage fixé sur la table ne permet pas de fixer des pièces de grandes dimensions. Les axes de la machine ont les longueurs suivantes :

- Axe X : 31.5 po (-15.745/+15.745);
- Axe Y : 27.55 po (+3.15/+30.70);
- Axe Z : 38.20 po (+5.91/+31.10);
- Axe B : 360° (continu).

Parmi les caractéristiques des axes de la machine-outil, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le nombre d'axes de la machine-outil;
- La topologie des axes;
- La longueur des axes linéaires;
- La plage angulaire des axes rotatifs.

4.1.1.2 Changement d'outils

Les machines comportent généralement une variété d'outils généraux permettant de réaliser les opérations fréquemment rencontrées. Si un besoin spécifique est soulevé, cet outil sera ajouté au magasin d'outil, dans des espaces libres ou par substitution. Puisque la configuration du couple machine et montage est constante, l'outillage est adapté aux besoins spécifiques. Dans le cas à l'étude par exemple, comme le bloc de montage

possède un étau sur la face supérieure, les porte-outils doivent être suffisamment longs pour atteindre la pièce sans interférence (voir figure 4.7).

La vitesse de changement d'outil des machines récentes est phénoménale. La minimisation des changements d'outils peut alors paraître désuète. Toutefois, il est important de considérer le temps copeau à copeau, en incluant le temps de réaccélération de la broche. De plus, il peut être intéressant d'utiliser au maximum un même outil de coupe pour usiner la pièce afin de minimiser les discontinuités de surfaces.

Certaines machines de plus vieille génération ne possèdent pas de mécanisme de changement d'outil. Dans cette situation, la minimisation des changements d'outil revêt une importance supérieure puisqu'ils impliquent un changement manuel de la part de l'opérateur.

Par exemple, la Makino A66 de l'étude compte un magasin de 128 outils, dont environ 80 outils sont disponibles en permanence, tandis que le temps de changement d'outil est de 0.7 seconde (3.4 secondes copeau à copeau).

Parmi les caractéristiques associées aux changements d'outil, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le nombre d'outil contenu dans le magasin d'outil;
- Le temps de changement d'outil, copeau à copeau.

4.1.1.3 Performances

Différents paramètres additionnels permettent de procéder au choix de la machine. Le couple et la vitesse de la broche, la vitesse de déplacement des axes et la précision de positionnement doivent être considérés.

Puissance, couple et vitesses

Selon la dimension de la pièce et du matériau de la matière brute, le choix des outils sera influencé. En règle générale, le diamètre de l'outil de coupe et son nombre d'arêtes tranchantes affecteront le couple nécessaire à la broche. L'usinage est aussi possible sur une plage de vitesses de rotation, affectant ainsi la puissance demandée. Le graphique suivant illustre la puissance du moteur de la Makino A66 en fonction de sa vitesse de rotation. La puissance maximale atteinte est de 22 kW (29.5 HP).

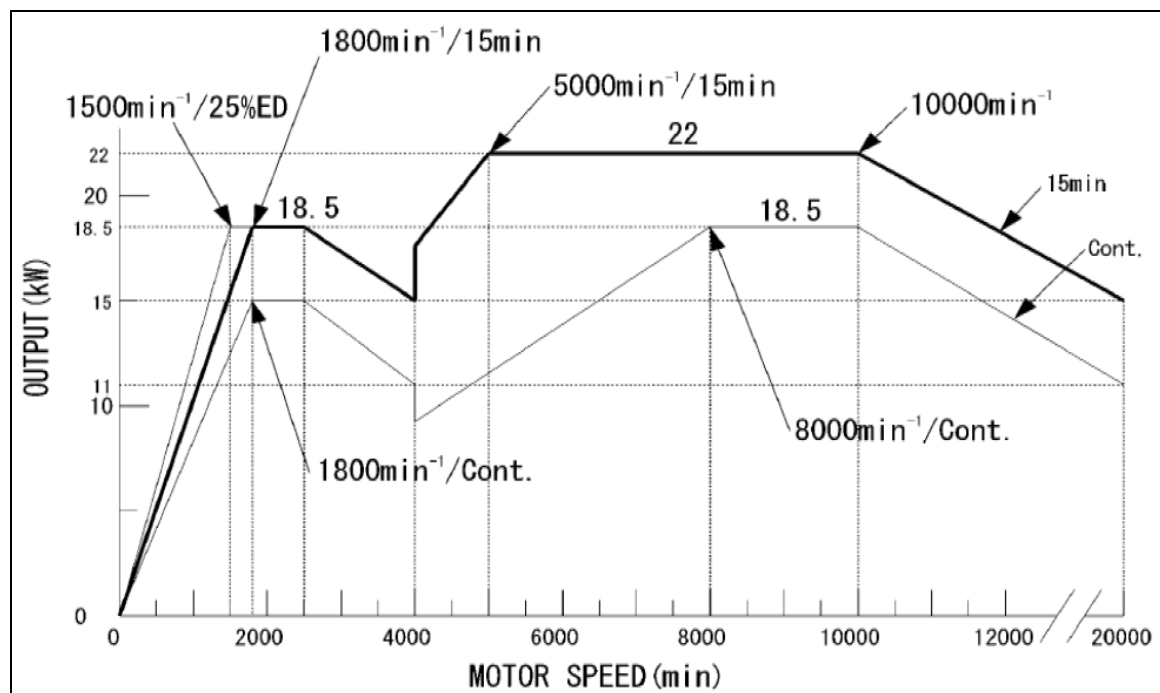


Figure 4.2 Courbe de puissance de la Makino A66.
(Bombardier-Aéronautique)

Source : Cette figure a été tirée de la documentation technique interne de Bombardier Aéronautique, UCU42, page 17.

La courbe de puissance indique également une vitesse de rotation maximale de 20 000 r/min. La vitesse de déplacement des axes se situe quant à elle autour de 1575 po/min.

La quantité de matière à enlever sur la pièce peut également donner une idée du temps nécessaire pour l'usinage, en la mettant en relation avec le taux d'enlèvement de matière.

Le taux d'enlèvement de matière (Q) correspond au volume de matière soustrait par unité de temps et il est propre à chaque outil de coupe. Il se calcule selon la formule suivante :

$$Q = A * C_r * C_a \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} Q : \text{Taux d'enlèvement de matière} \\ A : \text{Avance de coupe} \\ C_r : \text{Profondeur de coupe radiale} \\ C_a : \text{Profondeur de coupe axiale} \end{array}$$

En partant de cette valeur, la puissance de la machine nécessaire peut aussi être déduite selon la puissance spécifique de coupe (k) du matériau.

$$P_c = Q * k \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} P_c : \text{Puissance de coupe} \\ Q : \text{Taux d'enlèvement de matière} \\ k : \text{Puissance spécifique (constante)} \end{array}$$

Par exemple, pour l'usinage d'une pièce d'aluminium avec une fraise en bout cylindrique d'un diamètre de 5/8 pouce avec les paramètres suivants :

$$\begin{array}{ll} C_a = 0.25 \text{ po} & A = 400 \text{ po/min} \\ C_r = 0.313 \text{ po} & k = 0.35 \text{ HP/po}^3/\text{min} \end{array}$$

On obtient :

$$\begin{array}{l} \text{et} \quad Q = 400 \text{ po/min} * 0.313 \text{ po} * 0.25 \text{ po} = 31.3 \text{ po}^3/\text{min} \\ \quad P_c = 31.3 \text{ po}^3/\text{min} * 0.35 \text{ HP/po}^3/\text{min} = 10.95 \text{ HP} \end{array}$$

Cette valeur représente la puissance nécessaire à l'outil de coupe. Il faut également additionner les pertes à vide, spécifiques au système. Ces pertes sont approximées par l'attribution d'un facteur d'efficacité (E) à la machine, variant de 60 à 90 %. En considérant cette perte et une vitesse de rotation de 17 500 r/min, la puissance demandée est sous la limite admissible sur la machine Makino A66. Toutefois, l'utilisation d'outils de plus grand diamètre fait augmenter rapidement le taux d'enlèvement de matière, affectant du même coup la puissance nécessaire. Ainsi, l'utilisation d'une fraise à surfacer d'un diamètre de 2 po nécessite une puissance de près de 29.5 HP, pour les paramètres suivants :

$C_a = 0.12 \text{ po}$	$A = 300 \text{ po/min}$
$C_r = 1.75 \text{ po}$	$k = 0.35 \text{ HP/po}^3/\text{min}$
$E = 0.75$	$r/\text{min} = 10\,000$

La vitesse de déplacement des axes doit également être considérée, autant pour les axes linéaires que rotatifs, en mouvement de coupe ou en mouvement rapide. Elle aura une forte influence sur le temps d'usinage, particulièrement pour les pièces de grandes dimensions.

Précision de positionnement

Le degré de précision de la pièce usinée sera aussi fonction de la précision de positionnement de la machine. Cet aspect doit aussi être pris en considération lors du choix de la machine. Dans certains cas, il peut être nécessaire de diminuer les vitesses de déplacement aux changements de direction pour s'assurer que l'outil emprunte la trajectoire programmée avec précision. À titre indicatif, la précision théorique de positionnement de la Makino A66 est de l'ordre de 0.0001 po, selon le manufacturier. Toutefois, aucune indication n'est donnée par le manufacturier quant au degré de précision du positionnement en fonction de la vitesse de déplacement.

Parmi les caractéristiques associées aux performances de la machine-outil, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La puissance de la broche;
- Le couple de la broche;
- La vitesse de rotation de la broche;
- La vitesse de déplacement des axes linéaires et rotatifs;
- La précision de positionnement.

4.1.1.4 Charges admissibles

Un autre paramètre qui dictera le choix de la machine est la charge admissible sur la table d'usinage. Cette charge tiendra alors compte du poids de la matière brute en plus du poids

du montage. Elle affectera la durée de vie des composants de la machine en plus d'influencer la mise en mouvement de la table. Au même titre, la broche est aussi limitée à la dimension de l'outil, à son poids et son inertie polaire qui affecteront sa vitesse de mise en rotation.

La charge admise sur la table de la Makino A66 est de 1000 kg (2200 lb). Ceci doit inclure le poids du dispositif de montage des pièces, limitant le poids admissible de la pièce. L'outil doit se limiter à 8 kg (17.6 lb).

Parmi les caractéristiques associées aux charges admissibles de la machine-outil, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La charge admissible sur la table de la MOCN;
- La masse de l'outil de coupe inséré dans la broche de la MOCN.

4.1.2 Outils

Les outils sont généralement bien connus et maîtrisés. Il existe une variété d'outils disponibles afin de répondre à une multitude de besoins, que ce soit au niveau des dimensions, de la forme ou de la qualité à obtenir. La littérature technique relate précisément leur domaine et leurs paramètres d'utilisation.

La construction de la gamme d'usinage est largement influencée par les outils disponibles. On cherche donc à maximiser le taux d'enlèvement de matière tout en tenant compte de la rigidité de l'ensemble. L'accès à la pièce est aussi un critère à considérer. Pour cette raison, le porte-outil sera également parmi les variables de décision, puisque sa longueur et son diamètre contribueront à augmenter les options envisageables.

Chaque type d'outil peut être associé à une forme générée et à un type d'opération spécifique. On peut distinguer deux groupes d'outils, soient les outils associés à un trou (axiaux) et ceux associés à une opération de fraisage (radiaux).

4.1.2.1 Outils axiaux

Évidemment, on associe rapidement un trou à un foret. Ceci s'explique par le fait que le foret est un outil simple et efficace. Les outils associés à un trou ont la particularité d'être utilisés uniquement selon un mouvement axial. Les outils suivants peuvent tous être associés à un trou.

Foret hélicoïdal

Comme indiqué précédemment, le foret hélicoïdal est un outil permettant d'atteindre un taux d'enlèvement de matière élevé tout en étant très simple d'utilisation. Sa construction permet une plongée dans la matière, nécessitant malgré tout une opération de guidage compte tenu de sa faible rigidité latérale due à son rapport de longueur/diamètre élevé. Pour cette raison, il est préférable de choisir le foret le plus court permettant de réaliser l'opération. Ce guidage peut être réalisé par un foret à centrer ou à pointer (Dormer, 2006).

En règle générale, le foret hélicoïdal est utilisé pour procéder à l'ébauche d'un trou. Lorsque le niveau de qualité à atteindre est élevé, on utilisera un alésoir ou une barre à aléser pour la finition du trou. Il existe toutefois différents substrats permettant d'atteindre un niveau de qualité relativement intéressant avec un foret hélicoïdal. Ainsi, un foret en carbure permet d'atteindre une qualité H8, tandis qu'un foret en acier rapide pour usage général est limité à une qualité H12 (Krar, Oswald, & St-Amand, 1980).

Le choix de la géométrie du foret est également important. Premièrement, il faut choisir l'angle de la pointe selon le matériau à percer. La pointe conventionnelle est affûtée à 118° et elle donne de bons résultats pour la plupart des matériaux. Pour les métaux non ferreux, une pointe prononcée est choisie, variant entre 60° et 90° . Enfin, un angle de pointe réduit est privilégié pour les matières dures et résistantes, soit de 135° à 150° . De plus, la longueur du foret doit être minimisée afin d'éviter une forte déflexion, tout en s'assurant que les copeaux puissent s'évacuer des flûtes.

Les forets sont disponibles avec une grande variété de revêtements, permettant de réduire l'usure tout en offrant une compatibilité avec le matériau usiné. L'angle de l'hélice de même

que le nombre de flûtes sont également variables. Enfin, la tige est offerte en format cylindrique ou conique.

L'arrosage est également un élément critique en perçage. L'utilisation d'un fluide de coupe (huile soluble) est recommandée, permettant de dissiper la chaleur, de lubrifier et de favoriser l'évacuation des copeaux. Toutefois, il peut devenir difficile de bien arroser les lèvres tranchantes du foret au fond d'un trou. Un foret à canalisation d'huile peut alors pallier cet inconvénient.

L'évolution des forets hélicoïdaux a permis l'avènement de forets avec des pastilles de carbure. Leurs principaux avantages résident dans leur possibilité de remplacement de la partie tranchante, dans le taux de pénétration largement supérieur à celui des forets hélicoïdaux conventionnels, soit de 5 à 10 fois plus élevé ainsi que dans la possibilité d'attaquer des matériaux plus durs (Valentino, 2000). Autres points intéressants à noter, ces forets ne nécessitent pas de centrage préalable et leur bonne évacuation des copeaux leur permet d'utiliser un mode de perçage standard en toutes circonstances.



Figure 4.3 Foret hélicoïdal à pastilles de carbure.
Catalogue en ligne Kennametal (<http://www.kennametal.com>)

Centrage

Comme mentionné plus haut, il est nécessaire d'effectuer un centrage avant d'utiliser un foret hélicoïdal. Ce centrage peut être fait avec un foret à centrer ou un foret à pointer. Souvent, la profondeur de perçage est déterminée de façon à obtenir un chanfrein résiduel une fois le perçage effectué.



Figure 4.4 Outil à pointer/chanfreiner.
Catalogue en ligne Nine9 NC Spot Drill (<http://www.jic-tools.com.tw/>)

Alésoir

Lorsque la précision d'un trou est élevée et que le fini de surface est important, il est commun de faire la finition en utilisant un alésoir, après avoir effectué une ébauche préalable. Typiquement, une qualité H7 est atteignable dans de bonnes conditions. Dépendamment de la méthode d'ébauche, la surépaisseur d'usinage avant la finition varie, diminuant avec l'augmentation de la qualité de l'ébauche et selon la dimension du trou. Le tableau suivant présente les recommandations d'un manufacturier d'alésoirs (Dormer, 2006).

Tableau 4.1 Surépaisseur recommandée
 avant l'alésage

Dimension du trou alésé (po)	Surépaisseur
Sous 3/16	0.004
3/16 à 1/2	0.008
1/2 à 1-1/2	0.010
1-1/2 à 2	0.016

Les alésoirs comportant des flûtes droites ou hélicoïdales avec la coupe à droite sont utilisés de préférence pour les trous borgnes, tandis que ceux avec des flûtes hélicoïdales avec la coupe à gauche sont choisis pour les trous débouchants de façon à favoriser la poussée des copeaux dans la direction de l'alésage. Des alésoirs réglables permettent également d'obtenir un trou dont la dimension est ajustable de part et d'autre de la cote nominale (environ 0.015 po) de l'alésoir (Krar et al., 1980).

Barre à aléser

Lorsque la précision de l'alésoir est insuffisante, l'utilisation de la barre à aléser peut être nécessaire. Différents mécanismes ou mandrins permettent d'ajuster la dimension du trou, que ce soit une barre d'alésage monobloc ou un mandrin alésoir micrométrique.

Taraud

Une opération de filetage peut être effectuée par deux types d'outils : le taraud et la fraise pour filets. Le taraud conventionnel nécessite qu'une ébauche soit réalisée avant le filetage. On distingue quatre variantes principales pour le taraud (Dormer, 2006).

Tableau 4.2 Différents types de tarauds

Description	Représentation
le taraud à flûtes droites est communément utilisé avec la plupart des matériaux à copeaux courts (acier et fonte);	
le taraud à entrées hélicoïdales (<i>spiral point</i>) est recommandé pour les trous débouchants puisqu'il pousse les copeaux vers l'avant. Ses flûtes peu profondes lui donnent une rigidité intéressante;	
le taraud à flûtes hélicoïdales (<i>spiral flute</i>) est recommandé pour les trous borgnes puisqu'il dirige les copeaux vers l'embouchure du trou;	
le taraud travaillant par refoulement forme le filet par déformation plastique. Il ne produit pas de copeau et il est destiné aux matériaux possédant une bonne formabilité (résistance ultime de 1200 MPa et facteur d'élongation > 10%). Le diamètre de l'avant-trou est différent des autres tarauds.	

Source : Les figures et les descriptions du tableau ont été tirées de la documentation technique de Dormer, pages 66-67.

La fraise à fileter permet de procéder au filetage interne et externe, mais sa vitesse d'exécution est inférieure au taraud. Pour cette raison ainsi qu'à son encombrement, la fraise à fileter est principalement dédiée aux trous de grand diamètre. Elle comporte toutefois de nombreux avantages (Dormer, 2006) :

- Précision accrue;
- Filetage jusqu'au fond du trou ou à l'épaulement;
- Durée de vie prolongée;
- Adaptation à la majorité des matériaux;
- Utilisation du même outil pour différents diamètres de même pas, ainsi que pour des filetages à droite ou à gauche;
- Positionnement angulaire de l'entrée du filetage.

Bref, une multitude d'outils sont disponibles pour générer une panoplie de formes destinées à des applications bien spécifiques. Parmi ceux-ci se trouvent les fraises à chanfreiner et à chambrer. Toutefois, des outils comme la fraise à chambrer perdent de leur intérêt avec des MOCN, leur utilisation étant plus justifiée sur des machines conventionnelles. D'autres outils trouvent une application dédiée à un besoin particulier. Par exemple, une machine utilisant une plaque de montage pourra être équipée d'un outil avec une vocation spécifique dédiée au centrage, au perçage et au filetage des trous de fixation.

De plus, puisque les pièces aéronautiques comportent souvent des avant-trous (*pilot hole*) destinés à l'assemblage, il peut être avantageux de doter le magasin d'outil d'un dispositif de perçage coudé, le foret étant mis en rotation en utilisant la pression du liquide de lubrification. Celui-ci permettra d'obtenir un degré de liberté additionnel améliorant l'accessibilité à certaines entités.

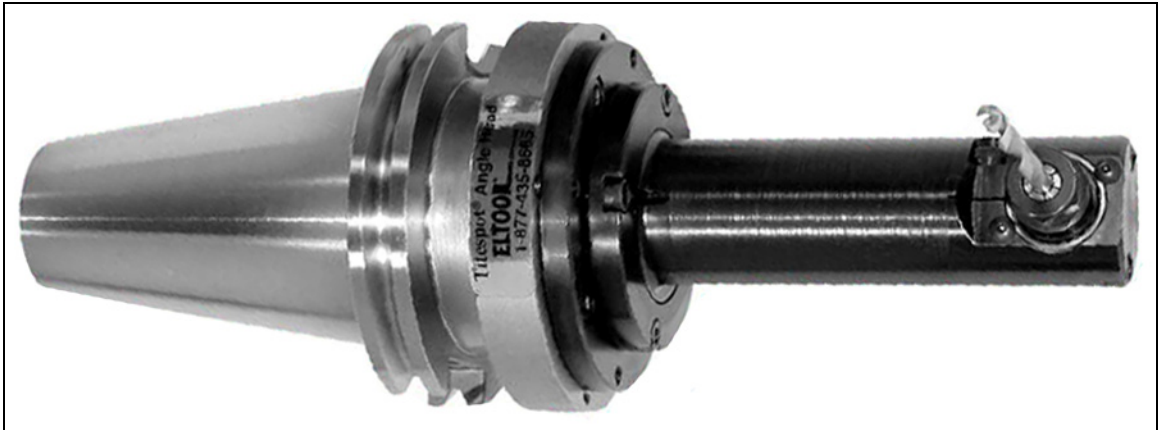


Figure 4.5 Dispositif de perçage coudé.
(Eltool-Corporation, 2007)

Parmi les caractéristiques associées aux outils axiaux utilisés sur une machine-outil, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le type d'outil;
- La longueur totale de l'outil;
- La longueur de coupe de l'outil;
- Le diamètre de coupe de l'outil;
- Le ratio longueur/diamètre;
- La qualité atteignable;
- L'angle de pointe;
- Le mode d'arrosage;
- Le matériau de l'outil;
- Le matériau recommandé;
- La surépaisseur recommandée pour la finition;
- Le type de flûtes;
- Le nombre de flûtes;
- Le diamètre et profondeur de préperçage;
- Le type de filet;
- Le poids de l'outil.

4.1.2.2 Outils radiaux

Contrairement aux outils associés à un trou, ceux associés à une opération de fraisage sont conçus pour être utilisés selon un déplacement radial. Dans certains cas, ils peuvent également fonctionner selon une direction axiale.

Fraise en bout

Assurément l'outil le plus couramment utilisé, la fraise en bout est disponible selon plusieurs configurations : la fraise cylindrique, la fraise torique et la fraise hémisphérique (voir figure 4.6). Dans le secteur aéronautique, la fraise torique remplace la fraise cylindrique dans toutes les applications. La principale raison de ce choix réside dans le risque d'amorce de fissures résultant du passage de la fraise cylindrique dans la matière, celle-ci générant une arête vive qui est une source de concentration de contrainte. La fraise torique avec son rayon de coin permet de prévenir cette situation, en plus de réduire l'usure. On l'utilise abondamment pour les opérations d'ébauche, de contournage ou d'usinage de poche. Évidemment, les fraises en bout sont offertes avec une variété de configurations impressionnante, que ce soit au niveau du diamètre, du rayon de coin, du nombre de flûtes, du matériau, de la longueur, du revêtement, etc.

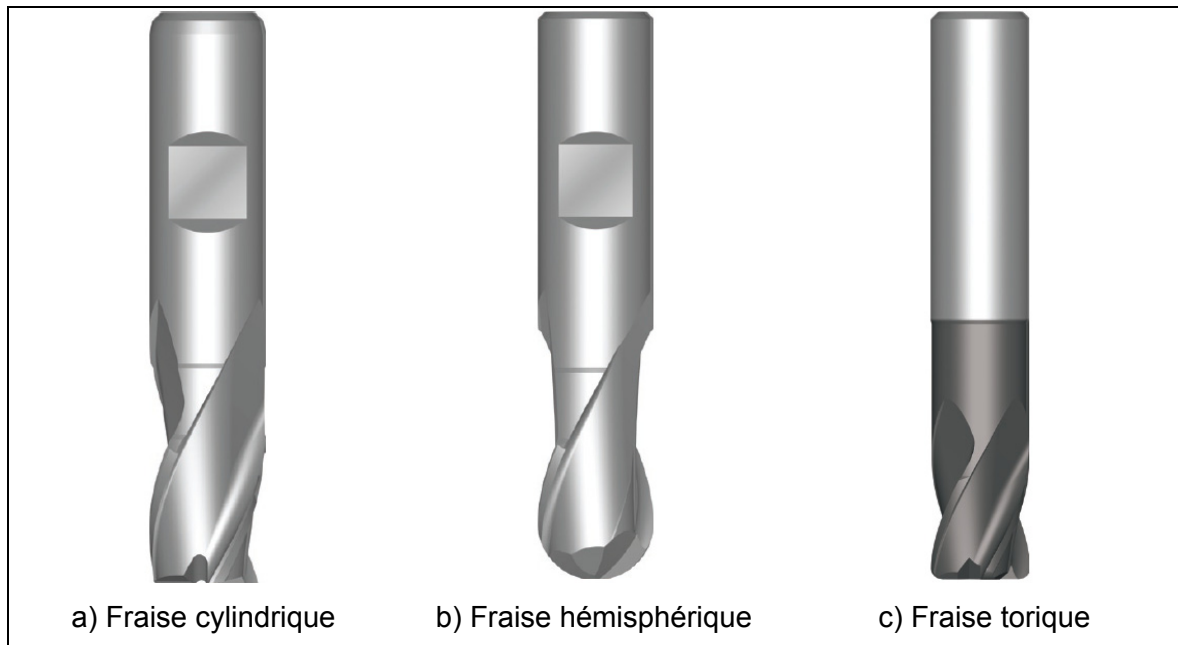
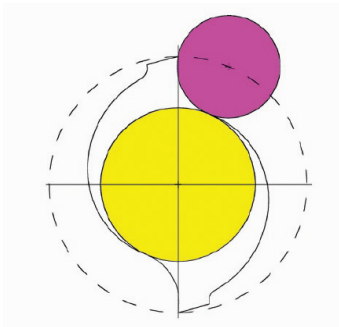
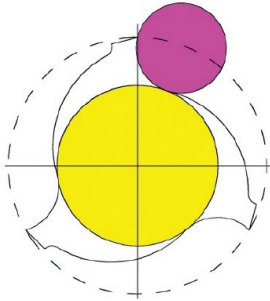
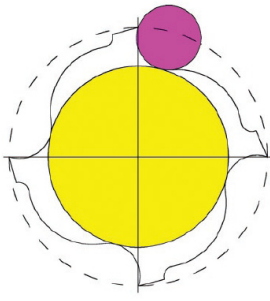


Figure 4.6 Différents types de fraises.
(Dormer, 2006)

Source : Cette figure a été tirée de la documentation technique de Dormer, page 98.

Pour l'usinage de l'aluminium, on retrouve fréquemment des fraises à trois flûtes, celles-ci permettant un bon compromis entre rigidité et évacuation des copeaux. Le matériau est généralement le carbure pour maximiser la rigidité. Toujours pour minimiser la déflexion, une longueur minimale est choisie, en s'assurant qu'il n'y aura pas d'interférence. La longueur de la partie tranchante sera également minimisée, de manière à bénéficier d'une tige rigide. Cette même tige comporte aussi en général un diamètre réduit pour éviter qu'elle n'entre en contact avec une paroi lors d'un profilage.

Tableau 4.3 Comparaison des fraises selon le nombre de flûtes
(Dormer, 2006)

	2 flûtes	3 flûtes	4 flûtes ou plus
			
Résistance en flexion	Faible		Élevée
Espace copeau	Élevée		Faible
	▪ Large espace copeau ▪ Évacuation de copeau facile ▪ Faible rigidité ▪ Faible qualité du fini de surface ▪ Recommandé pour l'usinage de rainures	▪ Espace copeau comparable à une fraise 2 flûtes ▪ Rigidité supérieure à une fraise 2 flûtes ▪ Fini de surface amélioré	▪ Rigidité supérieure ▪ Faible espace copeau ▪ Fini de surface supérieur ▪ Recommandé pour l'usinage en flanc

Source : Ce tableau a été tiré de la documentation technique de Dormer, page 100.

Fraise à surfacer

La fraise à surfacer est utilisée pour usiner les surfaces planes de grande superficie qui sont bornées par des arêtes ouvertes permettant un dépassement de la surface. Elle est conçue pour usiner en bout, ce qui en fait une sous-catégorie des fraises en bout. Elle est en général disponible selon une configuration à 90° ou à 45°, cette dernière favorisant une entrée en matière graduelle et réduisant l'épaisseur du copeau.

Fraise conique

La fraise conique est une variante de la fraise en bout. Elle permet l'usinage des parois faiblement inclinées, son utilisation étant favorable lorsque la cinématique de la machine ne permet pas l'accessibilité des éléments à usiner.

Parmi les caractéristiques associées aux outils radiaux utilisés sur une machine-outil, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le type de l'outil;
- Le diamètre de coupe;
- Le diamètre de la tige;
- Le rayon de coin;
- Le nombre de flûtes;
- Le matériau de l'outil;
- Le matériau recommandé;
- Le longueur tranchante;
- La longueur totale;
- Le revêtement;
- L'angle de flûte.

4.1.2.3 Porte-outils

Le porte-outil peut être défini comme étant « Un dispositif qui agit comme une interface interchangeable entre la broche d'une machine-outil et un outil de coupe de façon à ce que l'efficacité de chacun des éléments ne soit pas diminuée ». Il doit alors présenter les caractéristiques suivantes : concentricité, force de serrage, constance et équilibrage (Dormer, 2006).

Le choix du porte-outil est généralement associé au type d'outil, à la performance de la machine et à la précision recherchée. Il peut également être choisi de façon à améliorer l'accessibilité ou pour réduire la longueur de l'outil. Par exemple, un porte-outil allongé

permettra d'atteindre une pièce située au centre d'un bloc de montage. La figure suivante illustre cette situation.

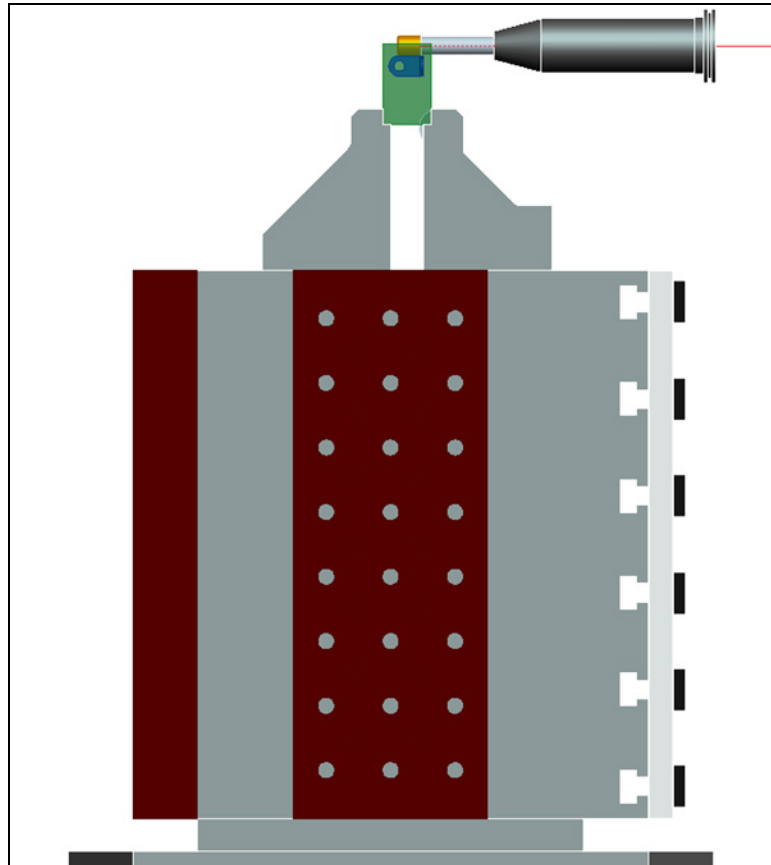


Figure 4.7 Porte-outil allongé favorisant le dégagement pour la broche.

Parmi les caractéristiques associées aux porte-outils utilisés sur une machine-outil, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le diamètre extérieur du porte-outil;
- Le diamètre de l'outils de coupe admissible;
- La longueur du porte-outil.

4.1.3 Montages d'usinage

Le montage d'usinage est un élément primordial permettant de maintenir la matière brute pendant la fabrication sur la MOCN. Il assure l'orientation et peut influencer grandement le résultat final. Selon le type de pièce, différents modes de fixation seront choisis. Évidemment, un volume de production élevé justifie l'investissement dans des montages spécialisés destinés à une application bien particulière. Toutefois, lorsque la série est petite, il est injustifié d'utiliser des montages adaptés. Des montages d'usinage universels sont alors privilégiés. Les éléments suivants présentent ceux rencontrés fréquemment en industrie aéronautique pour les pièces de fraisage, tandis que leur sélection est présentée à la section 6.1.3.2.

4.1.3.1 Étaux de fraisage (simple et multiple)

Assurément la méthode de fixation la plus répandue par sa simplicité, sa rapidité d'opération et sa versatilité, l'étau de fraisage est principalement utilisé pour usiner des pièces comportant un seul posage, permettant d'éviter un repositionnement délicat et laborieux. Pour pouvoir atteindre toutes les faces de la pièce, il est toutefois nécessaire de disposer d'un axe rotatif sur la MOCN.

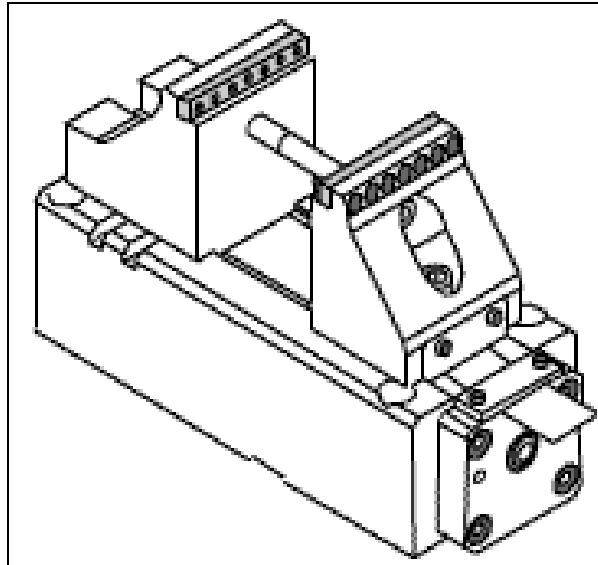


Figure 4.8 Étau de fraisage
<http://www.invert-a-bolt.com/>

Source : Cette figure a été tirée du site web de l'entreprise Invert-A-Bolt, consulté le 6 septembre 2007.

Selon la dimension relative de la pièce à usiner et de l'étau, il peut s'avérer essentiel de combiner plus d'un étau pour maintenir la pièce. Il est fortement déconseillé de laisser la pièce dépasser en porte-à-faux de l'étau, ceci pouvant provoquer des vibrations qui affecteront la qualité de la pièce. L'emprise de la pièce dans les mâchoires de l'étau doit assurer la stabilité de la pièce et garantir qu'elle restera immobile sous l'effet des efforts de coupe et des vibrations transmises. Des travaux de Deiab (Deiab & Elbestawi, 2004) approfondissent la variation du coefficient de friction selon la force appliquée, le fini de surface et le matériau de la pièce et du montage et la rigidité du montage. L'auteur soulève alors le fait que le coefficient de friction est inversement proportionnel à la force de serrage. Il existe alors une force de serrage optimale qui permettra de maximiser la fixation de la pièce tout en minimisant la déformation de cette dernière. Dans un souci d'économie de matière, il sera implicite de minimiser la profondeur d'emprise, puisque cette matière est une perte nette. Des parallèles de précision permettent de contrôler cette profondeur et d'assurer un appui additionnel. Certains étaux comportent également une surface destinée à cette application. D'autres possèdent aussi une butée axiale permettant de localiser la pièce totalement dans l'espace, accélérant le processus de mise en route. La géométrie

externe de la mâchoire est également importante, cette dernière pouvant représenter une source d'interférence avec l'outil ou le porte-outil.

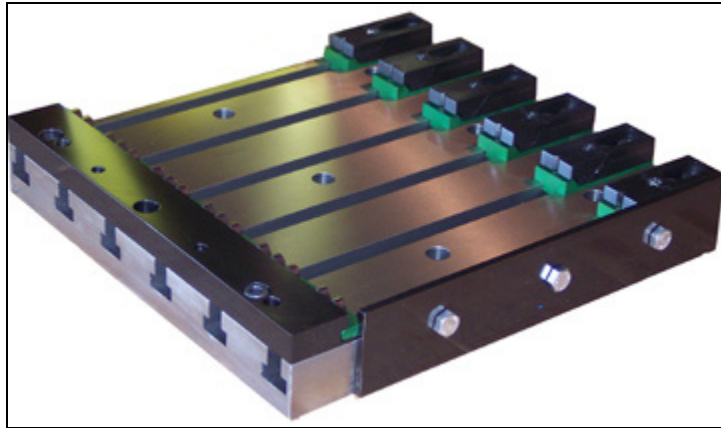
Il sera vu plus loin que l'étau est généralement utilisé pour les pièces présentant un ratio d'épaisseur faible. Les pièces de ratio d'épaisseur élevé, qui correspondent à des plaques minces, se prêtent mal à l'usinage en étau dû à leur prédisposition au flambage, à la vibration ou à la flexion selon l'orientation du montage. On préfère plutôt les monter sur une plaque, en les maintenant avec des brides ou des vis.

Parmi les caractéristiques associées aux montages d'usinage sur une machine-outil utilisant un étau de fraisage, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La largeur des mâchoires;
- La profondeur de l'emprise dans les mâchoires;
- L'épaisseur minimale recommandée de la pièce;
- Le ratio d'épaisseur maximum recommandé.

4.1.3.2 Crampons-plaqueurs

Ce montage est typiquement utilisé pour le premier posage des pièces nécessitant deux posages. Il consiste en un appui plan sur la face de plus grande superficie, d'un appui linéaire sur les butées et d'un appui ponctuel. À l'opposé des butées se trouvent des brides de serrage (crampons-plaqueurs ou *push-clamps*), permettant de diriger un effort combiné vertical et axial, soit respectivement vers l'appui plan et l'appui linéaire. La figure suivante illustre la configuration du montage.



**Figure 4.9 Table à rainures en T
et crampons-plaqueurs.**
<http://www.invert-a-bolt.com/>

Source : Cette figure a été tirée du site web de l'entreprise Invert-A-Bolt, consulté le 6 septembre 2007.

Parmi les caractéristiques associées aux montages d'usinage sur une machine-outil utilisant des crampons-plaqueurs, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La largeur maximale admissible;
- La longueur maximale admissible;
- L'épaisseur minimale et maximale admissible.

4.1.3.3 Plaque de montage

Une fois le premier posage usiné, le deuxième posage est accompli sur une plaque de montage comportant des trous précis disposés selon un quadrillage normalisé et des vis de fixation (*back-bolt*). La vis de fixation possède l'avantage d'exercer une force de serrage entre la matière brute et la plaque de montage en étant accessible par le dessus de la pièce tout en étant encastrée. Les entités de montage nécessaires au positionnement et à la fixation de la pièce sur la plaque doivent ainsi avoir été réalisées à un posage précédent. Des marques d'alignement (détrompeurs) sur la pièce permettent également d'assurer

l'orientation, éliminant les possibilités d'erreur et accélérant l'exécution du montage. La figure 4.10 de même que la figure 4.11 illustrent la configuration du montage.

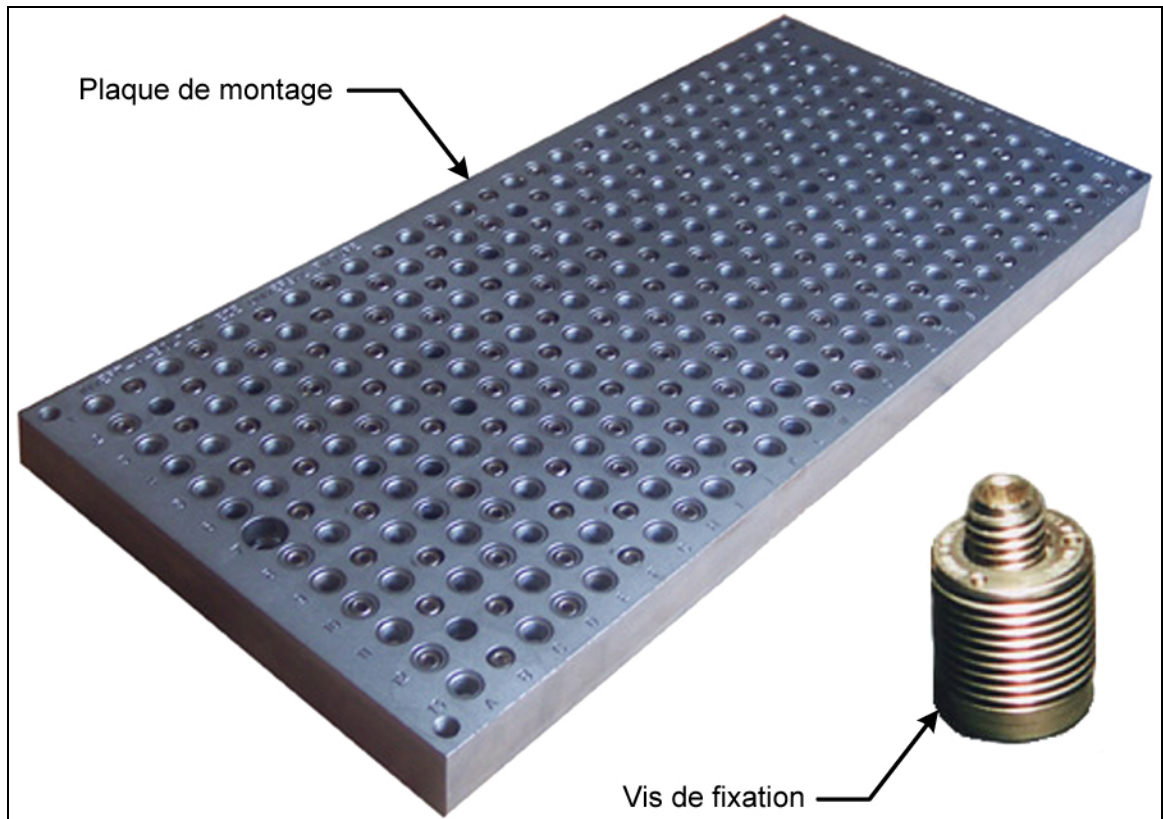


Figure 4.10 Plaque de montage.
<http://www.invert-a-bolt.com/>

Source : Les images de cette figure ont été tirées du site web de l'entreprise Invert-A-Bolt, consulté le 6 septembre 2007.

Pour maximiser la stabilité, un appui plan est réalisé sur la plus grande surface plane usinée du posage 1. La rigidité de l'ensemble pièce/montage est ainsi améliorée, réduisant les risques de vibration, notamment pour les cloisons minces. L'étude de la direction des efforts de coupe avec une fraise en bout torique (voir figure 4.12) démontre qu'il est pertinent de fournir un appui à un plancher mince, offrant une réaction aux efforts de coupe. Selon les circonstances, l'appui plan peut également reposer sur une surface de construction n'appartenant pas à la pièce, mais nécessaire pour une orientation adéquate.

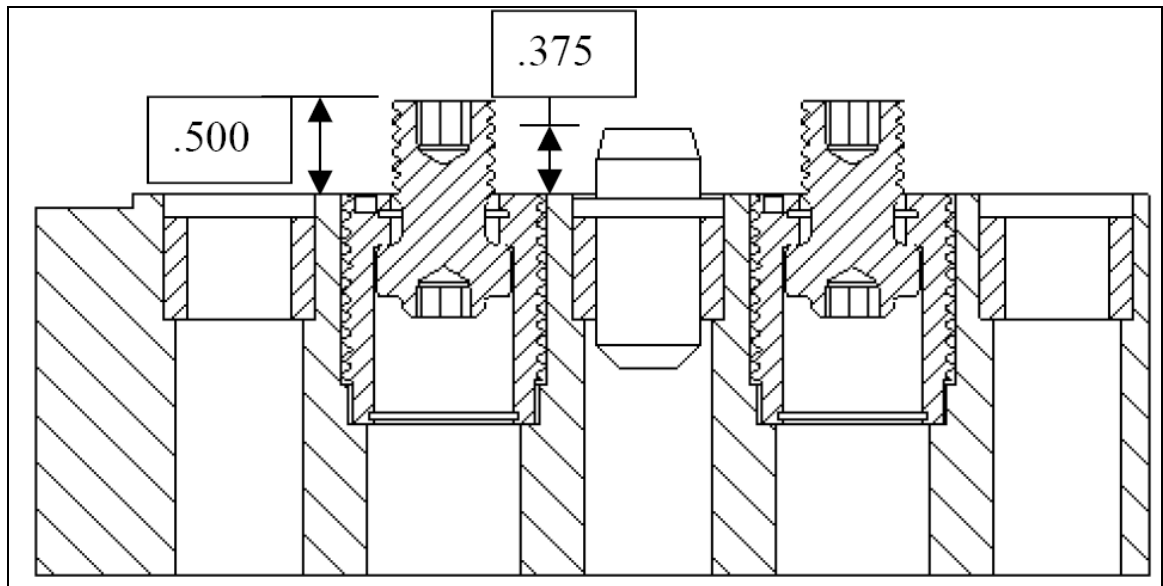


Figure 4.11 Vue de coupe d'une vis de fixation dans la plaque de montage.
(Bombardier-Aéronautique)

Source : Cette figure a été tirée de la documentation technique interne de Bombardier Aéronautique, UCU42, page 16.

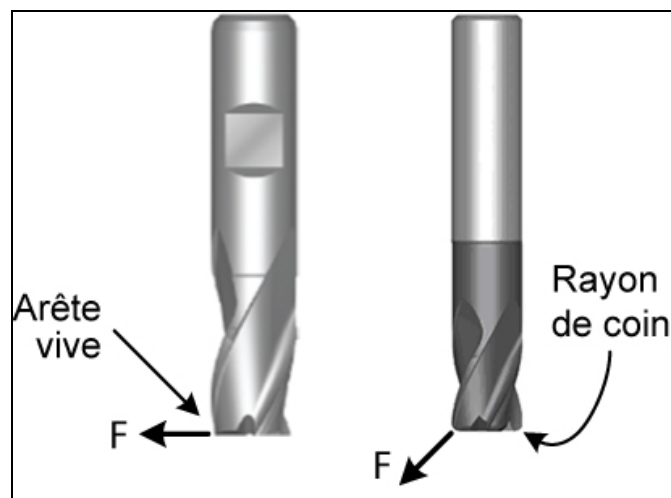


Figure 4.12 Direction des efforts de coupe.

Parmi les caractéristiques associées aux montages d'usinage sur une machine-outil utilisant une plaque de montage, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La longueur de la plaque de montage;
- La largeur de la plaque de montage;
- La position/espacement des trous de localisation;
- La position des trous de fixation;
- La hauteur des éléments de localisation et de fixation.

4.1.4 Matière brute

En général, la matière brute peut prendre une multitude de configurations, qu'elle soit obtenue par laminage, extrusion, moulage ou forgeage. La nature du matériau varie quant à elle selon l'application. En industrie aéronautique, le poids est un enjeu capital. Pour cette raison, l'aluminium est un matériau de choix pour les pièces monolithiques structurales.

4.1.4.1 Procédés de mise en forme

La matière d'œuvre des pièces aéronautiques est composée en grande majorité de plaques laminées faites d'aluminium allié. Le fait qu'elle soit laminée implique que l'intégrité du matériau n'est pas uniforme sur l'épaisseur. Pour cette raison, on s'assure d'enlever une couche de matière sur les faces de laminage. L'aluminium utilisé provient des séries 2000, 6000 et 7000.

Parmi les caractéristiques associées au procédé de mise en forme de la matière brute, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La nature de la mise en forme;
- Le type de matériau de la matière brute.

4.1.4.2 Dimensions

Puisque les plaques laminées sont de grandes dimensions, la matière d'œuvre est taillée aux dimensions nécessaires, l'épaisseur étant dictée par les standards disponibles auprès du fournisseur. La matière brute est coupée à la scie, avec une attention particulière portée à la direction du fibrage. En effet, certaines pièces comportent une indication reliée à la direction du laminage, cette dernière doit alors être respectée au moment de la coupe. Pour éviter toute possibilité de confusion au montage sur la machine, la longueur et la largeur de la matière brute ne doivent pas être égales afin de pouvoir déterminer sans confusion le sens du grain. Comme présenté en détail à la section 6.1.3.2, des requis de montage influencent les dimensions de la matière brute, que ce soit pour un usinage en un ou deux posages. Des considérations d'homogénéité de matière influencent également l'épaisseur choisie.

Parmi les caractéristiques associées aux dimensions de la matière brute, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La longueur de la matière brute;
- La largeur de la matière brute;
- L'épaisseur de la matière brute;
- La direction du laminage.

4.1.4.3 Niveau de précision de la coupe

Le niveau de précision de la coupe est important pour plusieurs raisons. D'abord, la coupe doit former un prisme rectangulaire, impliquant la perpendicularité entre chacune des faces adjacentes. Ceci est essentiel afin d'assurer une bonne stabilité de la pièce dans l'étau ou sur les butées et contre les brides de serrage. Les dimensions de la matière auront également une influence sur le parcours d'outil, en particulier sur les mouvements d'approche et les plongées à l'extérieur de la matière d'œuvre. Les distances de sécurité doivent alors refléter le niveau de précision de la coupe.

Pour le cas à l'étude, les bruts sont coupés à l'aide d'une scie radiale permettant d'obtenir une bonne qualité géométrique et dimensionnelle avec une tolérance maximale de 0,06 pouce.

Parmi les caractéristiques associées au niveau de précision de la coupe de la matière brute, le paramètre significatif suivant a été retenu. Celui-ci pourra être utilisé dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La tolérance de la coupe de la matière brute.

4.2 Synthèse des paramètres significatifs pour le choix des ressources d'usinage

Pour la fabrication par usinage d'une pièce aéronautique, plusieurs ressources sont nécessaires, comme présenté de façon détaillée à l'intérieur de cette section. Pour le cas à l'étude, une seule configuration de MOCN est analysée. Ce paramètre est alors fixé, tandis que le choix des outils, du montage d'usinage et de la matière brute est à déterminer. Cette sélection se fait tout de même à l'intérieur d'un ensemble restreint. Le tableau suivant résume les options quant au choix des ressources.

Tableau 4.4 Synthèse des ressources

Ressources
Machines-outils
Axes de la machine-outil
Nombre d'axes de la MOCN
Configuration des axes
Longueur des axes linéaires
Plage angulaire des axes rotatifs
Changements d'outils
Dimension du magasin d'outils
Temps de changement d'outil
Performances
Puissance de la broche
Couple de la broche
Vitesse de rotation de la broche
Vitesse de déplacement des axes (linéaires et rotatifs)
Précision de positionnement

Ressources
Charges admissibles
Charge admissible sur la table
Charge admissible sur la broche
Outils
Outils axiaux
Type d'outil
Longueur totale
Longueur de coupe
Diamètre de coupe
Ratio longueur/diamètre
Qualité atteignable
Angle de pointe
Mode d'arrosage
Matériau de l'outil
Matériau recommandé
Surépaisseur recommandée pour la finition
Type de flûtes
Nombre de flûtes
Diamètre et profondeur de préperçage
Type de filet
Poids
Outils radiaux
Type d'outil
Diamètre de coupe
Diamètre de tige
Rayon de coin
Nombre de flûtes
Matériau de l'outil
Matériau recommandé
Longueur tranchante
Longueur totale
Revêtement
Angle de flûte
Porte-outils
Diamètre extérieur du porte-outil
Diamètre de l'outil admissible
Longueur
Montages d'usinage
Étaux de fraisage
Largeur de machoire
Profondeur de l'emprise
Épaisseur minimale de la pièce
Ratio d'épaisseur maximum recommandé

Ressources
Crampons-plaqueurs
Largeur admissible
Longueur admissible
Épaisseur minimale/maximale admissible
Plaque de montage
Longueur de la plaque
Largeur de la plaque
Position de trous de localisation
Position des trous de fixation
Hauteur des éléments de localisation et de fixation
Matière brute
Procédé de mise en forme
Nature de la mise en forme
Matériau
Dimensions
Longueur
Largeur
Épaisseur
Direction du fibrage
Niveau de précision
Tolérance de la coupe

CHAPITRE 5

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES D'USINAGE

LA PIÈCE À USINER

Le chapitre précédent a permis de présenter la synthèse des ressources d'usinage utilisées lors de la création de la gamme d'usinage. Ces ressources sont mises en relation avec le modèle CAO de la pièce à usiner. La synthèse des informations pouvant être extraites sont présentées à l'intérieur du présent chapitre. Les paramètres significatifs utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage seront également mis en évidence.

5.1 Informations sur la pièce à usiner

Généralement, une fois la conception d'une pièce terminée et les validations obtenues, un mandat est transmis au département des méthodes aux fins de fabrication de la pièce. Ce mandat est accompagné d'une multitude d'informations sur les requis qui sont incluses dans le modèle CAO, dans les dessins de détails et dans divers documents accompagnant la demande. Comme l'objectif ici n'est pas de catégoriser l'éventail complet des pièces que l'on retrouve dans l'industrie de la fabrication par usinage, voyons d'abord les caractéristiques associées aux pièces du secteur de l'aéronautique.

5.1.1 Caractéristiques d'une pièce aéronautique structurale

Les pièces aéronautiques peuvent être divisées en deux catégories : les pièces monolithiques structurales (fuselage, longeron, lisse, raidisseur, raccord, etc.) et les pièces moteur (aubes de turbine, compresseur, pompe, carter, arbres, tuyère, etc) (Selvaraj, Thirumal, & Radhakrishnan, 2006). L'attention sera portée sur les pièces de la première catégorie. La géométrie de ces pièces fait qu'elles sont majoritairement usinées sur des centres d'usinage plutôt que sur des machines de tournage. Le matériau brut provient d'une barre ou d'une plaque d'aluminium allié, de dimensions très variables. Les dimensions de la table de la machine choisie et son enveloppe guideront la pièce admissible. La Makino A66 accepte les pièces de faibles dimensions, soit un encombrement maximum de 16 po x

10 po de côté sur les crampons-plaqueurs et d'une épaisseur variable selon la position de la pièce par rapport à l'enveloppe cylindrique, comme l'illustre la figure 5.1. De plus, les pièces usinées en 1 posage sont contraintes par l'ouverture maximale de l'étau de 3.5 po. Pour les pièces d'une épaisseur supérieure à 3.5 po, il est envisageable d'effectuer une préparation de la matière brute. Celle-ci étant maintenue par les crampons-plaqueurs, une coupe permet de diminuer localement l'épaisseur pour admettre l'emprise des mâchoires de l'étau.

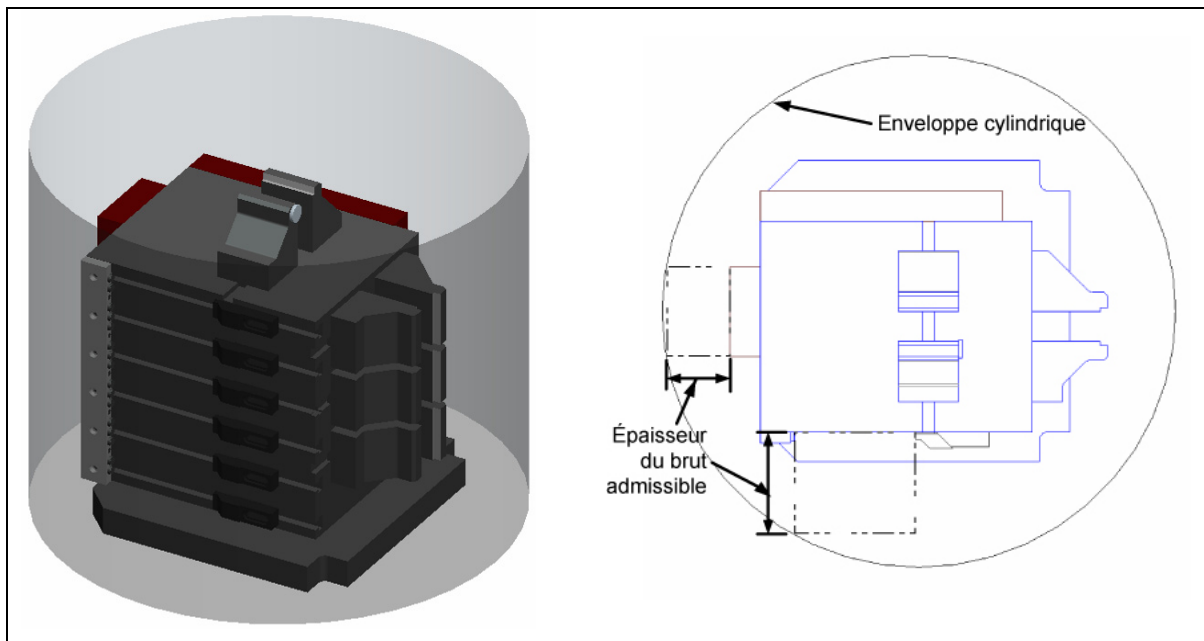


Figure 5.1 Enveloppe cylindrique de la Makino A66.

Les pièces présentant un rapport d'épaisseur faible (épaisseur/largeur) sont généralement constituées de poches ouvertes ou fermées, d'îlots, de languettes et de raidisseurs. Le schéma de la figure 5.2 présente les formes rencontrées et leurs terminologies.

Les surfaces de ces pièces sont généralement raccordées par des congés. Ceux-ci permettent de diminuer les concentrations de contraintes, contribuant fortement à diminuer les risques de fissures.

Outre les pièces comportant un rapport d'épaisseur faible comme celle ci-dessus, d'autres pièces de structure sont rencontrées. Des chapes ou des supports sont aussi usinés, ceux-

ci présentent habituellement un niveau de complexité plus faible. La figure 5.3 représente d'autres exemples de pièces rencontrées.

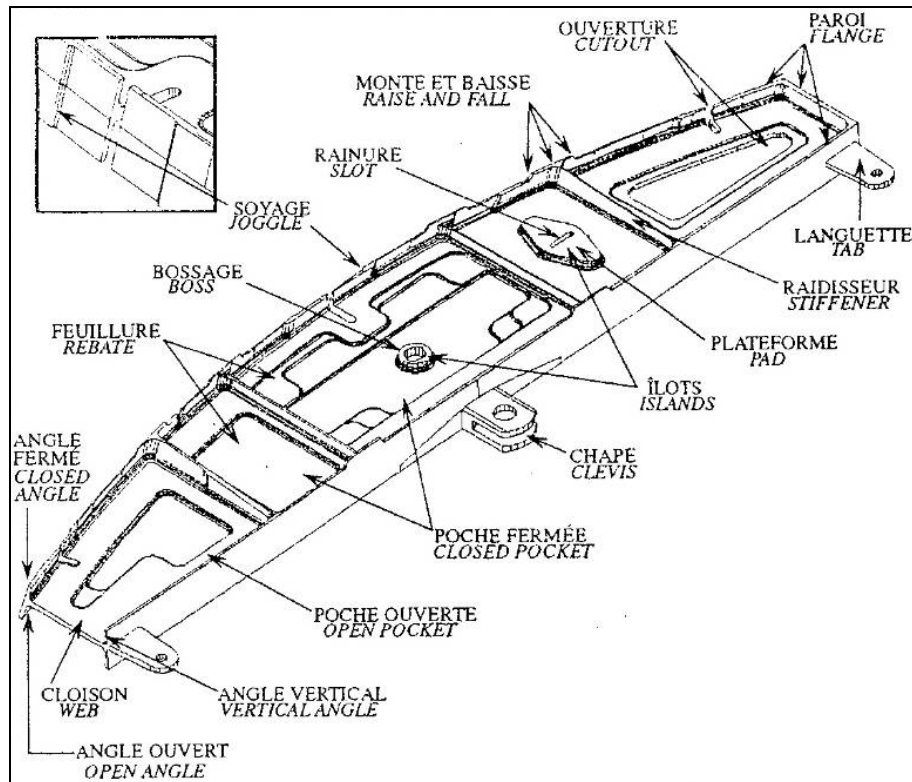


Figure 5.2 Nomenclature d'une pièce structurale aéronautique.
(Bombardier-Aéronautique)

Source : Cette figure a été tirée de la documentation technique interne de Bombardier Aéronautique.

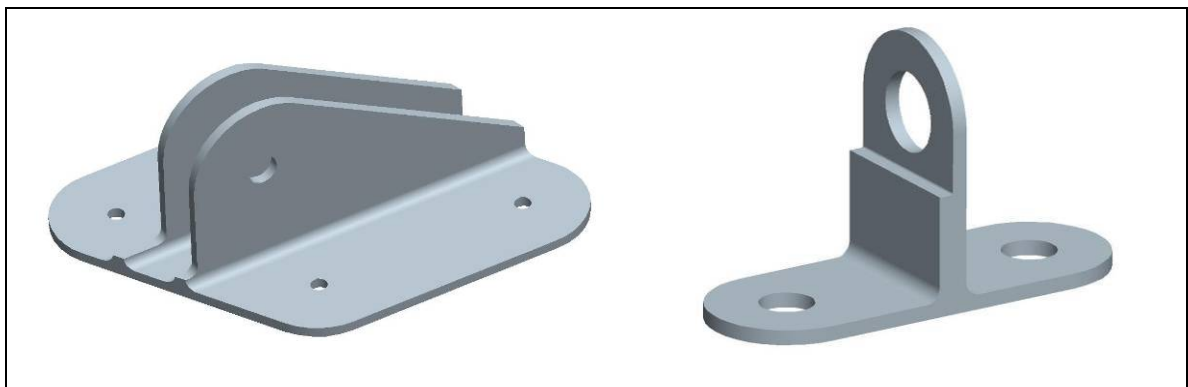


Figure 5.3 Pièces structurales simples.

La qualité dimensionnelle et géométrique des pièces est aussi relativement facile à atteindre. Les tolérances plus pointues se situent sur des géométries particulières et distinctes, comme des rainures et des alésages. Un aspect important et distinctif repose sur l'intégrité de la pièce au niveau notamment de l'aspect et des discontinuités. La mise en production des pièces se fait en lots très petits (environ 20 pièces par an) et ces lots sont récurrents d'année en année, la production pouvant s'échelonner sur près de cinquante ans pour certains avions. Les pièces aéronautiques de structure usinées en un ou deux posages représentent 90 % des montages utilisés (Derigent, 2005). Les points suivants résument l'information disponible permettant d'orienter la fabrication.

5.1.2 Modèle CAO

Un modèle électronique de la pièce à fabriquer est transmis au département des méthodes, contenant la forme de la pièce (les éléments géométriques). Les logiciels de modélisation actuels permettent, pour la plupart, d'inclure une multitude d'informations sur la pièce, allant bien au-delà de la forme et des dimensions. En effet, il est possible d'attribuer un matériau, des tolérances dimensionnelles et géométriques, des finis de surface et des caractéristiques technologiques comme un perçage ou un filetage.

5.1.2.1 Géométrie

Tout d'abord, le modèle CAO contient tous les éléments de construction de la pièce. Ceci inclut donc des sommets, arêtes, surfaces et volumes appartenant à la pièce qui pourront être utilisés lors de la reconnaissance des entités d'usinage et de la génération des opérations d'usinage. Certains logiciels permettent également d'associer des entités, dès l'étape de la conception, à des opérations d'usinage. En effet, outre les entités d'ajout ou d'enlèvement de matière, par projection, révolution ou autres, il existe des entités associées à des opérations technologiques comme des trous percés, des chambrage ou des filetages. Certaines applications permettent aussi la reconnaissance d'entités géométriques comme des poches, des contours, des trous ou des surfaces.

5.1.2.2 Dimensions

Évidemment, pour créer les éléments géométriques, des dimensions ont dû être associées. Ainsi, à chaque élément, une quantité minimale de dimensions est nécessaire afin de le contraindre dans l'espace. On obtient ainsi les dimensions de contrôle, en plus de dimensions complémentaires et redondantes, qui peuvent être déduites. Les dimensions sont transparentes dans le modèle CAO et peuvent également se retrouver de manière explicite dans le dessin de fabrication.

Ces dimensions ne sont pas indispensables à première vue, puisque l'association des surfaces à l'outil de coupe permettra d'obtenir la dimension désirée. Par exemple, lors de l'usinage de deux poches connexes, une paroi séparant les poches en résultera, sans qu'il soit nécessaire de connaître l'épaisseur de cette paroi. Toutefois, la connaissance de ces dimensions, et surtout des dimensions fonctionnelles, peut orienter les décisions prises, comme l'ordonnancement des opérations. Ces éléments sont donc utiles à l'analyse permettant d'améliorer la qualité de la pièce.

Parmi les caractéristiques associées aux dimensions du modèle CAO, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Les dimensions de construction du modèle CAO;
- Les dimensions complémentaires et redondantes;
- Les dimensions du dessin de fabrication.

5.1.2.3 Tolérances, rugosités et défauts

La seule connaissance de la dimension d'une entité n'est pas toujours suffisante afin de bien caractériser une pièce. En effet, la tolérance associée à une dimension fournit une information essentielle dictant le niveau de qualité de la pièce. Ce renseignement guidera le choix des paramètres de coupe et de la stratégie à privilégier pour l'usinage de l'entité. Ainsi, un trou de qualité H9 pourra être percé au foret sans nécessiter de finition supplémentaire. Toutefois, un trou de qualité H7 bénéficiera probablement d'une passe de

finition à l'alésoir ou du choix d'un foret de qualité supérieure permettant d'atteindre ce niveau de qualité.

Des tolérances géométriques orienteront aussi la stratégie de fabrication. En fait, ce sont généralement les éléments les plus contraignants, puisqu'ils impliquent généralement des niveaux de qualité plus élevés que les tolérances dimensionnelles. Les tolérances géométriques spécifient les surfaces de référence, selon la fonctionnalité de la pièce. Elles sont une bonne indication des références à utiliser pour les montages, et elles sont un incitatif évident à minimiser les changements de montages. Les surfaces ayant des liens entre elles seront donc usinées de préférence dans un même montage, afin d'éviter l'accumulation des erreurs.

Au même titre, la rugosité sera également un élément déterminant dans les choix guidant la fabrication. Un outil particulier ou une attention particulière à la finition pourra en résulter. Dans certains cas, la spécification de rugosité peut même dicter le choix du procédé ou de la direction d'usinage à adopter. Le tableau 5.1 permet de mettre en relation différents procédés d'usinage avec la qualité qui est atteignable.

Tableau 5.1 Plage de performance des procédés d'usinage
(Cordebois, 2003)

Techniques		Qualité des surfaces	État de surface Ra (µm)	Défauts de position			
Procédés	Outils			//	⊥	⊙	∠
Fraisage en bout	HSS	16 à 7	25 à 0,8	0,01 à	0,02	/	0,01
	Carbure	12 à 6	12 à 0,4	0,02			
Fraisage en roulant	HSS	16 à 9	25 à 3,2	0,01 à	0,02	/	0,01
	Carbure	12 à 8	12,5 à 0,8	0,02			
Tournage (ébauche)	HSS	16 à 10	3,2 à 0,8	0,04 à	0,04 à	0,04 à	0,04 à
	Carbure	12 à 8	1,6 à 0,2	0,05	0,05	0,05	0,05
Tournage (finition)	HSS	8 à 6	3,2 à 0,8	0,01 à	0,01 à	0,01 à	0,01 à
	Carbure	8 à 5	1,6 à 0,2	0,02	0,02	0,02	0,02
Perçage	Foret	16 à 9	6,3 à 0,8	0,2	0,1	0,1	0,1
Perçage	Foret aléseur	10 à 8	1,6 à 0,4	0,02	0,02	0,02	0,02
Perçage	Profond	10 à 8	3,2 à 0,4	0,02	0,02	0,02	0,02
Alésage à l'alésoir	HSS	10 à 7	3,2 à 0,4	0,01	0,01	0,01	0,01
Alésage à l'outil	HSS	10 à 7	0,8 à 0,2	0,005	0,01	0,01	0,01
	Carbure	10 à 6	1,6 à 0,2				

Techniques Procédés	Outils	Qualité des surfaces	État de surface Ra (μm)	Défauts de position			
				//	$\perp$	$\odot$	$\angle$
Rectification	Plane	8 à 01	25 à 0,4	0,0005	0,001	0,002	0,002
	Profonde	8 à 1	25 à 1,6	à			
	Cylindrique	8 à 1	16 à 0,1	0,001			

Source : Ce tableau a été tiré du livre de M. Cordebois, *Fabrication par usinage*, tableau 8.13.

Dans le cas particulier à l'étude, les tolérances dimensionnelles sont généralement larges, se situant autour de $\pm 0,010$ po à $\pm 0,005$ po selon le type de géométrie (paroi ou cloison). Peu de tolérances géométriques se retrouvent sur les dessins et les spécifications de rugosité sont très permissives, les tolérances générales étant de $125 \mu\text{po}$ (Ra). Pour les surfaces complexes (ou surfaces gauches), des tolérances de formes donnent des indications quant aux hauteurs de crêtes maximales admissibles, ce qui oriente les paramètres en usinage par balayage avec un outil à bout hémisphérique. L'usinage doit être fait de façon à ce que l'épaisseur de la surface soit supérieure à sa dimension nominale. Une surépaisseur de 0.001 po est alors laissée sur la surface (Bombardier-Aéronautique). La figure suivante illustre cette situation.

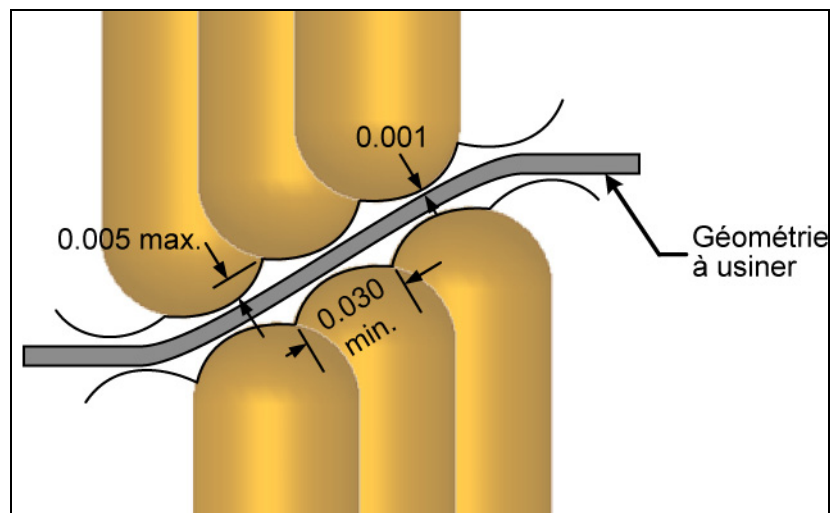


Figure 5.4 Tolérances admissibles de l'usinage par balayage.

Pour les raccordements ou les congés, la tolérance varie selon la dimension du rayon. En règle générale, les petits rayons admettent une tolérance contribuant à maintenir la

dimension au-dessus de la valeur nominale de façon à éviter les risques de concentration de contraintes. Le tableau 5.2 résume les tolérances acceptées.

Toutes pièces comportant une arête vive interne se verront attribuer un rayon de coin minimum de 0.010 po, toujours pour des considérations liées aux risques de fissures.

Tableau 5.2 Tolérances des rayons de raccordement

Rayon nominal (po)	Tolérance sur le rayon (po)
0.000-0.009	+0.010/-0.000
0.010-0.029	+0.020/-0.000
0.030-0.059	+0.030/-0.000
0.060-0.119	+0.030/-0.010
0.120-0.499	+0.030/-0.030
0.500 et plus	+0.030/-0.060

Lorsque des surfaces planes ou courbes sont usinées par une combinaison de plusieurs opérations d'usinage, une attention doit être portée afin de limiter le chevauchement (*mismatch*) des surfaces à une tolérance maximale de 0.005 po.

Selon le logiciel de modélisation, ces informations peuvent généralement toutes se retrouver dans le modèle CAO. Néanmoins, pour une meilleure visualisation et pour faciliter le contrôle de qualité, un dessin de fabrication est produit, incluant ces spécifications.

Parmi les caractéristiques associées aux tolérances, rugosités et défauts du modèle CAO, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Les surfaces de référence du dessin de fabrication;
- Les tolérances dimensionnelles et géométriques;
- Les tolérances générales du dessin de fabrication;
- Les tolérances spécifiques des parois;
- Les tolérances spécifiques des cloisons;
- Les tolérances de forme des surfaces balayées;
- Les tolérances des rayons de raccordement;
- Les tolérances des discontinuités;

- Les rugosités.

5.1.3 Matériau de la pièce

En usinage, une multitude de matériaux sont rencontrés. Pour les pièces aéronautiques, cet éventail diminue, des matériaux de plus grande qualité sont utilisés. Si on revient aux deux catégories de pièces mentionnées précédemment, on peut également les associer à des classes de matériaux. Ainsi, les pièces monolithiques structurales sont essentiellement composées d'aluminium allié, tandis que les pièces moteur sont plutôt faites d'acier allié, d'inconel ou de titane compte tenu de la nature des contraintes dont elles font l'objet.

Comme les pièces à l'étude sont du type structural, le matériau rencontré est l'aluminium allié. Les principales nuances utilisées et leurs spécifications sont présentées au Tableau 5.3, alors que l'acier et le titane sont inclus à titre comparatif.

Tableau 5.3 Propriétés des matériaux relatives à l'usinage

Nuances	Dureté Br.	Densité g/cc (lb/po ³)	Résistance à la rupture MPa (ksi)	Puissance spécifique kW/cm ³ /sec (HP/po ³ /min)
2024-T351	120	2.78 (0.1)	469 (68)	1.25 (0.46)
6061-T651	95	2.70 (0.1)	310 (45)	0.95 (0.35)
7050-T7451	140	2.83 (0.1)	524 (76)	-
7175-T7351	135	2.80 (0.1)	505 (73)	-
7475-T7351	135	2.81 (0.1)	496 (72)	-
AISI 4340 (Trempe et revenu)	277	7.85 (0.284)	958 (139)	4.09 (1.50)
Ti-6Al-4V (Grade 5)	334	4.43 (0.16)	950 (138)	3.00 (1.1)

Les caractéristiques de l'aluminium font qu'il y a une place à l'erreur dans le programme d'usinage. En effet, sa faible dureté et son usinabilité font en sorte d'accommoder les imperfections du parcours d'outil. À titre d'exemple, un mouvement en avance rapide sur une faible distance ne sera pas catastrophique, ni sur la pièce, ni sur l'outil de coupe, contrairement aux conséquences d'une telle manœuvre dans l'acier par exemple.

Parmi les caractéristiques associées au matériau du modèle CAO, le paramètre significatif suivant a été retenu. Celui-ci pourra être utilisé dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le type de matériau du modèle CAO.

5.1.4 Quantité de pièces à usiner et fréquence

Avant de procéder à la programmation d'une pièce, il est essentiel de connaître la quantité de pièces qui seront fabriquées. Cette information affectera fortement la stratégie d'usinage et l'attention qui y sera portée. Beaucoup d'efforts sont nécessaires afin d'optimiser de quelques secondes un programme d'usinage raisonnablement construit. Il faut alors justifier le retour sur l'investissement par l'économie de temps sur la MOCN. Les points suivants présentent différents scénarios rencontrés en industrie.

5.1.4.1 Pièce unitaire

Il est fréquent que le développement d'un produit passe par la réalisation d'un prototype. Ceci implique alors la fabrication d'une pièce unitaire qui sera ensuite mise à l'essai. Si les résultats sont concluants, la pièce pourra ensuite passer en production à plus grande échelle. Toutefois, il n'est pas rare que la conception nécessite quelques corrections qui requièrent une révision du programme d'usinage. Selon l'ampleur des changements, une révision complète peut être indispensable. Il est également fréquent que le procédé de fabrication soit revu pour s'adapter à un volume de production élevé. Ce peut être le cas d'une pièce qui utilise un brut moulé plutôt qu'une barre extrudée ou laminée, le niveau de production permettant de justifier l'investissement dans un outillage de moulage.

5.1.4.2 Moyenne ou grande série

Lorsque la quantité à fabriquer est connue, une estimation permet de déterminer la pertinence de l'optimisation du programme. Évidemment, plus la quantité est grande, plus il est intéressant de sauver du temps, ne serait-ce que quelques secondes. Pour cette raison,

il devient primordial de contrôler absolument tous les déplacements de l'outil, et d'éviter chaque mouvement inutile. Cette optimisation passe donc non seulement par un choix idéal des paramètres de coupe, mais aussi par une stratégie d'usinage irréprochable.

5.1.4.3 Symétrie

Sur les pièces aéronautiques, il est commun de rencontrer des pièces symétriques. Ceci accélère la programmation puisque le même programme peut être utilisé, suite à de légères modifications.

5.1.4.4 Pièces multiples

Une autre pratique courante permettant d'améliorer la productivité est l'usinage de pièces multiples. Cette façon de faire consiste à usiner une même pièce à plusieurs endroits sur la même matière brute, préférablement sur une plaque usinée en deux stages. Deux approches différentes permettent d'y arriver : effectuer une copie du programme d'usinage à un autre endroit sur la plaque ou bien faire un programme permettant l'usinage simultané de toutes les pièces en même temps. La deuxième option est la plus efficace puisqu'elle permet de diminuer les trajectoires inutiles, notamment les entrées en matière. La figure 5.5 illustre ces deux options.

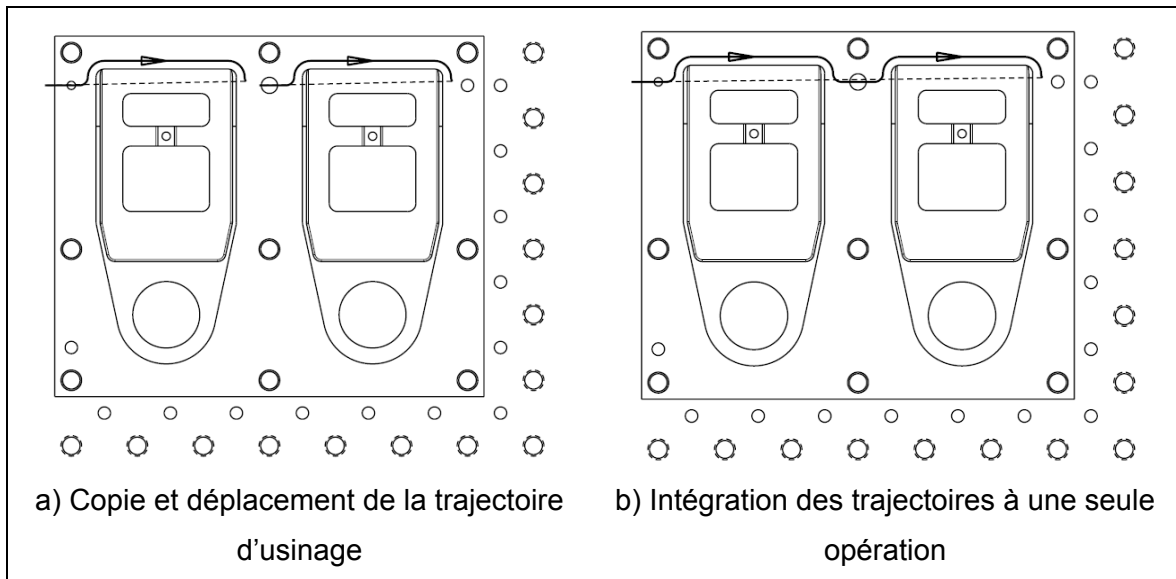


Figure 5.5 Comparaison des trajectoires d'usinage pour des pièces multiples.

On note qu'il est possible d'effectuer une combinaison de parcours entre les pièces et d'adapter la trajectoire aux extrémités de la matière brute. Le déplacement de la trajectoire peut comporter des problèmes à considérer, notamment au niveau des entrées en matière.

Évidemment, dans une optique de génération automatique de gamme d'usinage, le facteur associé au temps de programmation devient secondaire. La quantité de pièces à fabriquer perd ainsi de son importance. La stratégie d'usinage de pièces multiples garde quant à elle tout son sens. Par contre, dans un contexte de très petite série et de juste-à-temps, l'usinage de pièces multiples peut entraîner une difficulté de gestion d'inventaire en créant des surplus de fabrication.

Une fois l'information du modèle de la pièce obtenue, une multitude de décisions restent à prendre. Cette analyse est généralement réalisée par le gammiste, qui détermine les ressources qui seront utilisées, la stratégie d'usinage et l'ordonnancement des opérations. Avec les systèmes d'assistance à la génération de gammes, cette analyse pourra être accomplie plus rapidement, pourvu que l'information nécessaire soit accessible.

Parmi les caractéristiques associées à la quantité de pièces à usiner et à la fréquence de production, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le type de série de la pièce à usiner;
- L'existence d'une pièce symétrique;
- Le mode d'usinage de la pièce à usiner (simple ou multiple).

5.2 Synthèse des paramètres significatifs associés à la pièce à usiner

Le modèle CAO fournit une multitude d'information sur la pièce à usiner, de façon directe ou à la suite de l'enrichissement du modèle. Ces informations constituent les paramètres influents pour les décisions qui seront prises lors de la génération de la gamme. Le tableau suivant présente les informations recueillies.

Tableau 5.4 Synthèse des données sur la pièce à usiner

Données pertinentes sur la pièce à usiner	
Arêtes	
Enrichissement des arêtes	
Type d'arête	
Planaire	
Droite	
Circulaire	
Qualification de l'arête	
Fermée	
Ouverte	
Tangente-fermée	
Tangente-ouverte	
Prolongement	
Inflexion	
Rayon de courbure minimal extérieur matière de l'arête	
Longueur de l'arête	
Angle des faces adjacentes de l'arête	
Surfaces	
Enrichissement des surfaces	
Types de surface	
Surface plane	

Données pertinentes sur la pièce à usiner	
Surface réglée développable	
Surface balayée à rayon constant	
Surface conique	
Surface cylindrique	
Convexité / concavité	
Rayon de courbure minimal extérieur matière	
Nature de la face	
Ouverte	
Fermée	
Semi-ouverte	
Aire de la face	
Périmètre de la face	
Indicateur d'élément mince	
Indicateur de raccordement	
Indicateur d'accessibilité en bout	
Indicateur d'accessibilité en flanc	
Longueur maximale des génératrices	
Distance maximale de la face à la boîte englobante de la pièce selon les génératrices	
Axe du cylindre	
Rayon du cylindre	
Origine du cylindre	
Axe du cône	
Angle du cône	
Origine du cône	
Rayon de la surface balayée à rayon constant	
Normale au plan	
Distance maximale de la face au brut de la pièce selon la normale au plan	
Distance maximale/minimale entre arêtes délimitant la face	

Entités	
Entités d'usinage	
Type d'entité	
Plan en bout	
Plan en flanc	
Plan libre	
Profil	
Alésage	
Raccordement	
Masque	
Coin cinq axes	
Extrémité d'élancement	
Forme géométrique associée à l'entité	
Surfacique	
Volumique	

Données pertinentes sur la pièce à usiner	
État brut de l'entité et la gestion de ses états	
Brut	
Ébauché	
Semi-fini	
Fini	
Qualité technologique intrinsèque de l'entité	
Précision	
État de surface	
Paramètres de matériaux	
Matière	
Dureté	
Positionnement de l'entité dans la pièce (repère local)	
Interactions topologiques de l'entité avec les entités voisines	
Informations liées à son processus d'obtention	
Accessibilité	
Visibilité	
Dimensions	
Dimensions de construction modèle CAO	
Dimensions complémentaires et redondantes	
Dimensions du dessin de fabrication	
Tolérances, rugosité et défauts	
Surfaces de référence du dessin de fabrication	
Tolérances dimensionnelles et géométriques	
Tolérances générales du dessin de fabrication	
Tolérances spécifiques des parois	
Tolérances spécifiques des cloisons	
Tolérances de forme des surfaces balayées	
Tolérances des rayons de raccordement	
Tolérances des discontinuités	
Rugosité	
Quantité de pièces à usiner et fréquence	
Type de série de pièce	
Unitaire	
Petite série	
Grande série	
Symétrie	
Pièces multiples	

CHAPITRE 6

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES D'USINAGE **LA GÉNÉRATION DE LA GAMME**

Les deux chapitres précédents ont permis de recueillir les informations nécessaires à l'élaboration de la gamme d'usinage. Ces données sont ensuite mises en relation, traitées et analysées pour construire la gamme d'usinage. Le chapitre qui suit présente donc les différentes étapes de génération de la gamme d'usinage en incorporant différentes connaissances d'usinage spécifiques aux pièces aéronautiques structurales. Les paramètres significatifs permettant de construire la gamme d'usinage sont mis en évidence tout au long du chapitre.

6.1 Génération de la gamme d'usinage

La gamme d'usinage représente le squelette du programme d'usinage. La qualité de la pièce repose alors sur l'importance accordée à la structure de la gamme d'usinage. À la vue d'une pièce à usiner, une multitude de possibilités traversent l'esprit du gammiste. Certaines approches sont bonnes, d'autres le sont moins. D'un premier regard, il peut être difficile de mesurer la valeur de chacune d'elles. Les critères d'évaluation sont généralement une combinaison entre le temps d'usinage et la qualité du résultat. Le premier nécessite de construire le programme pour connaître le temps de fabrication, tandis que le deuxième nécessite l'usinage et le contrôle de la pièce afin de le quantifier. Pour ces raisons, la construction et l'évaluation d'une gamme d'usinage sont une tâche complexe qui requiert les connaissances et l'expérience d'un spécialiste des méthodes. Néanmoins, à travers toutes les options disponibles, une logique se démarque usuellement, donnant la direction à privilégier.

Les points suivants présentent le processus de génération de la gamme d'usinage, mettant en relation les objectifs, les ressources, les informations sur la pièce et le savoir-faire sur les méthodes de programmation et de fabrication.

6.1.1 Objectifs poursuivis lors de la génération de la gamme d'usinage

Avant d'entreprendre la programmation des parcours d'outils, les objectifs doivent être bien énoncés. Les choix s'offrant au gammiste et au programmeur seront ainsi guidés par les cibles finales.

6.1.1.1 Minimisation du temps d'usinage

Évidemment, la réduction du temps de fabrication est le but ultime visé par le gammiste. Une multitude de décisions auront un impact sur cet objectif. La stratégie employée jouera un rôle important, voire le rôle majeur.

Une autre approche est de maximiser le taux d'enlèvement de matière. Les facteurs influençant le taux d'enlèvement de matière sont : la profondeur de coupe radiale et axiale ainsi que l'avance de coupe. On tente de maximiser ces facteurs en considérant la machine-outil utilisée, le type de montage, la matière et la géométrie de la pièce.

En toute logique, il est avantageux d'enlever un minimum de matière du brut afin d'obtenir la pièce le plus rapidement. Le choix des opérations d'usinage est alors déterminant afin d'éviter la génération de surfaces inutiles (voir 6.1.4). Ces opérations doivent permettre un contrôle absolu des mouvements de l'outil afin de maximiser le temps où l'outil est dans la matière. Ceci nous dirige également vers la minimisation des changements d'outil, par un ordonnancement judicieux des opérations et par l'utilisation d'un minimum d'outils de coupe.

6.1.1.2 Atteinte de la qualité désirée

A priori, les efforts de fabrication sont orientés vers la réalisation d'une pièce de qualité répondant aux critères du dessin de définition. Toutefois, il est commun que des pratiques usuelles conduisent à une surqualité. Par exemple, une paroi usinée en contournage par une ébauche, une semi-finition suivie d'une finition, alors que des tolérances générales pour les dimensions et la rugosité sont exigées. Ces agissements peuvent avoir des

conséquences importantes sur le temps de fabrication. Il importe alors de doser le choix des opérations selon les requis du dessin.

6.1.1.3 Diminution des posages nécessaires

Un autre objectif poursuivi est la minimisation des posages d'usinage, permettant de limiter la dispersion dimensionnelle. Ceci représente un incitatif à choisir une machine-outil permettant un positionnement sur toutes les faces de la pièce. Pour les petites pièces structurales comportant un ratio largeur/épaisseur inférieur ou égal à 4, on choisira généralement un montage en étau. Selon la géométrie de la pièce, on choisira une machine comportant 4 ou 5 axes, allouant la fabrication quasi complète de la pièce en un seul posage. On privilégiera également l'utilisation de montages normalisés, diminuant les temps de mise en œuvre, les coûts d'outillage et minimisant les risques d'erreur.

6.1.2 Analyse de la géométrie

Une des premières étapes de la génération de la gamme d'usinage faites par le gammiste consiste à observer la géométrie de la pièce pour ensuite associer les surfaces à des opérations d'usinage. Dans le cadre de la génération automatique de gamme, la même démarche s'applique. On retrouve généralement trois modules distincts : le module de reconnaissance d'entités, le module de planification et le module de génération des parcours d'outil.

Tout d'abord, la géométrie de la pièce est enrichie par des caractéristiques lui permettant d'être associée à des entités d'usinage. Une analyse des directions d'accès d'usinage de l'entité permettra ensuite de déterminer les opérations nécessaires, la configuration du montage et l'ordonnancement des opérations. À ce titre, les travaux de Derigent (Derigent, 2005) dans le cadre du projet Usiquick présentent une analyse très intéressante de la géométrie d'une pièce aéronautique. Une synthèse est exposée dans cette section.

6.1.2.1 Types de géométrie et enrichissement

Premièrement, chaque surface est analysée et est associée à un type particulier. Cinq types sont dénombrés et catégorisés de façon à correspondre à des géométries fréquemment rencontrées en usinage :

- Plan;
- Surface réglée développable;
- Surface balayée à rayon constant;
- Cône;
- Cylindre.

Ces différents types de géométrie sont ensuite enrichis, en leur attribuant des caractéristiques qui permettront de procéder au choix des outils et des opérations d'usinage. Le tableau suivant résume les attributs associés aux types de géométrie :

Tableau 6.1 Caractérisation des surfaces géométriques
(Derigent, 2005)

Type de surface	Attributs
Commun à tous les types	▪ Le type de la surface ▪ Convexité / concavité ▪ Rayon de courbure minimal extérieur matière ▪ La nature de la face (O, F, SO) ▪ L'aire de la face, son périmètre ▪ Indicateur d'élément mince ▪ Indicateur de raccordement ▪ Indicateur d'accessibilité en bout ▪ Indicateur d'accessibilité en flanc
Surface réglée développable	▪ La longueur maximale des génératrices ▪ La distance maximale de la face à la boîte englobante de la pièce selon les génératrices
Cylindre	▪ Axe du cylindre ▪ Rayon du cylindre ▪ Origine du cylindre
Cône	▪ Axe du cône ▪ Angle du cône ▪ Origine du cône
Surface balayée à rayon constant	▪ Rayon de la surface balayée à rayon constant
Plan	▪ La normale au plan

Type de surface	Attributs
	- La distance maximale de la face au brut de la pièce selon la normale du plan - La distance maximale/minimale entre arêtes délimitant la face

Source : Ce tableau a été tiré de la thèse de M. Derigent, *Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques: Prototypage logiciel dans le cadre du projet USIQUICK*, tableau 3.4, p118.

Pour chacune des surfaces de la pièce, une étude des arêtes s'en suit. Ceci permet de déterminer le voisinage de la surface. Une catégorisation en six possibilités qualifie les arêtes telle qu'illustrée à la figure 6.1.

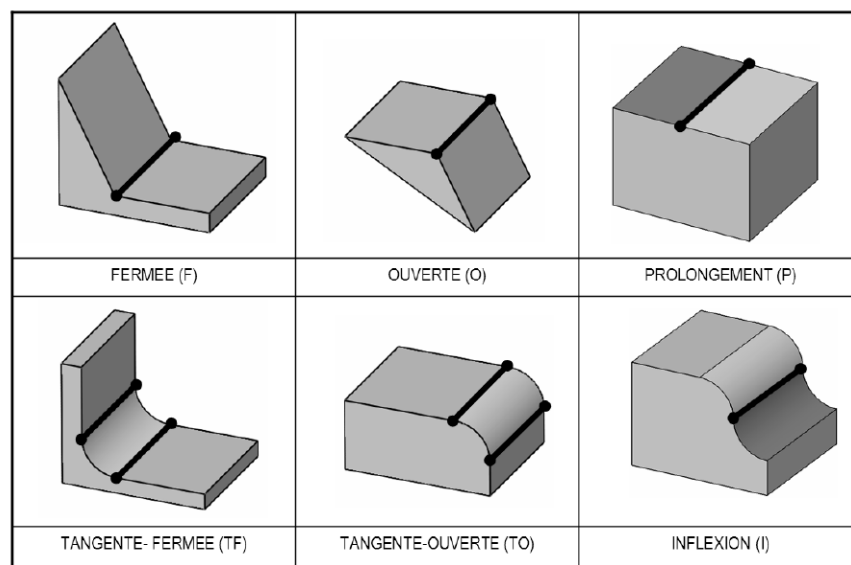


Figure 6.1 Caractérisation des arêtes.
(Derigent, 2005)

Source : Cette figure a été tirée de la thèse de M. Derigent, *Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques: Prototypage logiciel dans le cadre du projet USIQUICK*, figure 2.25, p90.

Ces caractéristiques sont très intéressantes puisqu'elles permettent de déterminer quelles entités peuvent être associées aux surfaces. Par exemple, une surface plane bornée uniquement par des arêtes fermées correspond au fond d'une poche. Elle ne peut donc pas être usinée en flanc, mais elle correspond très bien à un usinage en bout. À l'inverse, une surface réglée, bornée uniquement par des arêtes ouvertes, correspond quant à elle

parfaitement à une face d'un profil pouvant être usinée en flanc. Il est alors possible d'associer une surface à une ou plusieurs entités d'usinage, selon le cas.

D'autres attributs peuvent également être associés aux arêtes, comme son type (droite circulaire ou planaire), l'angle formé par ses faces adjacentes ou le rayon de courbure extérieur matière minimum.

Parmi les caractéristiques associées à la géométrie pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le type des arêtes de la géométrie;
- La qualification des arêtes de la géométrie;
- Le rayon de courbure minimal extérieur matière des arêtes de la géométrie;
- La longueur des arêtes de la géométrie;
- L'angle des faces adjacentes des arêtes de la géométrie;
- Le type des surfaces de la géométrie;
- La convexité/concavité des surfaces de la géométrie;
- Le rayon de courbure minimal extérieur matière des surfaces de la géométrie;
- La nature des surfaces de la géométrie;
- L'aire des surfaces de la géométrie;
- Le périmètre des surfaces de la géométrie;
- L'indicateur d'élément mince des surfaces de la géométrie;
- L'indicateur de raccordement des surfaces de la géométrie;
- L'indicateur d'accessibilité en bout des surfaces de la géométrie;
- L'indicateur d'accessibilité en flanc des surfaces de la géométrie;
- La longueur maximale des génératrices des surfaces de la géométrie;
- La distance maximale des surfaces de la géométrie à la boîte englobante de la pièce selon les génératrices;
- L'axe des cylindres de la géométrie;
- Le rayon des cylindres de la géométrie;
- L'origine des cylindres de la géométrie;
- L'axe des cônes de la géométrie;

- L'angle des cônes de la géométrie;
- L'origine des cônes de la géométrie;
- Le rayon des surfaces balayées à rayon constant de la géométrie;
- La normale aux surfaces planes;
- La distance maximale des surfaces planes par rapport au brut de la pièce selon la normale du plan;
- La distance maximale/minimale entre arêtes délimitant les surfaces de la géométrie.

6.1.2.2 Entités d'usinage

De nombreux travaux traitent de reconnaissance d'entités pour la fabrication par usinage (Capponi et al., 2006; McCormack & Ibrahim, 2002; Patil & Pande, 2002; Tseng & Joshi, 1994). Derigent (Derigent, 2005) propose également une synthèse intéressante de l'entité d'usinage, en présentant ses caractéristiques intrinsèques et extrinsèques ainsi que les différentes techniques de reconnaissance.

Caractéristiques intrinsèques

- Type d'entité (plan en bout, plan en flanc, plan libre, profil, alésage, raccordement, masque, coin cinq axes, extrémité d'élancement);
- Forme géométrique associée à l'entité (surfactive ou volumique);
- État brut de l'entité et la gestion de ses états (brut, ébauché, semi-fini, fini);
- Qualité technologique intrinsèque de l'entité (précision, état de surface, ...);
- Paramètres de matériaux (matière, dureté, traitements).

Caractéristiques extrinsèques

- Positionnement de l'entité dans la pièce (repère local);
- Interactions topologiques de l'entité avec les entités voisines;
- Informations liées à son processus d'obtention (accessibilité et visibilité).

Parmi les caractéristiques des entités d'usinage, les différents types d'entités méritent une élaboration plus détaillée :

- plan en bout : surface plane pouvant uniquement être usinée en bout;

- plan en flanc : surface plane pouvant uniquement être usinée en flanc;
- plan libre : surface plane pouvant être usinée en bout ou en flanc;
- profil : surface réglée non plane pouvant uniquement être usinée en flanc;
- alésage : surface cylindrique débouchante usinée selon son axe;
- raccordement : surface faisant la liaison entre deux faces adjacentes;
- masque : zone inaccessible en usinage en bout ou en flanc;
- coin cinq axes : raccordement de deux faces adjacentes non perpendiculaires à une surface de fond;
- extrémité d'élancement : surface supérieure d'une paroi mince.

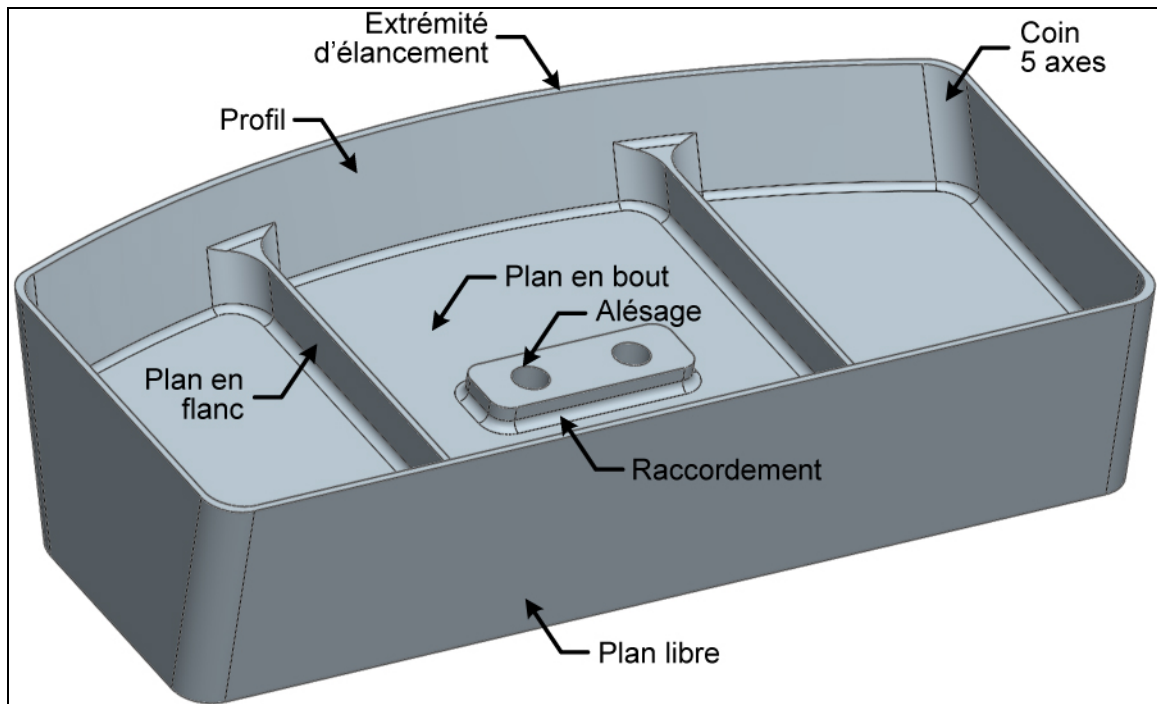


Figure 6.2 Représentation des entités d'usinage.

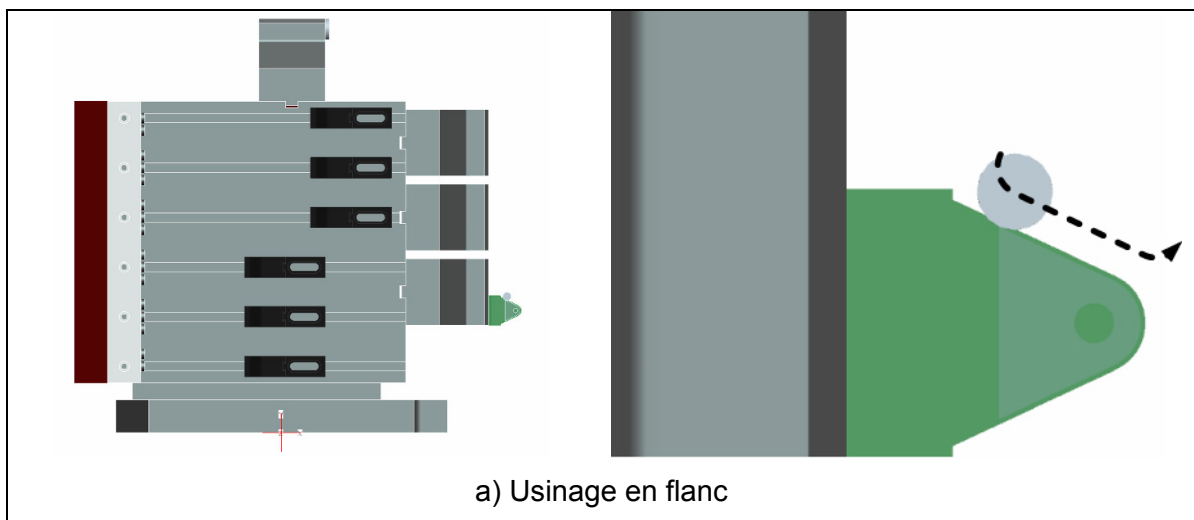
Parmi les caractéristiques associées aux entités d'usinage pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage :

- Le type associé à l'entité;
- La forme géométrique associée à l'entité;

- L'état brut de l'entité et la gestion de ses états;
- La qualité technologique intrinsèque de l'entité;
- Les paramètres du matériau de l'entité;
- Le positionnement de l'entité dans la pièce.

6.1.2.3 Directions d'accès

Une analyse des directions d'accès est primordiale afin de déterminer le choix de la MOCN. Nécessairement, ce choix se fera en relation avec le type de montage utilisé. Une étude judicieuse des directions d'accès permet de minimiser le nombre de montages nécessaires. Dans bien des cas, plusieurs directions d'accès correspondent à une seule entité d'usinage. Un cas simple correspond à un trou débouchant qui peut être percé d'un côté ou de l'autre. Au même titre, une surface plane peut être usinée avec une fraise en flanc, en bout ou même en balayage avec un outil à bout hémisphérique ou torique. La figure 6.3 illustre ces trois possibilités sur la même surface.



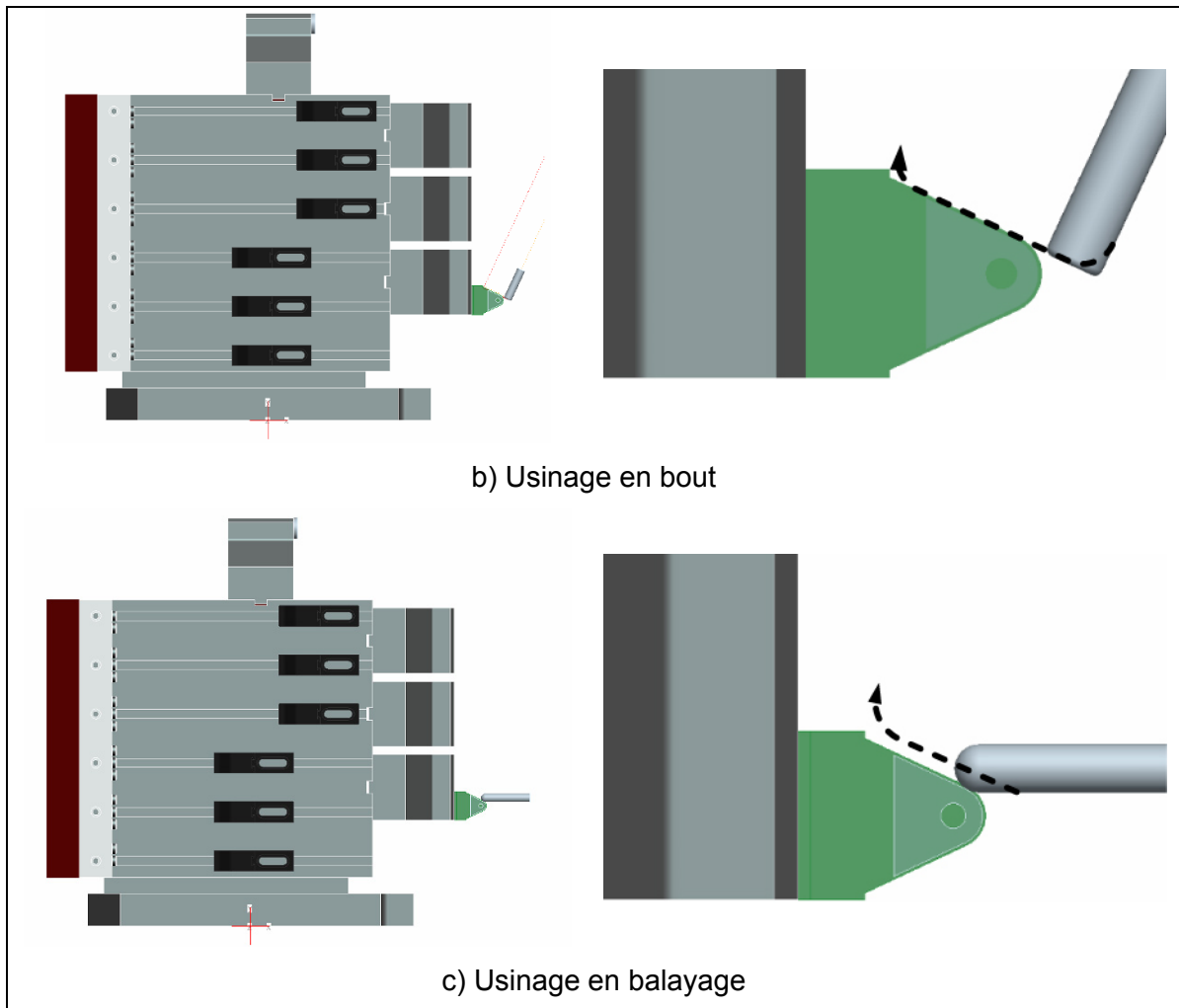


Figure 6.3 Représentation des modes d'usinage d'une surface plane.

De plus, les entités d'usinage peuvent correspondre à une interaction de plusieurs surfaces. Selon les caractéristiques des entités de raccordement, on peut ramener un problème comportant plusieurs possibilités à une seule (Sarma & Wright, 1996). Ainsi, une poche ouverte composée de trois surfaces perpendiculaires les unes par rapport aux autres pourrait à première vue être usinée selon trois directions différentes, correspondant aux normales de chacune des surfaces. Toutefois, la présence d'un rayon de raccordement entre deux surfaces contribuera à limiter les directions horizontales, privilégiant comme choix la direction verticale.

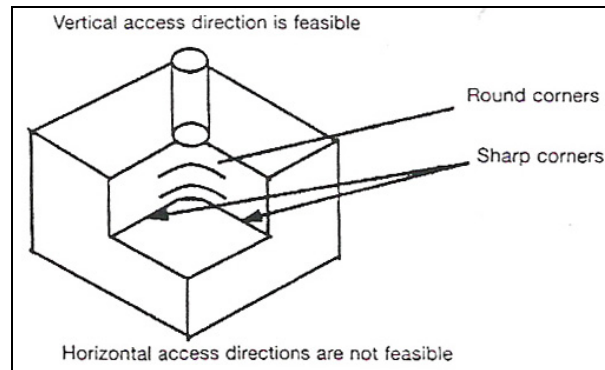


Figure 6.4 Détermination de la direction d'usinage.
(Sarma & Wright, 1996)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de M. Sarma, *Algorithms for the minimization of setups and tool changes in "simply fixturable" components in milling*, figure 1.

On peut facilement extrapoler cet exemple de Sarma & Wright à une géométrie plus représentative de celles retrouvées sur les pièces aéronautiques, en ajoutant un rayon de raccordement entre chaque surface. Le problème devient alors plus complexe et une analyse des rayons est nécessaire afin de déterminer la meilleure direction d'accès à l'entité. En général, il est préférable d'associer le plus grand rayon avec celui de l'outil, de façon à maximiser le taux d'enlèvement de matière, la rigidité de l'outil et la profondeur atteignable. Les autres rayons de raccordement sont alors associés au rayon de coin de l'outil. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'un gros rayon de coin réduit la profondeur de coupe radiale admissible. Cet élément doit être considéré lorsque le bout de l'outil est utilisé pour surfacer. Le chevauchement doit correspondre minimalement à la dimension du rayon de coin de l'outil de façon à éviter la création de crêtes.

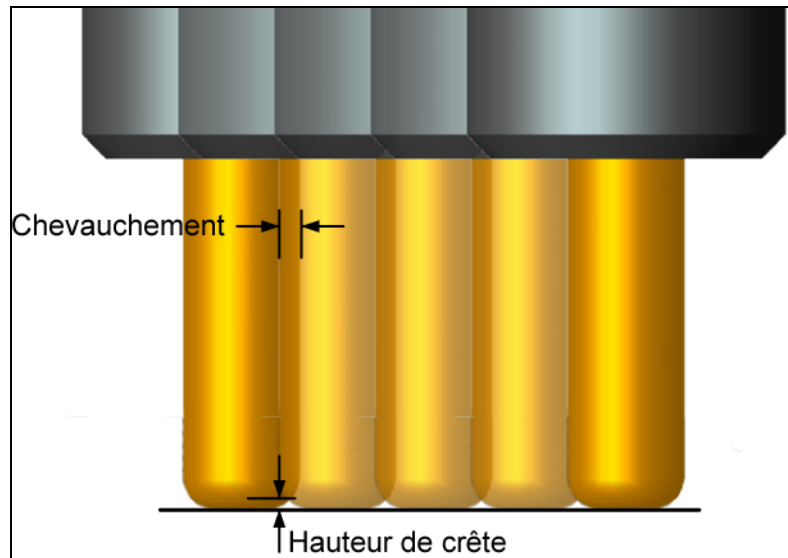
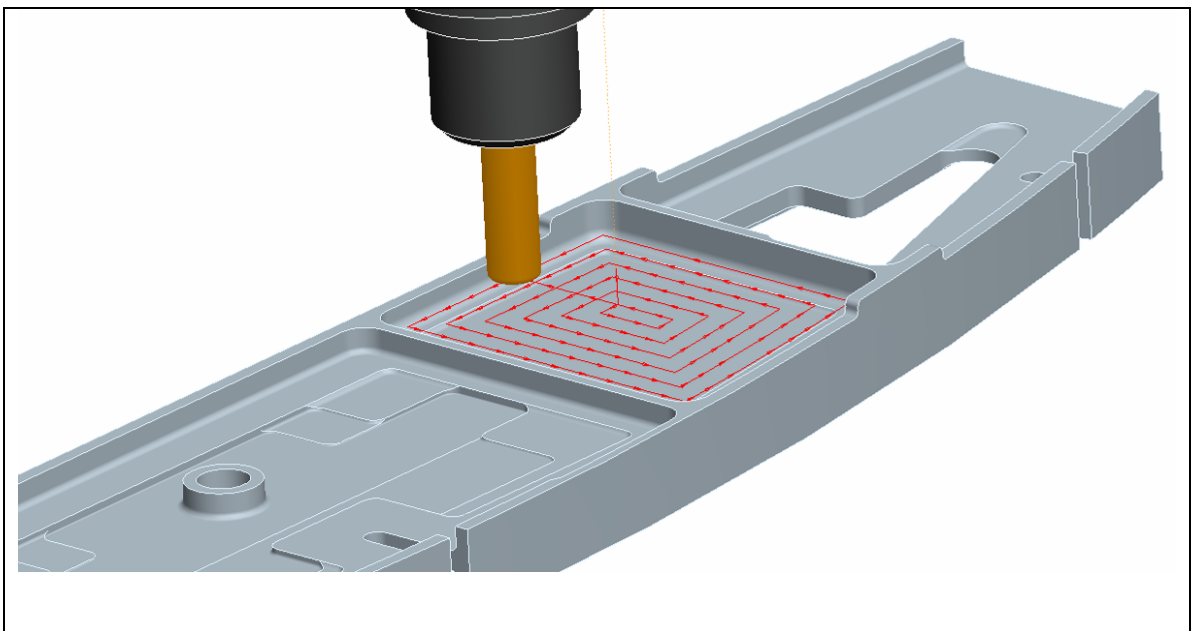


Figure 6.5 Relation entre le chevauchement et la hauteur de crête avec un outil torique.

Pour cette raison, le rayon de coin de l'outil est limité à une valeur maximale (environ 0,063 po pour un outil de 0,500 po de diamètre). Lorsque le rayon du raccordement est supérieur à cette valeur, une opération supplémentaire (usinage de forme) est nécessaire afin de procéder à la finition du rayon de raccordement. La figure 6.6 illustre cette situation pour une poche comportant un rayon de raccordement au fond de 0.125 po.



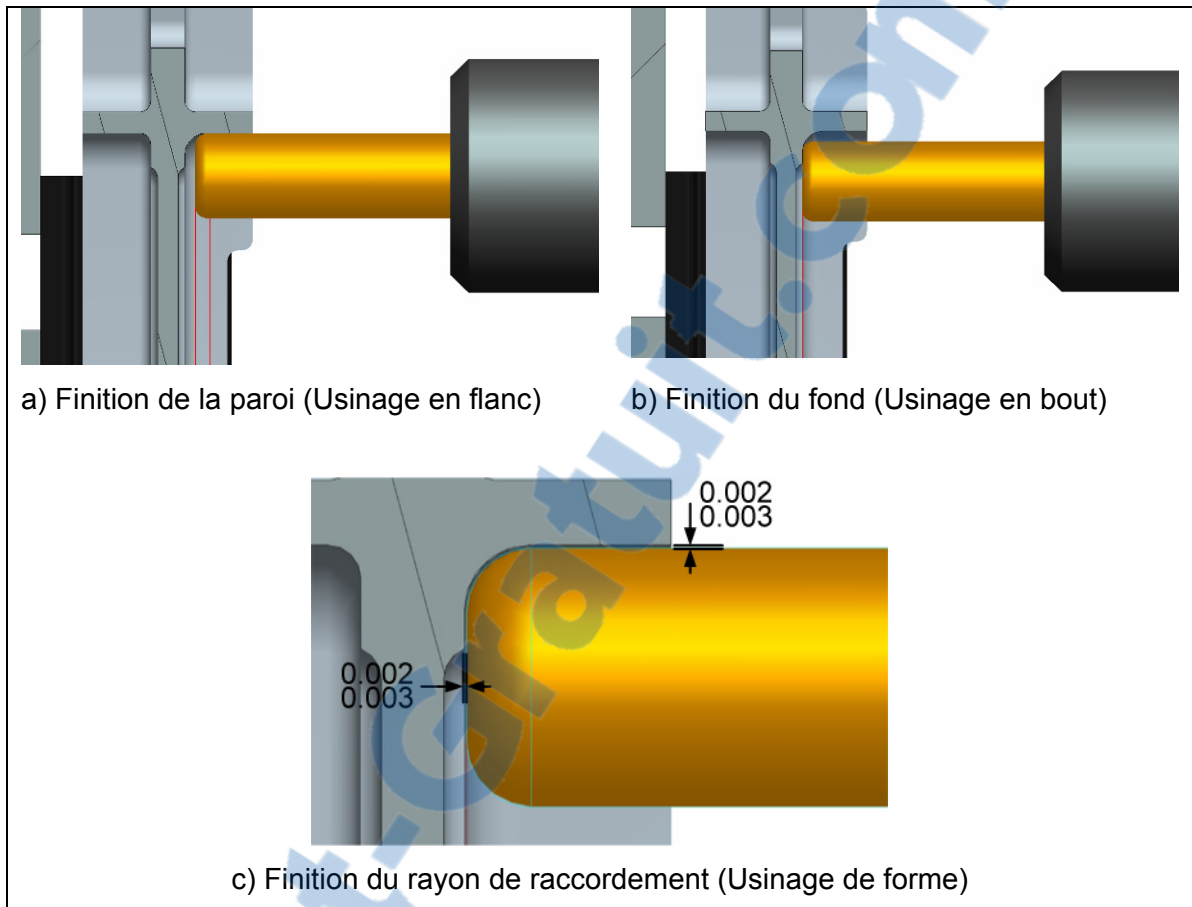


Figure 6.6 Étapes de finition d'une poche.

L'adjacence des différentes entités doit aussi être traitée. Par exemple, un trou lié à deux surfaces peut influencer l'ordre des opérations, notamment sur une paroi mince pour éviter la déflexion (voir figure 6.19).

Parmi les caractéristiques associées aux directions d'accès des entités d'usinage pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Les interactions topologiques de l'entité avec les entités voisines;
- Le vecteur d'accessibilité de l'entité.

6.1.2.4 Orientation de la matière brute

Une fois les entités d'usinage dénombrées, la planification de la gamme est effectuée. Celle-ci comporte également trois étapes : la définition de l'orientation de la matière brute par rapport à la pièce, la localisation de la matière brute sur le montage d'usinage et la stratégie pour gérer les difficultés d'usinage. La définition de l'orientation de la matière brute est définie par deux règles : la minimisation du volume du prisme enveloppe ou l'orientation de la face principale de la pièce parallèlement à une face principale de la matière brute.

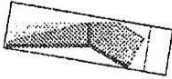
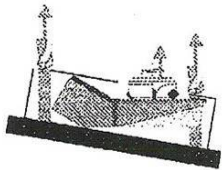
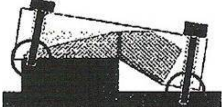
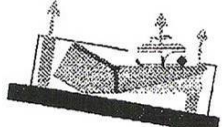
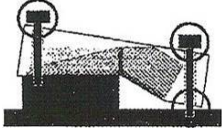
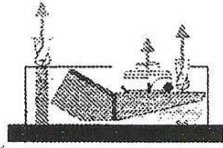
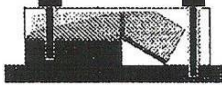
Blank definition criteria and clamping strategies	First set-up orientation: first machined plane; clamping and positioning holes	Second set-up orientation: clamping and positioning solutions	Solution assessment
Minimum raw material  Clamping and positioning holes perpendicular to first machined plane			Non-isostatic positioning
Minimum raw material  Clamping and positioning holes parallel to blank faces			Too small plane surface for positioning (< half main surface of prism)
Raw block parallel to first machined plane  Clamping and positioning holes perpendicular to first machined plane			Good fixture and positioning quality

Figure 6.7 Impact de la minimisation de la matière brute.
(Capponi et al., 2006)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de M. Capponi, Computer aided process planning, strategy, and models in the aircraft industry, tableau 2.

Les faces principales sont généralement déterminées par les surfaces de références ou par les surfaces planes de grande superficie. Le choix de la règle doit prendre en considération le type de montage qui sera utilisé. Ainsi, la minimisation du volume peut conduire à des

difficultés de positionnement au deuxième posage, comme exposé par Capponi (Capponi et al., 2006).

La localisation de la matière brute sur la MOCN est ensuite évaluée en comparant les directions d'accès des entités d'usinage à la sphère de visibilité (*visibility map*) de la MOCN. Ceci permettra par la même occasion de déterminer le nombre de montages nécessaires.

Parmi les caractéristiques associées à l'orientation de la matière brute pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- Le volume prismatique minimal de la boîte englobante de la pièce;
- L'aire des surfaces planes de la géométrie;
- La normale des surfaces planes de la géométrie;
- L'identification des surfaces de références.

6.1.3 Choix des ressources disponibles

Une fois les objectifs bien établis et la géométrie analysée, les premières décisions entrent en jeu. Une évaluation de la pièce à usiner permet d'établir les ressources nécessaires à sa fabrication. Le choix de la MOCN peut se faire relativement rapidement, par une analyse des dimensions d'encombrement, des directions d'accès des entités d'usinage et par la géométrie de ces dernières. Les dimensions et les géométries guideront aussi le choix des outils de coupe.

Cordebois (Cordebois, 2003) présente une démarche d'élaboration de gamme d'usinage en quatre étapes :

- Ordonnancement des processus (opération d'usinage et séquençement, choix des outils et des machines-outils);
- Organisation des processus (paramètres d'usinage et choix du montage);
- Vérification et étude de faisabilité (génération des trajectoires et simulation, calcul du temps et du coût);

- Génération de documents techniques et dossier de fabrication.

Toutefois, ces étapes peuvent varier selon la situation et les ressources disponibles. Par exemple pour le cas à l'étude, les choix de la machine-outil et du montage sont intimement liés, dans un souci de normalisation.

6.1.3.1 Machine-outil

Connaissant en premier lieu les ressources matérielles disponibles pour la fabrication, une étude détaillée de la pièce à usiner s'avère essentielle. Les dimensions d'encombrement de la pièce sont les premières informations utiles. Les machines comportant une course trop petite sur les axes sont éliminées, de même que les machines de course trop grande. Pour ce faire, une forme simple (la plus petite) enveloppant la pièce à usiner est comparée à la zone de travail de la machine. Cette zone correspond habituellement à un prisme rectangulaire pour une machine à 3 axes, à un cylindre pour une machine à 4 axes et une sphère pour une machine à 5 axes. La machine sélectionnée devra correspondre minimalement à une combinaison des différentes possibilités de positionnement.

Les cas d'exception où la pièce est déplacée dans un même montage pour pallier la trop faible dimension des axes de la machine sont écartés. L'impact de ce choix est critique puisqu'une multitude de décisions subséquentes en dépendront.

6.1.3.2 Configuration du montage

Conformément aux objectifs à atteindre, on tentera de minimiser les posages en plus d'utiliser les montages normalisés attitrés à la MOCN choisie. Ceci laisse alors présager que le choix de la machine-outil doit être fait en considérant le montage disponible sur le centre d'usinage. Comme présenté à la section 4.1.3, une multitude de méthodes de fixations de la pièce sont disponibles, souvent regroupées sur un même bloc de montage. La figure 6.8 illustre un arrangement typique, comprenant en périphérie (équerre) une face de montage avec des crampons-plaqueurs, deux faces avec des plaques de montage et un alignement de trois étaux, tandis que la face supérieure (plateau) comporte un étau. Il est important de spécifier ici que l'axe de la broche est perpendiculaire aux normales des faces en équerre et

parallèle à la normale de la face en plateau. L'axe de rotation du montage est parallèle à la normale du plateau comportant un seul étau.

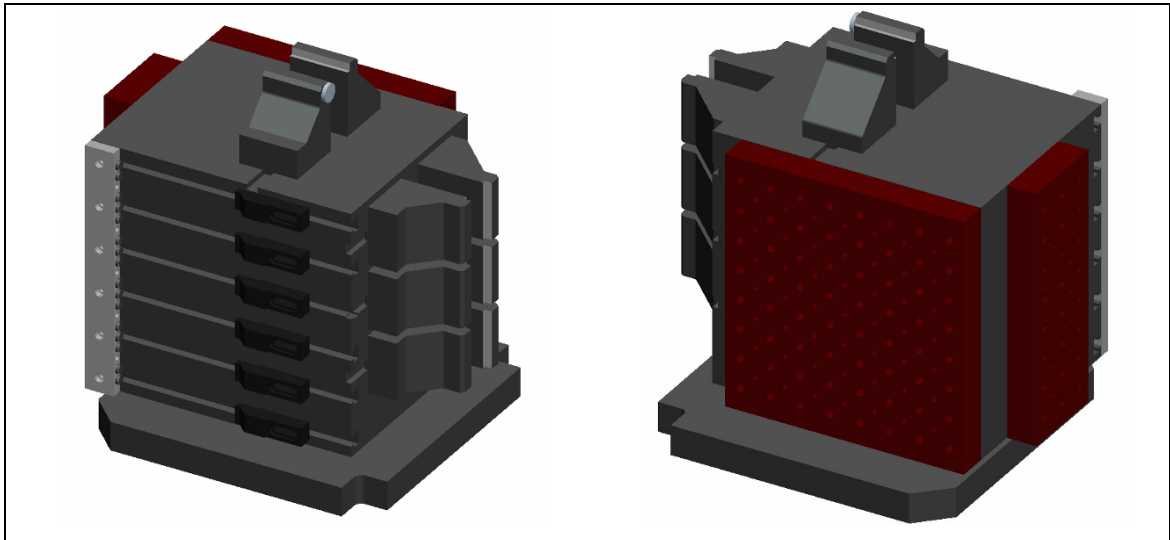


Figure 6.8 Représentation du montage d'usinage de la Makino A66.

Ce type de configuration nécessite un axe rotatif afin d'assurer le positionnement sur chacune des faces. Il offre toutefois plusieurs possibilités de montage, permettant d'exécuter l'usinage de plusieurs posages sur la même machine-outil et ainsi minimiser la manutention entre différents emplacements. Il faut toutefois considérer que le montage influencera la visibilité de la pièce, comme montré par Cordebois (Cordebois, 2003). Ainsi, une pièce montée sur une face verticale du bloc de montage ne donnera comme accès qu'un demi-cylindre. De plus, une analyse permet de valider la compatibilité entre la machine et la direction d'usinage par produits vectoriels ou scalaires, comme présenté dans le tableau 6.2 et en lien avec la figure 6.9.

Tableau 6.2 Analyse de la visibilité selon la configuration de la machine
(Cordebois, 2003)

Machine	Montage	Accessibilité	Analyse
3 axes broche horizontale	Plateau	Direction E1	$\mathbf{E1} \bullet \mathbf{E2} = 0$
3 axes broche verticale	Plateau	Direction broche	$\mathbf{E1} \bullet \mathbf{E2} > 0$ $\ \mathbf{E1} \times \mathbf{E2}\ = 0$
4 axes broche horizontale	Plateau	Cylindre d'axe B	$\mathbf{E1} \bullet \mathbf{E2} = 0$

Machine	Montage	Accessibilité	Analyse
4 axes broche horizontale	Équerre	Demi-cylindre d'axe B	$E1 \bullet E2 \geq 0$ $\ E1 \times B\ = 1$
5 axes broche horizontale	Plateau	Demi-sphère	$E1 \bullet E2 \geq 0$
5 axes broche horizontale	Équerre	Quart de sphère	$E1 \bullet E2 \geq 0$ $E1 \bullet B = 0$

Source : Ce tableau a été tiré du livre de M. Cordebois, *Fabrication par usinage*, p. 383.

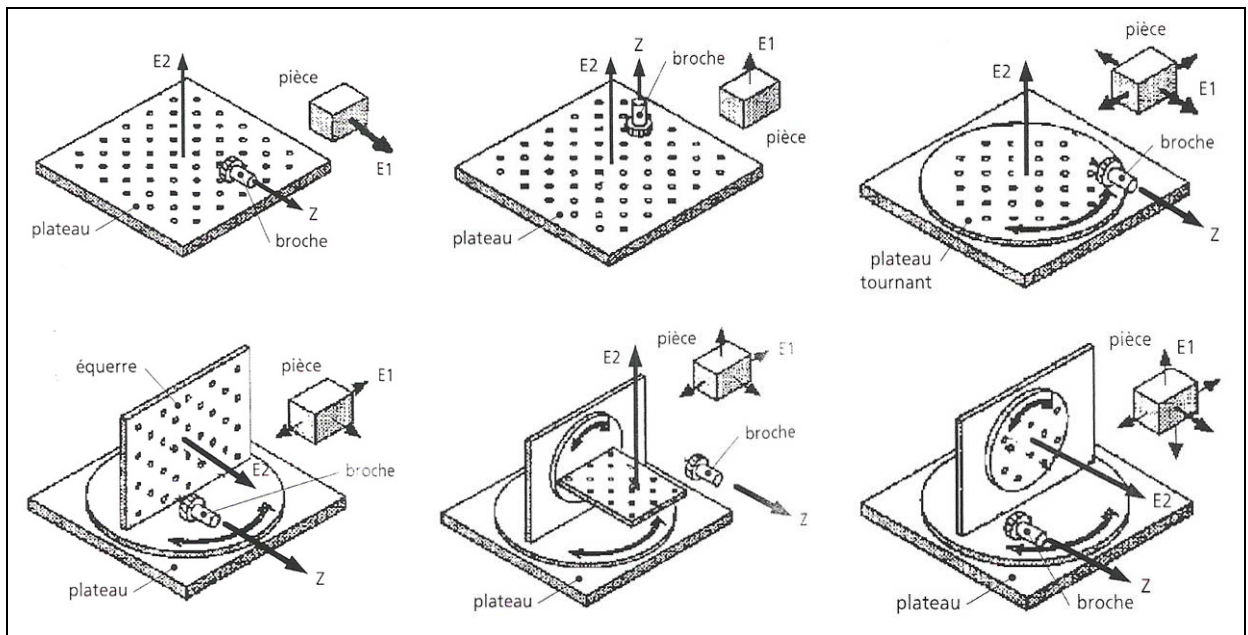


Figure 6.9 Représentation des configurations de machines-outils.
(Cordebois, 2003)

Source : Cette figure a été tirée du livre de M. Cordebois, *Fabrication par usinage*, p. 382.

Cette analyse de la visibilité permet de déterminer le positionnement d'une pièce pour l'usinage d'une entité en bout ou pour un perçage. Néanmoins, certaines entités perpendiculaires à l'axe de la broche sont également usinables en flanc. De plus, une analyse des obstacles doit aussi être effectuée afin de valider l'accessibilité de l'entité.

La rigidité du montage joue également un rôle clé dans la génération de la gamme. En règle générale, un maximum de rigidité est atteint par un montage sur une plaque, la pièce étant retenue par des vis de fixation, comparativement à un montage en étau. Ceci est dû au fait

que la pièce est maintenue par sa surface la plus grande, ne laissant pratiquement aucune possibilité de déflexion. Par contre, il faut être conscient que la rigidité du montage évolue dans le temps, au fur et à mesure que de la matière est enlevée, affaiblissant le lien entre la pièce et les points de fixation. Cet avantage de rigidité vient toutefois avec certains désavantages, notamment le fait qu'il nécessite l'usinage de la pièce en deux posages puisqu'une face est inaccessible. De plus, les vis de fixation peuvent être la source d'interférences avec l'outil de coupe, nécessitant une attention particulière.

Choix de la matière brute

Les dimensions de la pièce sont déterminantes dans la sélection de la matière brute. Comme le type de mise en forme est généralement une plaque laminée, la matière brute est alors de forme prismatique, coupée à la scie. Le dimensionnement préliminaire se fait alors par l'utilisation des valeurs d'encombrement minimal de la pièce. On cherche à minimiser le volume à enlever sur la matière d'œuvre, tout en tentant d'orienter les surfaces de la pièce parallèlement ou perpendiculairement aux surfaces de la matière brute. Toutefois, pour des raisons d'intégrité et d'homogénéité, on veille à ce qu'un minimum de matière soit enlevé sur chacune des faces laminées. Une surépaisseur minimale est ajoutée aux valeurs d'encombrement, et les dimensions minimales du brut sont ainsi établies (voir tableau 6.3). Si l'épaisseur de la pièce diffère beaucoup de l'épaisseur de la matière brute, la pièce doit être centrée dans le brut afin de répartir les contraintes résiduelles de façon symétrique.

Tableau 6.3 Surépaisseurs de matière minimale
sur la matière brute selon l'épaisseur

Épaisseur du brut (e)	Surépaisseur de matière à enlever
$e \leq 1$ pouce	0,040 pouce
$1 < e < 3$ pouces	0,080 pouce
$e \geq 3$ pouces	0,120 pouce

Une fois les dimensions minimales de la matière brute déterminées, ces dernières permettront de calculer le ratio d'épaisseur (largeur/épaisseur) de la matière d'œuvre, l'épaisseur étant la dimension caractéristique la plus petite (voir figure 6.10 et figure 6.11). Un ratio élevé indique que la rigidité de la pièce est faible, sa largeur étant supérieure à son épaisseur.

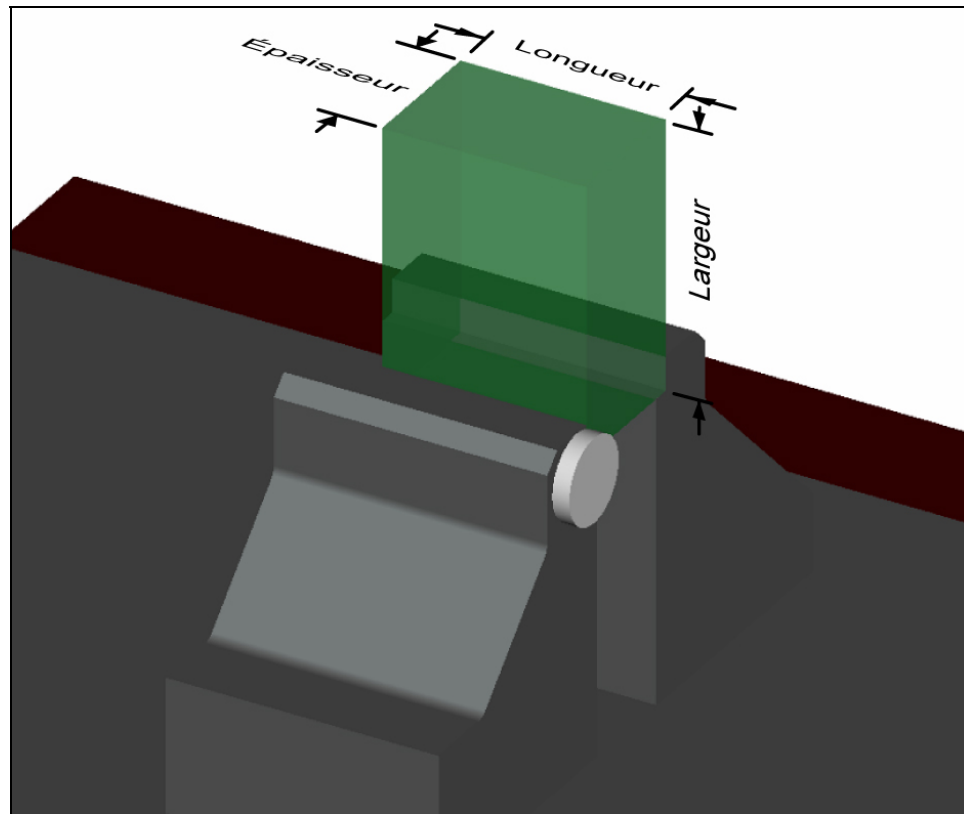
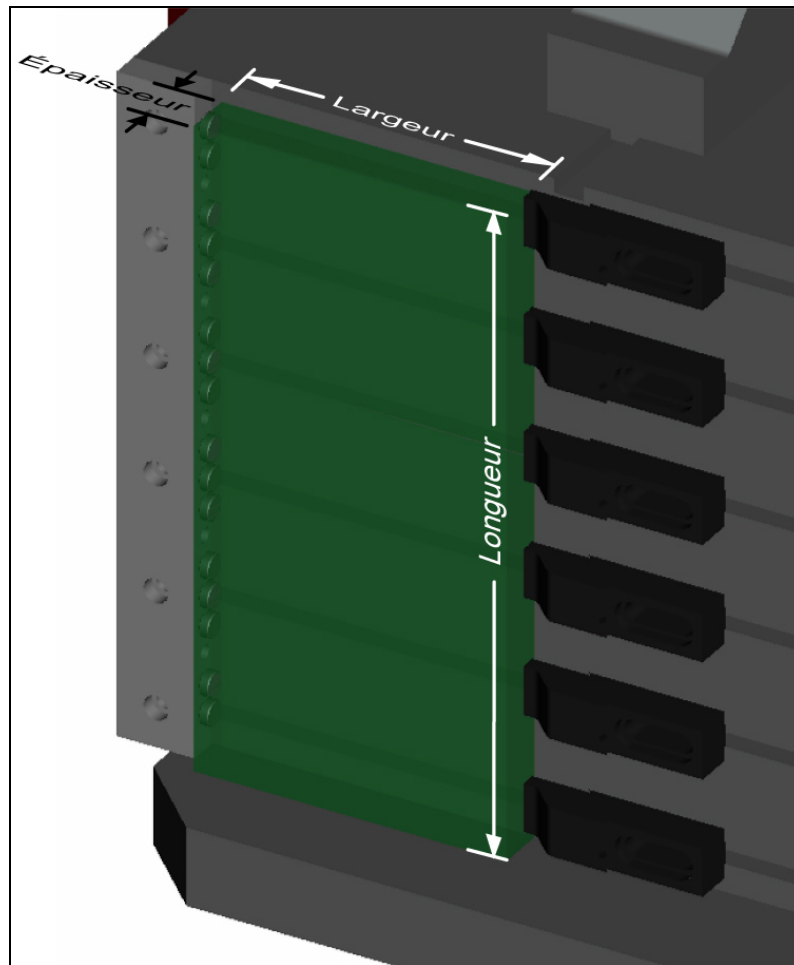


Figure 6.10 Montage en étau avec un seul posage.

Généralement, un ratio supérieur à 4 correspond à un usinage qui sera effectué en deux étapes. Ceci est dû au fait que la faible rigidité de la pièce nécessite un montage comportant un appui plan de grande surface et un mode de fixation maximisant la rigidité de l'ensemble. À l'inverse, un ratio inférieur à 4 est caractéristique d'une pièce rigide, prédisposant le choix d'un usinage en un posage lorsque l'accessibilité des entités d'usinage le permet.

Évidemment, la nature du matériau doit correspondre aux requis de conception, tout comme le traitement thermique spécifié.



**Figure 6.11 Montage avec crampons-plaqueurs
(posage 1 de 2 illustré).**

Position relative de la pièce dans la matière brute

Comme un des critères du choix des dimensions de la matière brute est de minimiser le volume à enlever, un minimum de matière séparera les surfaces de la pièce de celles de la matière brute. Et puisque l'encombrement minimal a guidé le choix, les possibilités d'orientation sont minces. Ceci permettra l'usinage des parois externes de la pièce en utilisant de courtes approches et des plongées à l'extérieur de la matière, dans le vide, comme illustré à la figure 6.12.

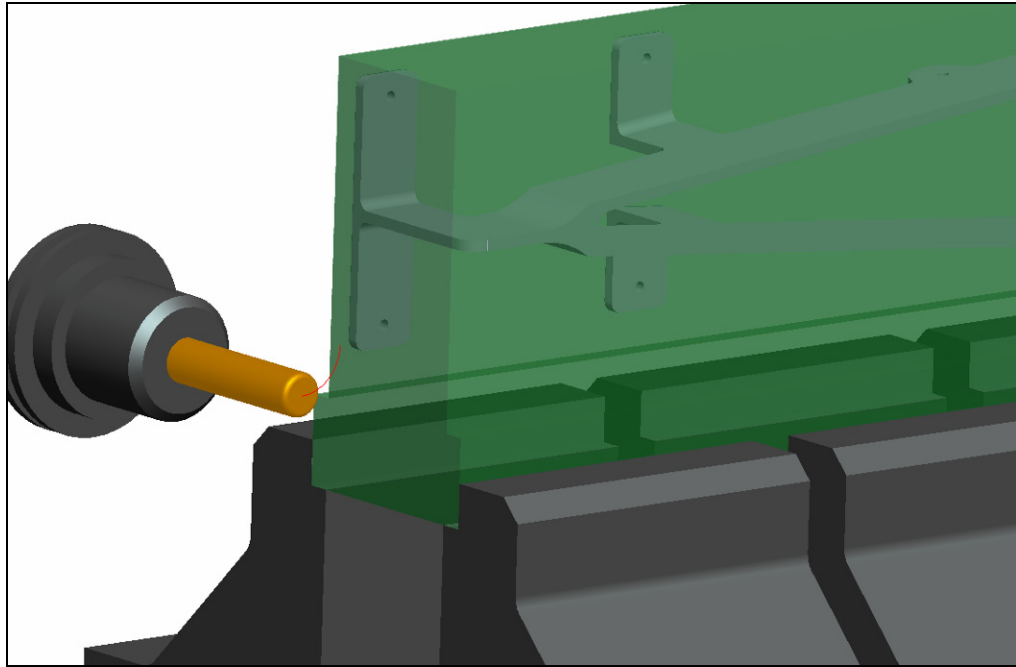


Figure 6.12 Mouvement d'entrée en matière.

Selon le montage préconisé, les dimensions de la matière brute pourront être augmentées afin de s'adapter au mode de fixation. Par exemple, les pièces usinées en un posage sont maintenues par un étau. Il est alors indispensable de laisser assez de matière pour maintenir la pièce dans les mâchoires de l'étau en plus de prévoir assez de dégagement pour permettre à l'outil de coupe de passer entre la pièce et la mâchoire (voir figure 6.13). Puisque le côté le plus long de la matière brute (la longueur) est généralement maintenu dans les mâchoires de l'étau, ce surplus de matière augmente alors la largeur du bloc. Cette augmentation est fonction de l'emprise des mâchoires (environ 0,5 po), de la dimension de l'outil effectuant la séparation de la pièce et d'une distance de sécurité. Cette distance de sécurité tiendra compte du mode d'ébauche et de la surépaisseur de matière laissée avant la finition. Une attention particulière doit également être portée sur la longueur de l'outil de coupe pour éviter qu'il y ait une interférence entre le porte-outil et l'étau, ou bien entre la broche et le bloc de montage.

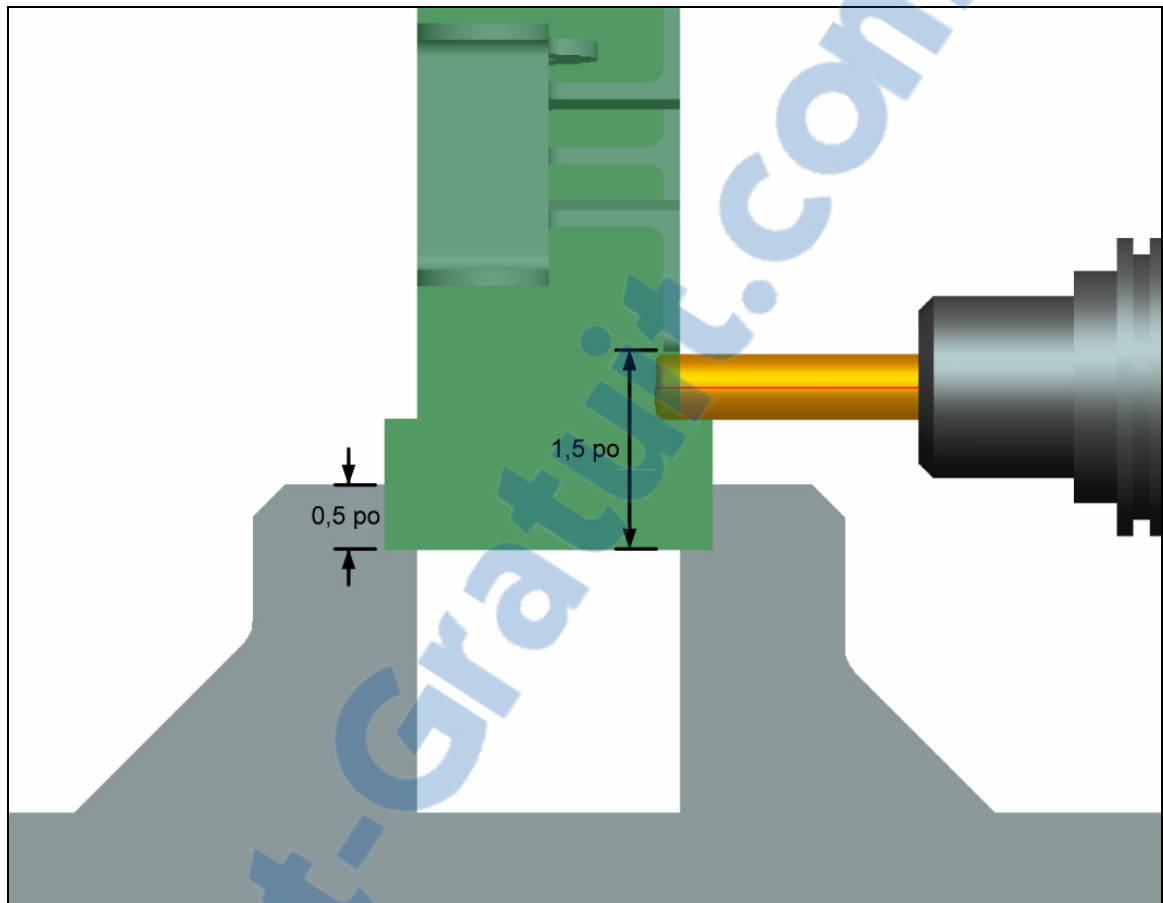


Figure 6.13 Dimensions caractéristiques d'un montage en étau.

Dans un même ordre d'idée, les pièces usinées en deux posages nécessitent un surplus de matière afin d'ajouter des entités de construction ne faisant pas partie de la pièce finale. Par exemple, dans le cas présenté à la figure 6.14, des trous et une surface de localisation, un trou de palpé, des marques d'orientation et des trous filetés de fixation sont exécutés au posage 1 en prévision du posage 2. Ceux-ci sont essentiels au deuxième posage afin de garantir un positionnement adéquat et l'atteinte de la qualité désirée.

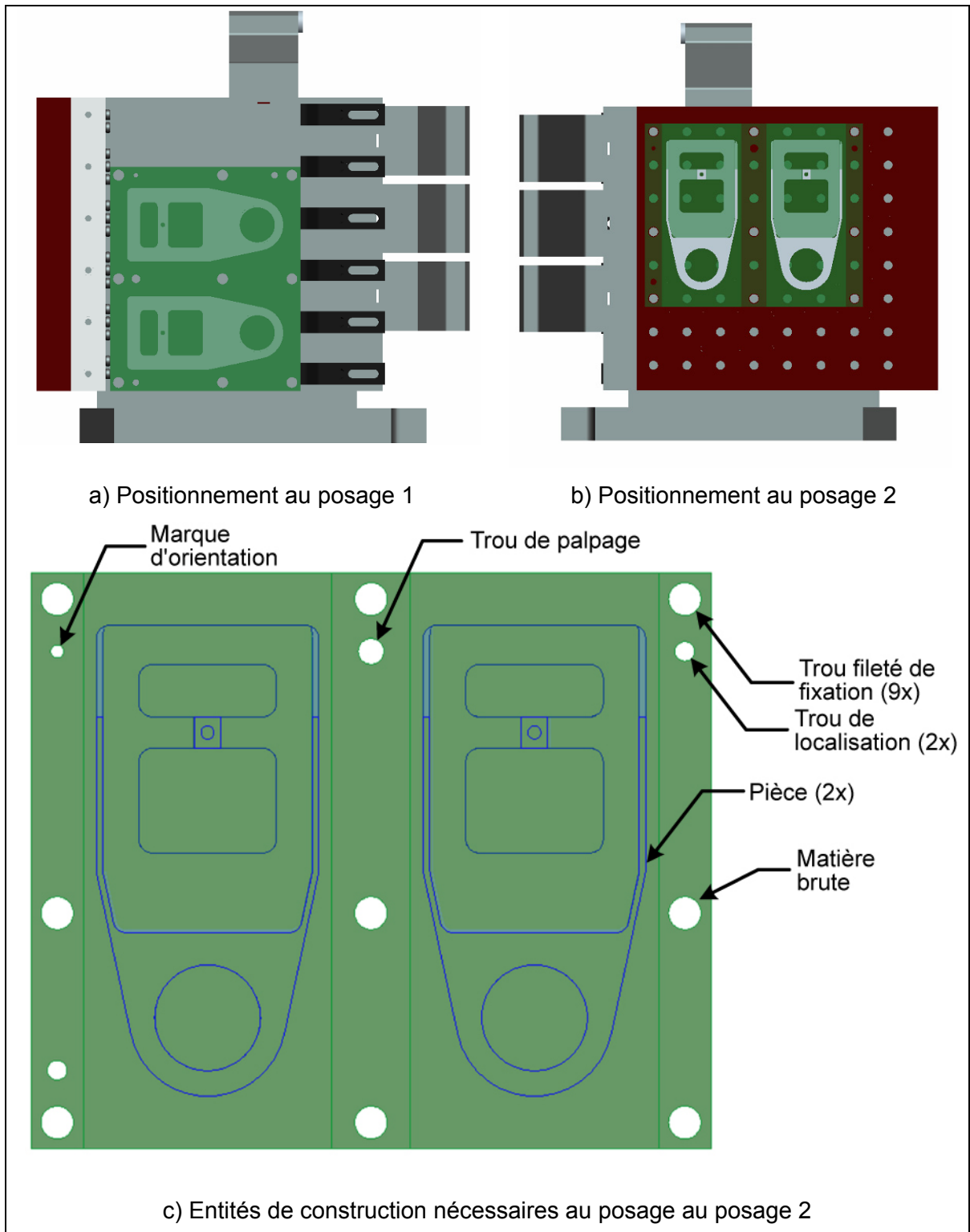


Figure 6.14 Configuration du montage pour une pièce usinée en deux posages.

Les entités de construction doivent être positionnées de façon à ne pas interférer avec la pièce de même qu'avec les parcours d'usinage. Le trou de palpation doit demeurer jusqu'à la fin de l'usinage de façon à permettre un repalpage en cas d'incident. Pour ces raisons, la largeur de l'outil de coupe influencera le positionnement des entités. Puisque des montages normalisés sont utilisés, la position des trous de localisation et des trous filetés de fixation sont dépendants de ces montages, tout particulièrement pour la distance relative entre ceux-ci. En règle générale, les points de localisation se trouvent aux extrémités pour minimiser l'erreur, tandis que les points de fixation sont en périphérie de la pièce, permettant d'assurer un appui maximal près de la pièce et près des pattes de maintien. Pour les pièces de grandes dimensions, il peut être utile d'ajouter un point de fixation à l'intérieur de la pièce lorsque celle-ci comporte une poche ouverte de dimensions suffisantes. Cette pratique permet également de minimiser la matière à enlever. En effet, pour éviter de se retrouver avec un morceau de matière détaché risquant de briser l'outil de coupe, une poche ouverte nécessite un usinage complet, transformant toute la matière en copeau, ce qui est coûteux en temps d'usinage. Il peut alors être avantageux de simplement effectuer un contournage interne de la poche, l'îlot résultant étant retenu par une vis de fixation.

Parmi les caractéristiques associées à la configuration du montage pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage:

- La longueur de la boîte englobante de la pièce;
- La largeur de la boîte englobante de la pièce;
- L'épaisseur de la boîte englobante de la pièce;
- Le ratio d'épaisseur de la boîte englobante de la pièce;
- Le nombre de posages nécessaires;
- L'état du posage actuel (1^{er} ou 2^e).

6.1.3.3 Outils de coupe

Ensuite, une analyse des différentes entités d'usinage permet de déterminer les outils qui seront nécessaires à la fabrication. La détermination des outils compatibles avec les entités d'usinage relève du savoir-faire technologique.

Les entités présentées à la section 6.1.2.2 peuvent être associées à un outil de coupe, comme le démontre le tableau 6.4.

Tableau 6.4 Correspondance des outils de coupe aux entités d'usinage

Types d'entités	Outils associés
Plan en bout	- Fraise en bout cylindrique - Fraise en bout torique
Plan en flanc	- Fraise en bout cylindrique - Fraise en bout torique - Fraise en bout hémisphérique - Fraise conique
Plan libre	- Fraise en bout cylindrique - Fraise en bout torique - Fraise en bout hémisphérique - Fraise conique
Profil	- Fraise en bout cylindrique - Fraise en bout torique - Fraise en bout hémisphérique - Fraise conique
Alésage	- Foret - Fraise en bout cylindrique - Fraise en bout torique - Fraise conique
Raccordement	- Fraise en bout torique - Fraise en bout hémisphérique
Masque	- Fraise conique - Fraise en bout torique - Fraise en bout hémisphérique
Coin cinq axes	- Fraise en bout cylindrique - Fraise en bout torique - Fraise en bout hémisphérique - Fraise conique
Extrémité d'élancement	- Fraise en bout cylindrique - Fraise en bout torique - Fraise en bout hémisphérique

Une fois l'entité associée à un type d'outil, il faut choisir les dimensions caractéristiques de l'outil. En premier lieu, une sélection est faite parmi les outils de coupe disponibles.

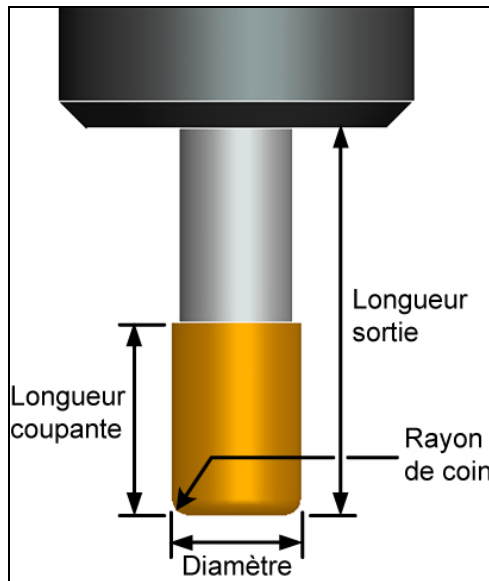


Figure 6.15 Modèle d'outil torique.

Si aucun outil ne correspond au besoin, un nouvel outil sera ajouté. Il faut toutefois être en mesure de justifier l'ajout d'un outil par une économie substantielle en temps de fabrication. Une fraise en bout peut être modélisée par quelques dimensions caractéristiques comme illustré à la figure 6.15.

Pour les plans en bout, le diamètre effectif est comparé à la surface à usiner. Si la surface est bornée par des arêtes fermées, le diamètre de l'outil doit être inférieur à la largeur minimale entre deux arêtes (voir figure 6.16d et section 3.5). Pour les surfaces de grande superficie, il peut s'avérer nécessaire d'utiliser une combinaison de deux outils de diamètres différents, la majeure partie de la surface étant usinée avec l'outil de diamètre maximal, tandis que le masque résultant est usiné avec l'autre outil de diamètre inférieur. Pour éviter la création de masques, le rayon de l'outil doit également être inférieur au rayon minimal des arêtes du contour de la surface (voir figure 6.16c). En absence de ces contraintes, le diamètre maximum sera privilégié, pour maximiser le taux d'enlèvement de matière. Ceci aura toutefois comme effet indésirable d'augmenter les efforts de coupe sur la pièce, augmentant les risques de déformation et de mouvement de la pièce.

La longueur sortie de l'outil doit également être vérifiée pour éviter les interférences entre le porte-outil et la pièce (voir figure 6.16b). D'autres considérations comme une faible

épaisseur de cloison peuvent justifier l'utilisation d'un outil de faible diamètre pour minimiser les déformations.

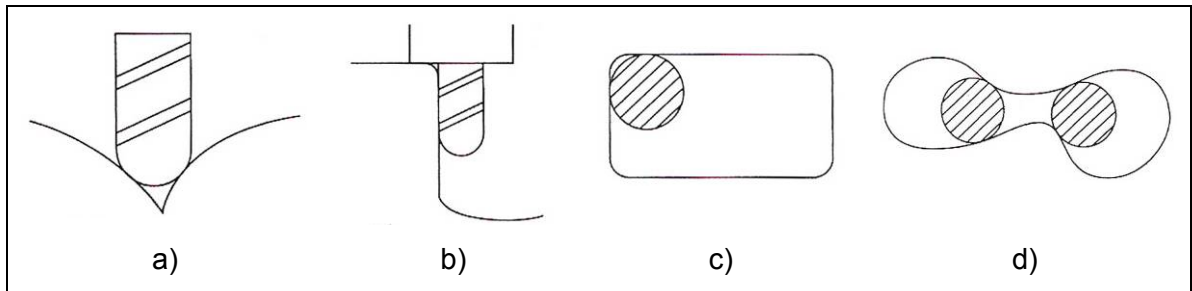


Figure 6.16 Interférence outil/pièce.
(Cordebois, 2003)

Source : Cette figure a été tirée du livre de M. Cordebois, *Fabrication par usinage*, figure 8.30, p. 401.

Les mêmes observations s'appliquent pour les plans en flanc ou les profils quant à la sélection des dimensions caractéristiques. L'analyse des surfaces adjacentes est donc indispensable. L'enrichissement de la géométrie prend ici tout son sens puisque les attributs associés aux surfaces sont mis en relation avec les dimensions caractéristiques. Par exemple, la longueur maximale de la génératrice d'une surface réglée développable est associée à la longueur coupante de l'outil (Derigent, 2005).

Les raccords internes sont de préférence usinés par une fraise de forme. Le rayon du raccordement est donc mis en relation avec le rayon de coin de la fraise (torique ou hémisphérique). Si le rayon n'est pas disponible parmi les outils, le raccordement est usiné par balayage avec un outil de rayon inférieur, permettant de garantir l'unicité du point de tangence entre l'outil et la pièce. Les raccords externes sont usinés soit en flanc, soit en balayage avec une fraise en bout de diamètre maximum.

L'alésage peut quant à lui être associé aux deux types d'outil : les outils axiaux ou les outils radiaux. Puisque les outils axiaux sont en général associés à une forme spécifique, ils contribuent à faire gonfler la taille du magasin d'outil. Pour éviter cette conséquence, les outils axiaux les plus communs sont conservés et les outils radiaux sont utilisés pour

remplacer les outils axiaux lorsque la situation le permet, notamment pour les alésages de faible profondeur.

Puisque les coins cinq axes et les extrémités d'élancement constituent des cas particuliers des profils ou des plans, les règles énoncées précédemment s'appliquent.

De façon à s'assurer de la qualité de la pièce, il est essentiel d'éviter la déflexion de l'outil de coupe. Différentes approches permettent d'y parvenir, soit par l'augmentation du diamètre, la diminution de la longueur sortie et de la partie tranchante ou bien par l'utilisation d'un outil fait d'un matériau affichant un module de rigidité élevé comme le carbure. Les paramètres de coupe affectent également la déflexion de l'outil.

Il a été énoncé auparavant que l'on cherche à maximiser le taux d'enlèvement de matière qui peut, entre autres, être atteint par l'augmentation du diamètre de l'outil. Ceci entraîne toutefois des efforts de coupe élevés et devient un désavantage dans une certaine mesure puisque ces efforts se font sentir sur la pièce et sur le montage d'usinage. Les efforts deviennent particulièrement importants lorsqu'il est nécessaire de plonger dans la matière. On observe donc ici une situation d'obtention d'un point optimum où il y a un équilibre entre le taux d'enlèvement de matière et la rigidité.

Par contre, le choix du diamètre de l'outil peut également être dicté en fonction de la géométrie. Par exemple, une poche rectangulaire comportant de petits rayons de coin pourra justifier l'utilisation d'une fraise en bout plus petite. Il est également possible qu'une ébauche soit réalisée avec un outil de plus grand diamètre et qu'une ébauche localisée utilise un outil plus petit pour enlever la matière inaccessible avec l'autre outil. L'alternative d'effectuer uniquement la passe de finition avec un outil plus petit est également envisageable. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'il y aura une variation de l'effort de coupe dans les coins de la poche puisque la surépaisseur de matière est plus grande, comme l'illustre la figure 6.17. Le niveau de précision requis sera alors déterminant dans le choix de l'approche à privilégier.

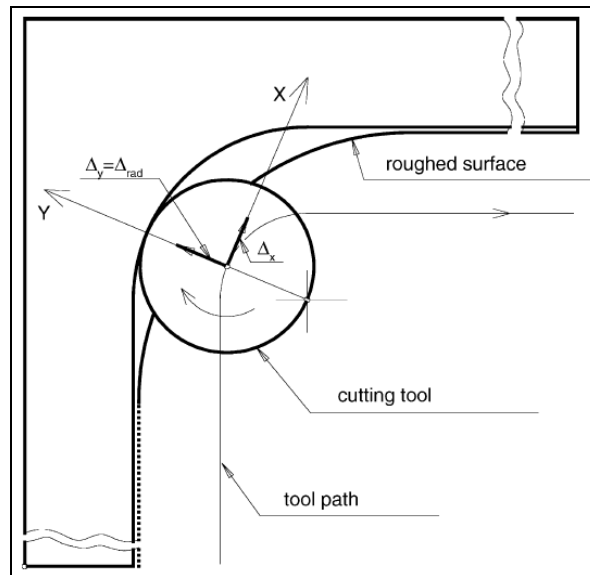
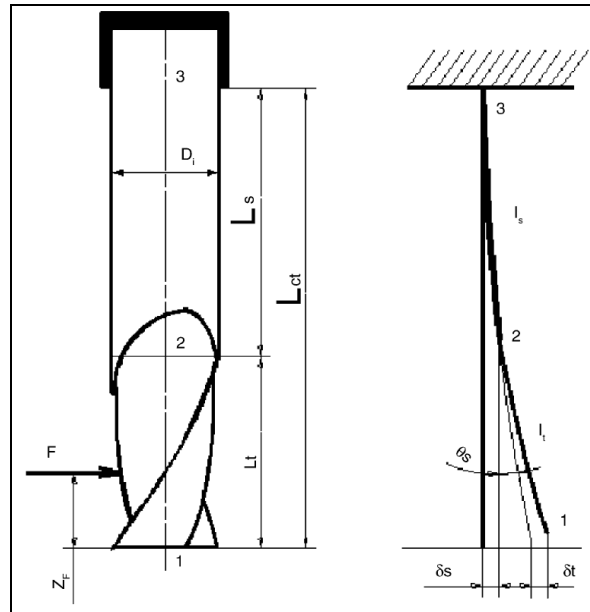


Figure 6.17 Matière résiduelle dans un raccordement.
(Dotcheva & Millward, 2005)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de M. Dotcheva, *The application of tolerance analysis to the theoretical and experimental evaluation of a CNC corner-milling operation*, figure 2.

Un outil de coupe peut être représenté symboliquement par une poutre en flexion (voir figure 6.18), encastrée dans le porte-outil. L'effort est appliqué au point d'enlèvement de matière, ce qui implique que le déplacement est d'autant plus grand que l'outil est long.



**Figure 6.18 Modèle de déflexion
d'un outil de coupe.**
(Dotcheva & Millward, 2005)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de M. Dotcheva, *The application of tolerance analysis to the theoretical and experimental evaluation of a CNC corner-milling operation*, figure 5.

Pour cette raison, il est avantageux d'utiliser l'outil le plus court possible admis par la géométrie, qui évitera une interférence entre la matière et le porte-outil. Un rapport longueur sur diamètre de 3 :1 ou moins est à préconiser. Dans le même ordre d'idée, il est préférable de minimiser la longueur de la partie tranchante de l'outil. En effet, comme la présence de flûtes affaiblit la « poutre », il est favorable d'avoir un plein diamètre sur l'outil et un minimum de longueur de flute, soit l'équivalent de la profondeur de coupe axiale. Afin d'éviter que la tige entre en contact avec la paroi en cours d'usinage, des outils munis d'une tige de diamètre réduit assurent un dégagement adéquat. Dans certaines situations, il est possible d'usiner en utilisant la partie tranchante supérieure de l'outil, afin que le point d'application de la force soit près de l'encastrement, ce qui diminue également la déflexion.

De façon approximative, la déflexion de l'outil est proportionnelle au cube de la longueur de l'outil. Une estimation plus précise peut être réalisée selon un modèle de déflexion

comportant deux modes, soit la partie tranchante et la partie avec un plein diamètre (Dotcheva & Millward, 2005).

Parmi les caractéristiques associées au choix de l'outil de coupe de chacune des entités d'usinage pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage :

- Le type de l'entité d'usinage;
- Le type des entités voisines;
- Le mode d'usinage sélectionné pour l'entité d'usinage;
- Les dimensions associées à l'entité d'usinage;
- Les tolérances associées à l'entité d'usinage;
- L'épaisseur de la cloison;
- Le volume de matière à enlever;
- Le rayon de courbure minimum extérieur matière;
- La distance minimale et maximale entre les arêtes délimitant la surface.

6.1.4 Stratégies d'usinage

L'élément clé dans la définition d'un programme d'usinage est la stratégie employée. La stratégie se définit comme étant « l'art de planifier et de coordonner un ensemble d'opérations en vue d'atteindre un objectif »¹. Dans le cas de l'usinage, l'objectif est la fabrication d'une pièce répondant aux requis de conception dans un temps minimum, comme défini précédemment. Pour y arriver, un plan de fabrication doit être établi comportant des décisions technologiques sur la méthode de fabrication, sur les opérations à utiliser et sur l'ordonnancement de ces dernières. La stratégie comporte également des astuces permettant d'économiser du temps de fabrication ou d'assurer un résultat de qualité. Les stratégies sont toutefois restreintes par des limitations logicielles.

¹ Définition tirée de Marie-Éva de Villers, Multidictionnaire de la langue française, 3^e édition, Québec Amérique, 1997

6.1.4.1 Détermination des opérations d'usinage

Depuis quelques années, certains logiciels fournissent une assistance à la génération des opérations d'usinage. Des outils permettent de procéder à une reconnaissance des entités d'usinage. Les entités détectées peuvent être des trous, des poches ou des rainures par exemple. Ensuite, une association est faite avec les opérations d'usinage. Ces outils peuvent s'avérer fort efficaces pour accélérer la génération d'un programme d'usinage. Toutefois, les programmeurs sont confrontés à une contradiction déchirante. Ils veulent détenir un contrôle total sur les mouvements de l'outil, mais ne veulent pas être encombrés par les tâches répétitives et laborieuses que cela implique. Pour cette raison, la tendance est maintenant d'apporter une assistance plutôt que d'automatiser le processus de génération de la gamme.

L'approche conventionnelle consiste à fixer les objectifs recherchés. Une fois le montage choisi, les dimensions de la matière brute déterminées et connaissant les ressources disponibles, une évaluation des opérations d'usinage permettant la réalisation de la pièce est entreprise. Ceci implique alors l'analyse des surfaces composant la pièce. Ces surfaces peuvent être associées à des entités d'usinage. À leur tour, chacune des entités d'usinage est associée à un mode d'usinage. En partant des types d'entités présentées à la section 6.1.2.2, les modes d'usinage sont déterminés selon le tableau 6.5.

Tableau 6.5 Association des modes d'usinage aux entités

Entité d'usinage	Mode d'usinage
Plan en bout	Usinage en bout
Plan en flanc	Usinage en flanc
Plan libre	Usinage en bout ou en flanc
Profil	Usinage en flanc ou usinage en flanc multiaxes
Alésage	Usinage axial ou usinage en flanc
Raccordement	Usinage en flanc ou usinage en balayage
Masque	Usinage spécial (voir figure 6.28)
Coin cinq axes	Usinage en flanc multiaxes
Extrémité d'élancement	Usinage en bout ou usinage en balayage

Parmi les caractéristiques associées au choix du mode d'usinage de chacune des entités d'usinage pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été

retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage :

- Le type de l'entité d'usinage;
- Le vecteur de direction d'accès de l'entité d'usinage;
- La liste des outils disponibles;
- La configuration du montage d'usinage et l'orientation de la matière brute;
- Les dimensions associées à l'entité d'usinage;
- Les tolérances associées à l'entité d'usinage.

6.1.4.2 Ordonnancement des opérations

Même si chacune des surfaces de la pièce a été associée à une entité d'usinage, il n'en demeure pas moins que ces entités doivent être ordonnées. Il est fort à parier que certaines entités seront liées entre elles. En effet, il est fréquent qu'il soit possible d'usiner deux surfaces en même temps, notamment avec une fraise en bout qui permet d'exécuter deux tailles en même temps.

Bref, différents critères sont présentés pour guider l'ordonnancement des opérations, toujours selon le cas à l'étude en considérant seulement les ressources et requis typiques.

Antériorités technologiques

En premier lieu, certaines opérations produisant des contraintes rigides peuvent rapidement être ordonnées, celles-ci affectant la faisabilité de l'opération. Il est évident que la finition d'une surface sera exécutée après l'ébauche et la semi-finition s'il y a lieu. Un raisonnement équivalent peut être appliqué pour un trou qui sera percé avant d'être alésé. Les opérations de perçage nécessitent en général un centrage préalable afin de guider le foret. De plus, la surface de départ doit être perpendiculaire à l'axe du trou afin d'éviter que le foret glisse contre une surface inclinée. Dans un tel cas, le perçage peut être effectué avant le fraisage de la surface inclinée, si la surface d'accès sur la matière brute est perpendiculaire à l'axe du trou. Sinon, une surface temporaire est usinée, perpendiculaire à l'axe du trou, afin de faciliter l'entrée en matière du foret.

Considérations de rigidité

Outre les antériorités technologiques, des considérations de rigidité pilotent les décisions, notamment au niveau de la pièce.

La rigidité du montage évolue dans le temps et celle de la pièce ne fait pas exception. Pour cette raison, il est préférable d'effectuer les lourdes ébauches en premier, c'est-à-dire celles nécessitant un volume élevé de matière enlevée. Puisque celles-ci provoquent des efforts de coupe importants, les déflexions de la pièce sont ainsi moindres en début d'usinage. De plus, ceci permet de relâcher les contraintes résiduelles dues à la mise en forme plus tôt (Sharma & Hayes, 2001). Il est également recommandé d'usiner d'abord les entités les plus loin du lieu de fixation de la pièce. Par exemple, pour une pièce retenue par un étau, les entités éloignées de l'étau sont exécutées en premier pour ensuite s'approcher de l'étau. La même logique est applicable pour une pièce usinée en deux posages, où les entités du centre sont réalisées d'abord, pour ensuite s'éloigner vers l'extérieur, en direction des vis de fixation et des pattes d'attache.

Une précaution particulière doit être portée sur les entités fragiles, comme les parois de faible épaisseur, lorsque des efforts de coupe importants sont appliqués. La figure suivante illustre ce fait :

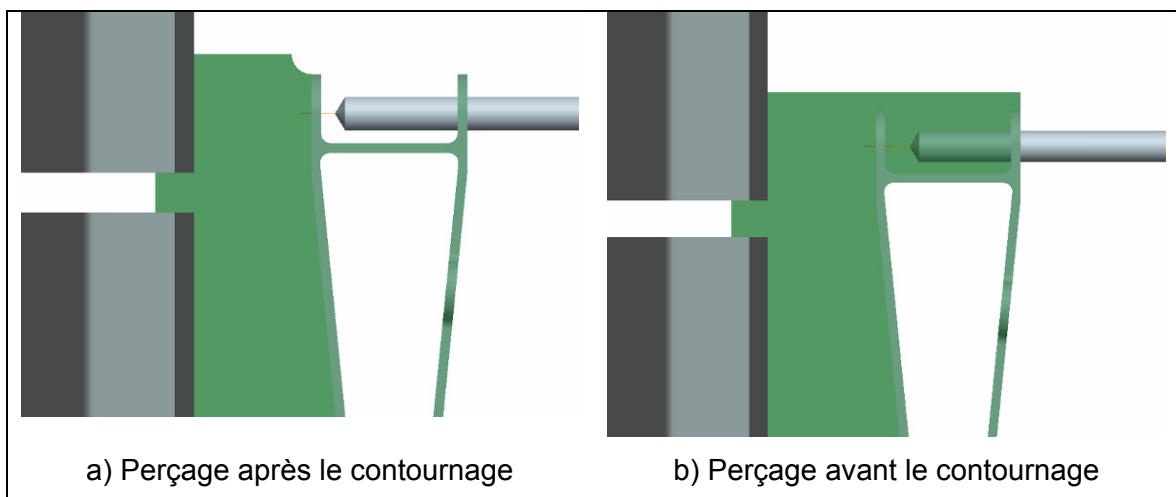


Figure 6.19 Ordonnancement des opérations selon la rigidité.

L'illustration ci-haut démontre bien l'importance de l'ordre des opérations. Premièrement, il est avantageux de percer le trou avant d'enlever la matière entre les deux oreilles de la

chape. Ceci évite la flexion des oreilles et assure un meilleur positionnement du deuxième trou puisque le centrage est impossible et le foret risque de dévier de sa trajectoire.

Les dernières étapes de l'usinage consistent généralement à séparer la pièce de la matière brute restante. Toutefois, afin d'éviter que la pièce bouge violemment à la fin de la coupe, de minces pattes sont laissées sur la pièce. Elles seront enlevées manuellement par sciage et sablage après l'usinage. Puisque la pièce perd énormément de rigidité une fois qu'elle est retenue seulement par ces pattes, il est nécessaire de garder cette opération à la toute fin, en minimisant les efforts de coupe.

Considérations de temps

Un des objectifs poursuivis est la minimisation du temps d'usinage. Il est alors logique que certaines décisions soient orientées par cette cible. Les changements d'outil sont assurément une perte de temps, surtout dû au fait que la broche doit retourner au point de changement d'outil et dû à la remise en rotation de la broche. Toutefois, les MOCN sont de plus en plus performantes et ces opérations se font dans un délai de temps très court. Il n'en demeure pas moins que le regroupement des opérations utilisant le même outil est une façon de faire raisonnable. Des opérations de perçage peuvent alors être groupées ensemble, notamment lorsque le même outil est utilisé, comme pour le centrage par exemple.

Les quelques secondes perdues par un changement d'outil sont bien négligeables comparativement au temps perdu par un mouvement d'outil inutile. C'est principalement ce qui justifie l'association des surfaces de la pièce à une opération. Chaque mouvement d'outil doit permettre de générer une surface utile sur la pièce. Un minimum de matière doit être enlevé afin de compléter la pièce. Ceci implique nécessairement un contrôle total sur l'opération d'usinage, ce qui n'est pas toujours le cas lors de l'utilisation d'opérations complexes, comme une ébauche automatique par exemple. Pour y parvenir, il est parfois nécessaire de décomposer une opération en plusieurs opérations simples, afin de pallier les limitations associées au logiciel. Ceci permet d'éviter les coupes superflues et les mouvements d'outil dans le vide. En programmation manuelle, cette façon de faire peut rapidement devenir lourde et laborieuse compte tenu de la répétition qu'elle implique.

Toutefois, dans un contexte d'assistance à la programmation, cette approche prend tout son sens.

Les opérations permettant un taux d'enlèvement de matière élevé précéderont également les opérations moins efficaces (Sharma & Hayes, 2001). Par exemple, si un trou doit être percé au fond d'une poche, celle-ci sera usinée avant de procéder au perçage du trou (voir figure 6.20). Cette situation s'applique si le taux d'enlèvement de matière de la fraise en bout est supérieur à celui du foret. La dimension du foret aura ici une importance déterminante. Le même raisonnement s'applique pour l'usinage d'entités imbriquées (voir figure 6.20), la plus grande étant usinée en premier puisqu'elle admet en général un outil de dimensions supérieures et de meilleure rigidité.

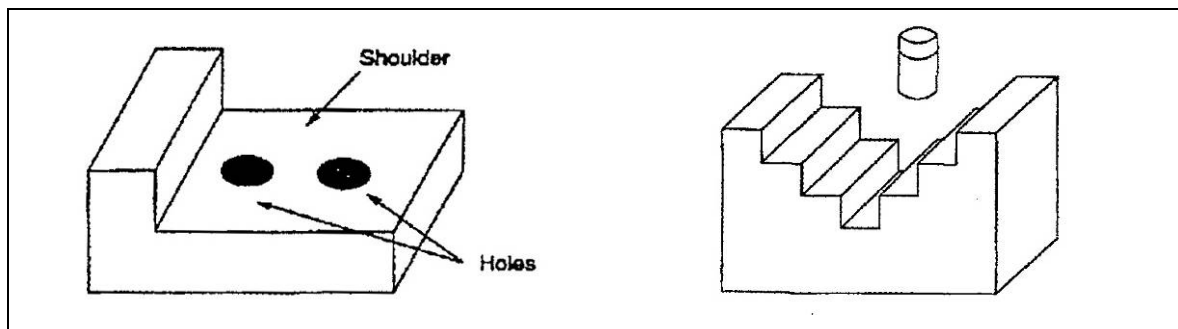


Figure 6.20 Usinage d'entités imbriquées.
(Sharma & Hayes, 2001)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de M. Sharma, *Operation ordering principles and intra-setup planner: Combining human control with automation in process planning*, figure 4 et 7.

Lorsque possible, les opérations risquées ou demandant une précision élevée seront effectuées tôt dans le processus d'usinage. Ainsi, si une difficulté survient, la pièce sera jetée avant qu'un temps précieux ait été perdu pour exécuter des opérations plus faciles (Sharma & Hayes, 2001). Par exemple, un trou profond et de faible diamètre sera exécuté le plus tôt possible compte tenu du risque élevé de bris du foret. Toutefois, pour les entités comportant une tolérance faible, une attention doit être portée afin de demeurer à l'intérieur de la tolérance tout au long de l'usinage. En effet, les déformations de la pièce en cours d'usinage peuvent faire en sorte qu'une entité devienne hors tolérance. Il est alors préférable d'exécuter les finitions lorsqu'une bonne proportion de la pièce est ébauchée.

L'usure des outils peut également s'avérer dispendieuse en perte de temps. Outre le fait que l'usure peut conduire à des pièces de mauvaise qualité, elle nécessite également l'arrêt de la machine, ralentissant la productivité, en plus des frais associés au remplacement ou au réaffûtage. Lorsqu'utilisés dans des conditions adéquates, les paramètres de coupe sont les éléments qui permettent de déterminer la durée de vie d'un outil. Le programme affecte ainsi directement l'usure des outils.

Une méthode pour diminuer l'usure des outils, plus particulièrement des fraises en bout, consiste à utiliser des fraises comportant un rayon de coin. L'effort mécanique et thermique est ainsi mieux réparti sur un rayon que sur une arête pointue et fragile. Une attention particulière doit toutefois être portée à la surface générée par l'outil compte tenu de la présence du rayon de coin, dépendamment de l'interprétation qu'en fait le logiciel de programmation. Il faudra donc s'assurer que l'outil soit décalé axialement du rayon de coin de l'outil minimalement en usinage en flanc, comme l'illustre la figure 6.21.

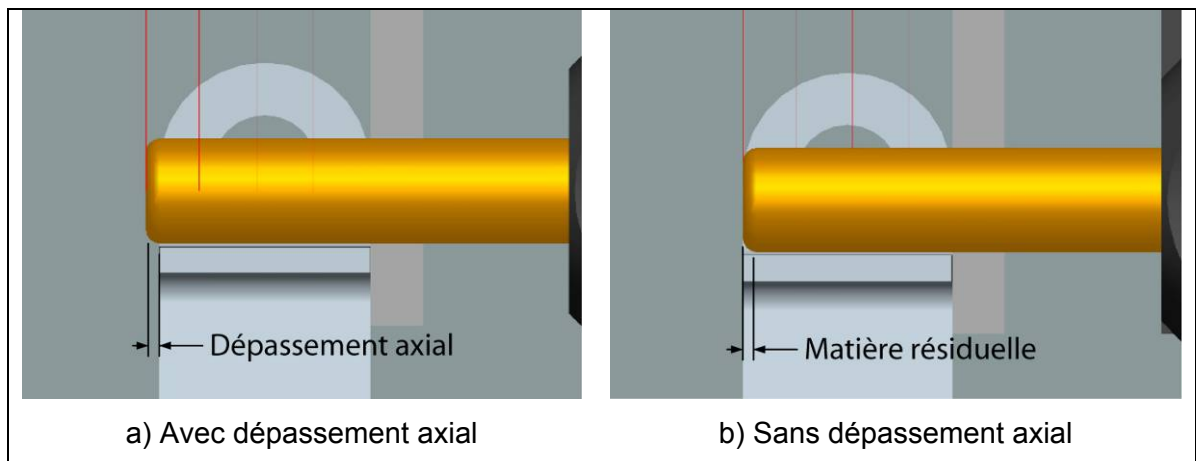


Figure 6.21 Compensation du rayon de coin d'un outil torique.

Considérations de qualité

Des contraintes d'antériorité existent également entre des opérations effectuées à l'intérieur de montages d'usinage différents. Les références de positionnement d'un montage au posage 2 doivent être usinées au posage 1 afin de garantir la qualité recherchée. Les tolérances géométriques peuvent fournir des informations précieuses à ce titre.

En plus d'affecter la durée de la fabrication de la pièce, l'exécution d'un nouveau posage ou d'un changement de machine influence également la qualité du résultat, impliquant plus de manutention, des risques d'erreur et une accumulation des défauts de précision. Ainsi, il est fortement conseillé de minimiser les posages lorsque ceci est possible.

Une attention particulière doit également être portée afin de respecter le niveau de qualité demandée, la surqualité étant aussi dispendieuse à accéder, autant en temps qu'en coût. Afin d'atteindre un fini de surface de qualité élevée ou une cote de grande précision, il est généralement nécessaire d'effectuer une passe de finition de faible épaisseur, où les efforts de coupe sur l'outil seront petits, contribuant à minimiser sa déflexion.

L'ordonnancement des opérations peut également permettre de diminuer les bavures sur la pièce. Par exemple, le fraisage d'une surface après le perçage d'un trou laissera une bavure à l'intérieur du trou (Sharma & Hayes, 2001).

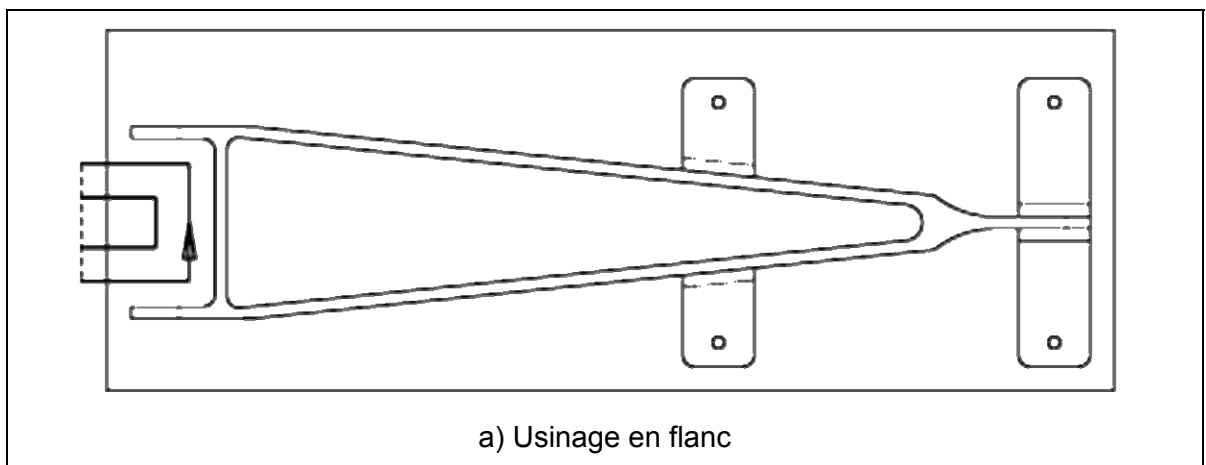
Parmi les caractéristiques associées à l'ordonnancement des opérations d'usinage pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage :

- Les caractéristiques intrinsèques de l'entité d'usinage;
- Les caractéristiques extrinsèques de l'entité d'usinage;
- La configuration du montage d'usinage et l'orientation de la matière brute;
- Le mode d'usinage sélectionné;
- Le numéro de l'outil sélectionné;
- Les antériorités technologiques associées à l'entité;
- Le volume de matière à enlever;
- La qualification des arêtes de l'entité;
- L'épaisseur de la cloison;
- Les entités de construction nécessaires;
- Le taux d'enlèvement de matière;
- Les surfaces de référence;
- Le numéro du posage.

6.1.4.3 Cas particuliers et savoir-faire spécifique

Pour atteindre les objectifs, certaines façons de faire relèvent de l'expérience et du savoir-faire des gammistes et des programmeurs en FAO. Ce sont en fait des astuces développées afin de simplifier l'opération d'usinage et de l'accélérer.

Il a été mentionné à plusieurs reprises que les mouvements inutiles doivent être évités, que chaque mouvement d'outil doit être directement lié à la réalisation d'une surface de la pièce. Ceci implique alors l'utilisation régulière des opérations de contournage, celles-ci étant rattachées à une surface de la pièce agissant comme surface guide. Il est parfois tentant d'utiliser une opération de poche pour usiner une surface appartenant au contour de la pièce. L'opération de poche est habituellement plus facile à contrôler dû au fait que la zone d'usinage est délimitée par un cadre fermé. Par contre, ce type d'opération entraîne des mouvements d'enlèvement de matière inutiles, comme l'illustre la figure suivante.



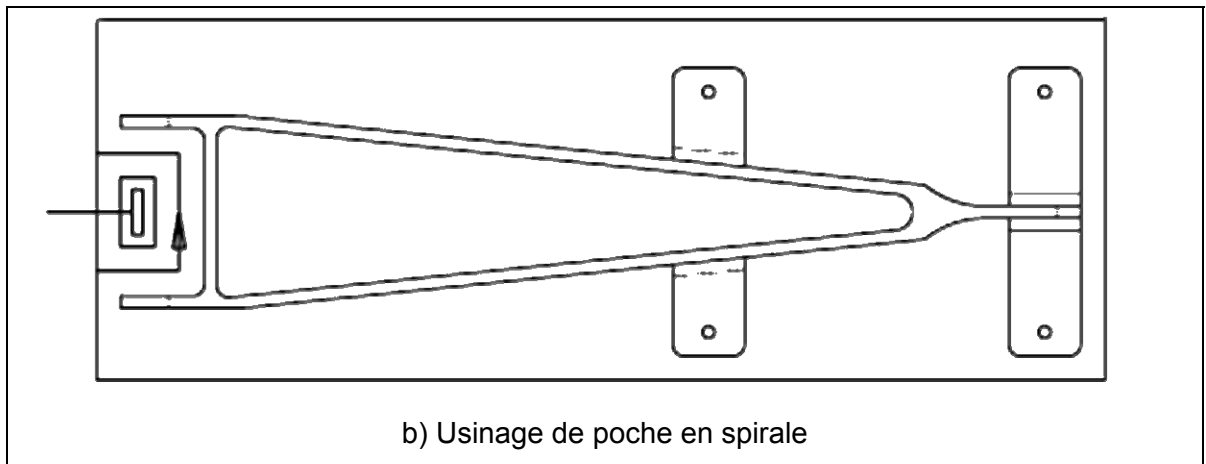


Figure 6.22 Comparaison de modes d'usinage.

La comparaison permet de mettre en évidence le mouvement inutile effectué en usinage de poche le long de l'arête de la matière brute, tandis qu'en contournage, ce mouvement est effectué en avance rapide.

Une des difficultés liées à l'opération de contournage est au niveau de la plongée de l'outil dans la matière. Toutefois, puisque les opérations de contournage sont généralement sur les parois externes de la pièce, une entrée en matière par l'extérieur de la matière brute est souvent possible. Le cas échéant, un trou d'accès est percé.

L'évacuation des copeaux peut également représenter un défi lors d'un contournage profond. Il peut alors être pertinent d'effectuer un dégrossissage selon un modèle en zigzag, comme le démontre la figure suivante.

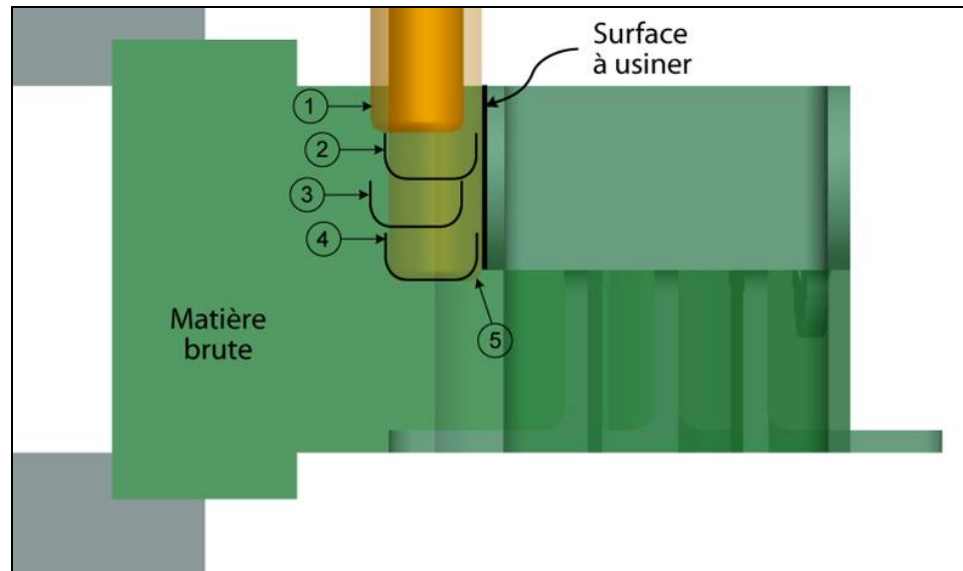


Figure 6.23 Modèle de dégrossissage facilitant l'évacuation du copeau.

Une séquence d'usinage numéro 1 est effectuée avec une surépaisseur d'environ 0,100 po sur la paroi. La 2^e séquence est décalée axialement par la profondeur de coupe et une surépaisseur de 0,015 po est conservée sur la paroi pour la finition. Ces deux séquences sont ensuite utilisées en alternance jusqu'à l'atteinte de la pleine profondeur de la surface. La dernière séquence (ici la séquence 5) est utilisée pour exécuter la finition de la surface à usiner. Pour les surfaces profondes, une passe de finition intermédiaire peut être réalisée en cours d'ébauche.

Une autre approche largement répandue consiste à conserver un lien entre la pièce et la matière brute par de petites pattes. Ceci permet, sur une pièce usinée en un posage, d'usiner chacune des faces sans nécessiter de montage additionnel et, dans le cas des pièces usinées en deux posages, de s'assurer que la pièce demeure immobile jusqu'à la fin de l'usinage. Les pattes sont ensuite coupées et la surface finale est obtenue par meulage. Évidemment, puisque les pattes n'appartiennent pas à la géométrie de la pièce, des entités doivent être ajoutées. Des points, localisés sur la surface d'attache, sont créés afin de positionner les pattes. Le choix de la surface d'attache est important et celle-ci ne doit pas être une surface de référence de la pièce. Une analyse du dessin de détail est donc nécessaire pour faire ce choix. La quantité de pattes dépend de la dimension de la pièce et du type de montage. Par exemple, pour une pièce maintenue en étau, une ou plusieurs

pattes relieront la pièce à la matière brute retenue dans l'étau. Dans le cas d'une pièce faite en deux posages, des pattes se trouveront sur sa périphérie, disposées de façon à assurer la stabilité de la pièce. En général, pour les pièces typiques à l'étude, les pattes ont une épaisseur d'environ 0,030 pouce et une largeur de 0,500 pouce. La figure ci-dessous illustre la configuration pour une pièce usinée en 1 posage comportant une seule patte.

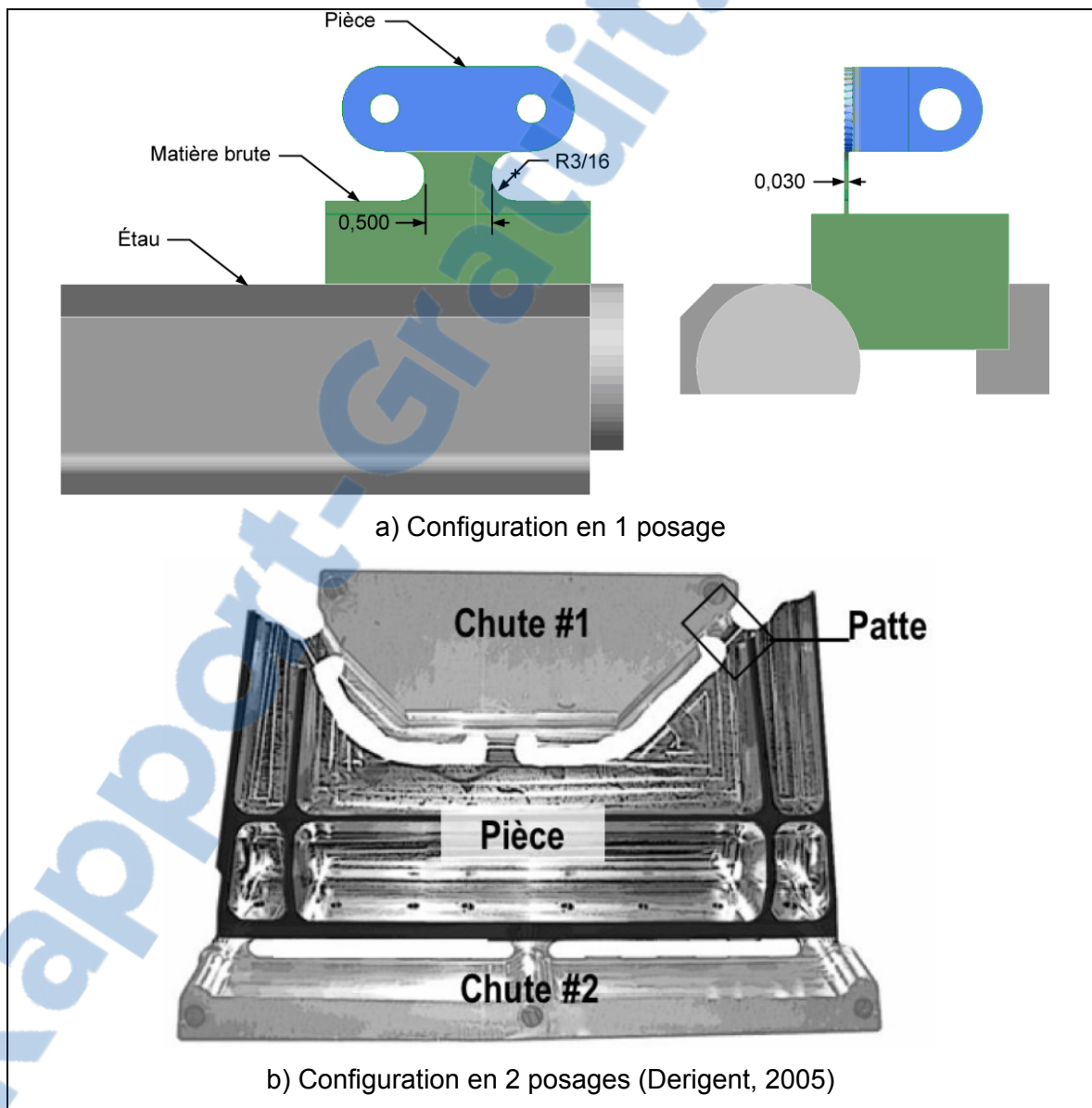


Figure 6.24 Configuration des pattes d'attache en 1 et 2 posages.

Source : La figure b) a été tirée de la thèse de M. Derigent, *Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques: Prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK*, figure 1.3, p. 25.

La configuration en 2 posages est très intéressante puisqu'elle illustre également qu'il faut tenter d'enlever une quantité minimale de matière afin d'obtenir la pièce. Ainsi, il aurait été inutile de transformer la totalité des chutes 1 et 2 en copeau, alors que cet excédent de matière peut être tout simplement enlevé par la coupe des pattes après l'usinage.

L'utilisation des pattes peut également permettre de rigidifier temporairement une longue paroi de faible épaisseur qui serait propice à la vibration lors de l'usinage. Une application possible est représentée à la figure 6.25.

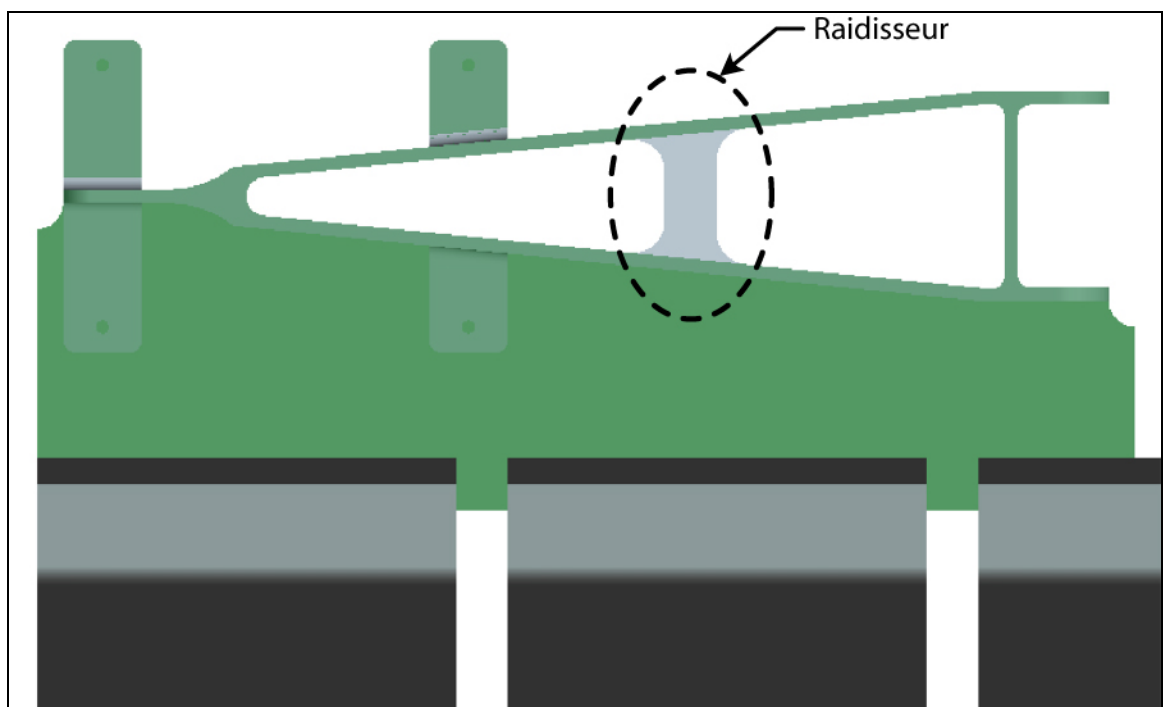


Figure 6.25 Raidisseur pour rigidifier un long mur mince.

Sur les pièces nécessitant un usinage en deux posages, il est indispensable de prévoir des éléments qui permettront de repositionner et d'orienter la pièce. Pour les cas à l'étude, une plaque de montage comportant un quadrillage de trous précis et de vis de fixation est utilisée. Des trous de précision sont donc percés au premier posage afin d'orienter la pièce par rapport à la plaque de montage. Deux trous sont suffisants, permettant de combler les

trois degrés de liberté complémentaires aux trois autres bloqués par l'appui plan de la pièce contre la plaque de montage. Pour assurer un bon positionnement, il est préférable que les trous soient éloignés l'un de l'autre. Le serrage quant à lui s'effectue à l'aide des vis de fixation filetées dans les trous préalablement percés et filetés au premier posage. Ces trous doivent être positionnés à l'extérieur de la surface limite de la pièce, tout en laissant assez de dégagement pour l'outil de coupe au moment du contournage. Lorsque possible, une vis de fixation peut également être utilisée à l'intérieur de la pièce, comme au centre d'une grande poche débouchante. Ceci permet de limiter la quantité de matière à enlever, en effectuant uniquement un contournage interne dans la poche plutôt que de transformer toute la matière à l'intérieur de la poche en copeau. Puisque ce sont toujours les mêmes filets utilisés pour maintenir la pièce, il est justifié de se procurer un outil permettant d'effectuer le centrage, le perçage et le filetage dans une même opération, contribuant à accélérer cette étape qui ne donne pas de valeur ajoutée au produit final. Outre l'orientation et la fixation de la pièce, une référence doit permettre le positionnement de la pièce. Pour ce faire, un trou de précision et percé au posage 1, avec un foret en carbure de tungstène, permettant d'obtenir une bonne précision ($0.4910 +0.0004/-0$). Un palpage au deuxième posage permet de localiser la position selon deux axes, la dernière position étant coïncidente avec le dessus de la plaque de montage.

Étant donné que la pièce sera apposée contre la plaque de montage au deuxième posage, il est utile de surélever la pièce afin d'éviter que l'outil de coupe entre en contact avec la plaque. Pour y parvenir, une surépaisseur de matière est laissée lors du surfacage au premier posage. Un deuxième surfacage est ensuite réalisé, mais délimité uniquement par le contour de la pièce, la partie externe de la matière brute conservant une surépaisseur d'environ 0,030 pouce. Cette surépaisseur sert alors à surélever la pièce au deuxième posage, comme le montre la figure 6.26.

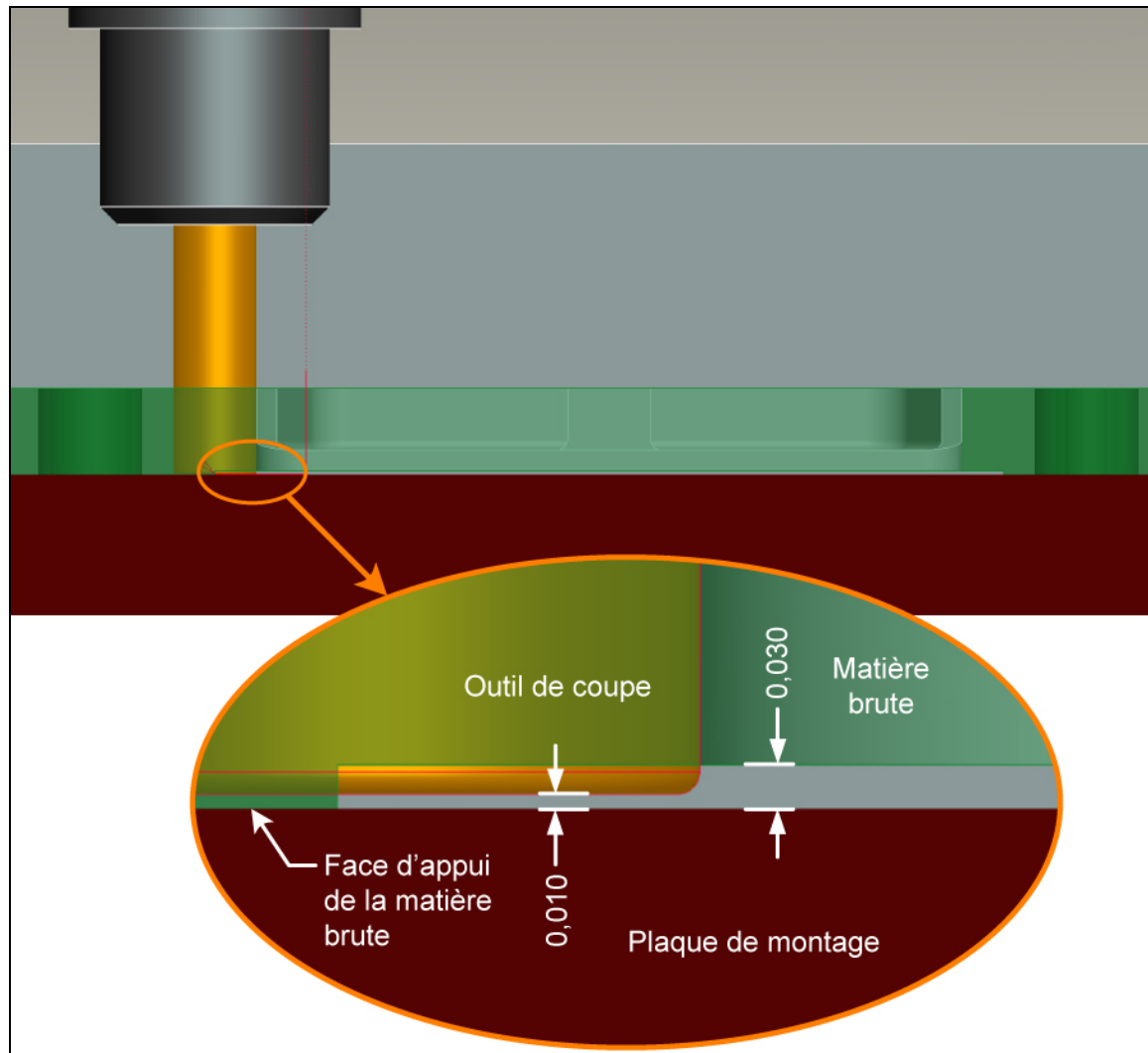


Figure 6.26 Dégagement du contour pour la finition au deuxième posage.

Une autre approche consiste à effectuer un chanfrein, lorsque possible, sur le contour de la pièce au premier posage, après avoir effectué un surfacage sans laisser aucune surépaisseur. Lorsque la pièce sera retournée pour l'usinage au deuxième posage, il sera possible d'effectuer un contournage sans risquer que l'outil de coupe interfère avec la plaque de montage. La figure 6.27 démontre la configuration obtenue.

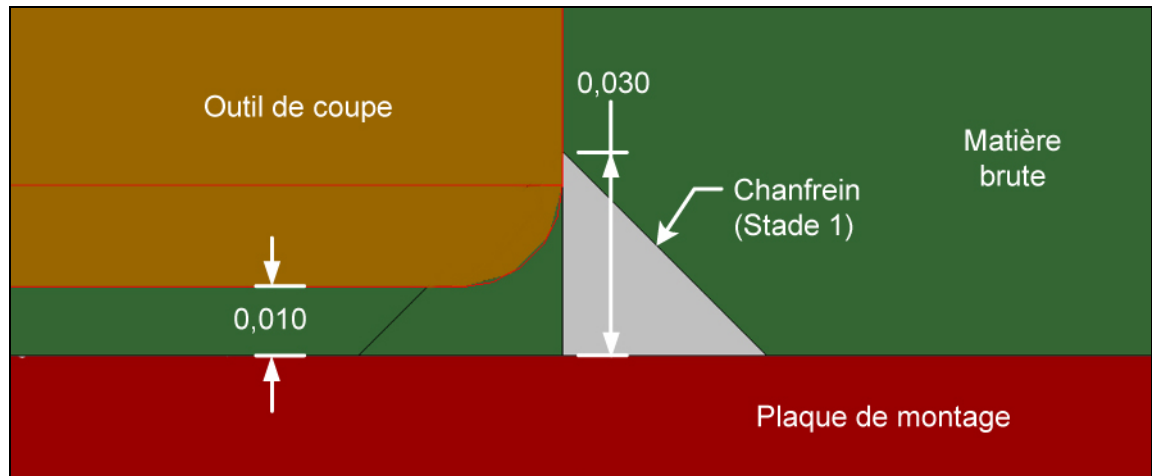


Figure 6.27 Dégagement du contour par chanfrein pour la finition au deuxième posage.

Il a été mentionné précédemment qu'il était important de minimiser la déflexion de l'outil de coupe, qui peut être représenté par une poutre encastrée en flexion. Le point d'application de l'effort de coupe sur cette poutre affecte directement la grandeur de la déflexion et dans certains cas, il est possible de contrôler ce point d'application. Par exemple, pour l'alésage d'un trou de chape précis avec une fraise en bout, il est possible de contrôler la pénétration de l'outil et d'utiliser le haut de la partie tranchante, en minimisant ainsi la déflexion de l'outil.

De façon à atteindre la qualité désirée, il est indispensable de tenir compte des tolérances dimensionnelles de la pièce. L'usinage à la cote moyenne est donc une bonne façon de faire. Il faut alors s'assurer que la géométrie sur laquelle la trajectoire est référencée est dessinée à la cote moyenne, à défaut de quoi il faudra compenser dans les paramètres de l'opération.

Toujours suivant un objectif de qualité, les éléments nécessitant une précision particulièrement fine sont réalisés avec l'application d'une compensation du rayon de l'outil, de manière à tenir compte de l'usure de l'outil de coupe. Pour ce faire, un mouvement linéaire doit être présent au début de la trajectoire de l'outil afin d'appliquer la compensation. Ce mouvement précède généralement l'entrée tangentielle circulaire en approche de la surface à usiner. Toutefois, pour les petits trous, il se peut que l'espace soit insuffisant pour

exécuter un mouvement linéaire. Celui-ci doit alors être accompli à l'extérieur de la pièce, avant que l'outil n'ait pénétré dans le trou.

Dans une optique de réduction des coûts de production et de minimisation du nombre d'outils de coupe, l'exécution des trous est réalisée à l'aide d'une fraise en bout, si le foret nécessaire n'est pas disponible. Compte tenu du fait que le foret est limité à la réalisation d'un trou de diamètre fixe, la fraise en bout est préférée pour sa versatilité. Le magasin d'outil peut donc se limiter à seulement quelques forets permettant d'effectuer la première ouverture des trous.

L'utilisation d'un faible nombre d'outils peut également s'avérer efficace pour faciliter les transitions entre les différentes surfaces de la pièce. Une stratégie permettant d'améliorer les transitions entre les opérations est d'effectuer celle-ci sur des points de tangence ou sur des arêtes plutôt que sur des surfaces droites. Les congés à l'intersection de deux surfaces nécessitent régulièrement l'utilisation d'une combinaison d'outils de coupe. Dans le cas d'une poche fermée par exemple, une ébauche permet d'abord d'enlever une grande partie de la matière. Ensuite, une finition des parois et du fond est effectuée. L'utilisation à cette étape d'une fraise en bout torique permet de faciliter la transition entre les surfaces et d'éviter la présence d'une arête vive pouvant mettre en péril la résistance de la pièce. Lorsque le rayon du congé est grand, il peut s'avérer nécessaire d'utiliser une fraise à bout hémisphérique. Pour éviter que celle-ci vienne frotter contre la paroi déjà usinée et dont la finition a été réalisée, une surépaisseur de 0.002 à 0.003 po est laissée sur la paroi et la cloison de la poche, comme illustré à la section 6.1.2.3. Lorsque le rayon de raccordement est supérieur ou égal à 5/32 po, une semi-finition est effectuée avec une surépaisseur de 0.030 po.

Dépendamment des tolérances dimensionnelles, de profil et de la qualité requise, certaines entités peuvent admettre une certaine latitude au niveau du respect de la géométrie nominale. Par exemple, dans le cas d'une face à angle fermé présentant une difficulté d'usinage, une séquence d'opération peut permettre d'approcher la géométrie sans reproduire exactement la forme originale du design (Capponi et al., 2006).

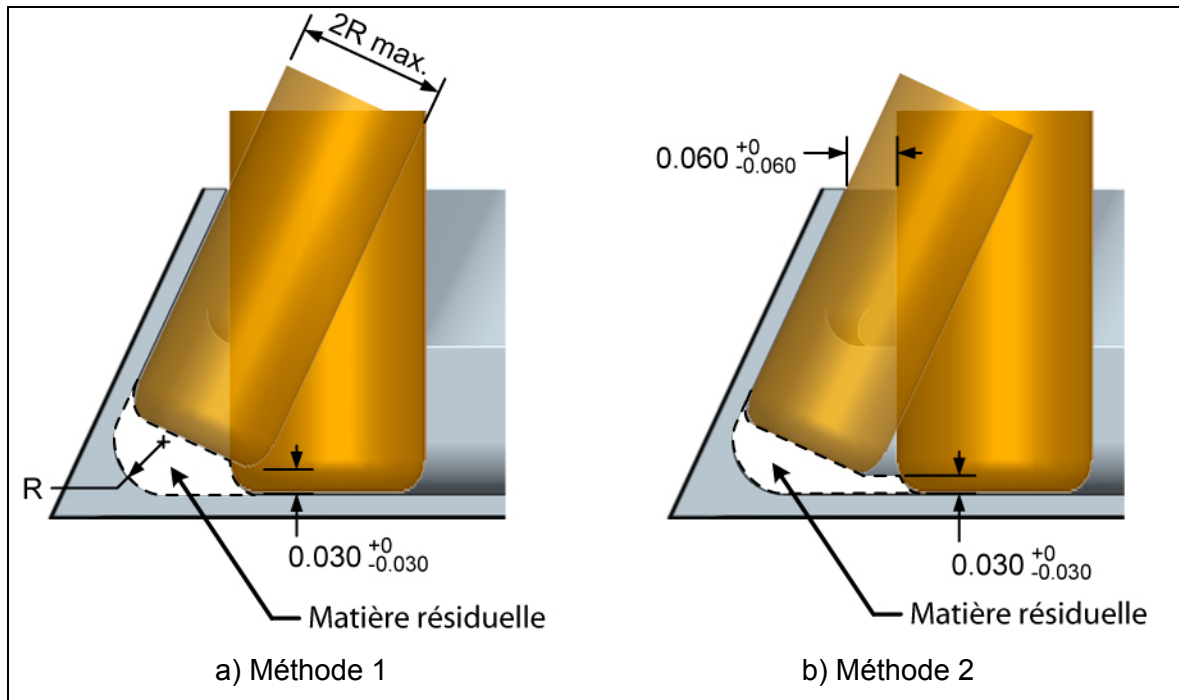


Figure 6.28 Méthode d'usinage d'un masque.

Le cas particulier de la figure 6.28 est intéressant puisqu'il illustre le fait qu'il est inutile de produire de la surqualité. En effet, l'approche habituellement adoptée pour usiner cette bordure de poche aurait été de faire une ébauche perpendiculaire au fond de la poche suivie d'un balayage de la partie inaccessible avec un outil à bout hémisphérique orienté parallèlement à la paroi inclinée. Toutefois, ce balayage implique un nombre élevé de parcours d'usinage, augmentant par le fait même le temps de fabrication de façon injustifiée. Ceci met également l'accent sur l'importance de définir clairement les requis sur la pièce.

6.1.5 Paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont probablement les informations les plus faciles à intégrer à un logiciel de programmation en FAO. De plus, ils sont sans aucun doute les éléments les plus désagréables et fastidieux à fournir pour élaborer une opération d'usinage. Plusieurs logiciels offrent des bases d'informations associées aux outils de coupe. Ces données peuvent provenir des livres de références, de manufacturiers ou bien d'analyses

expérimentales. Les valeurs provenant des manufacturiers sont souvent optimistes, les paramètres exerçant une influence directe sur l'usure des outils et par le fait même, sur les ventes des manufacturiers. Ces bases d'informations peuvent ensuite être adaptées à la MOCN utilisée et aux montages d'usinage. Une caractérisation par analyse modale peut également permettre de déterminer les bornes d'utilisation d'un outil associé à son environnement de travail. Enfin, les paramètres de coupe affectent dans une large mesure le taux d'enlèvement de matière, un des principaux objectifs. Les items suivants présentent un survol des principaux paramètres.

6.1.5.1 Vitesse de coupe

La vitesse de coupe d'un outil dépend de plusieurs facteurs. Le premier à citer est la nature du substrat de l'outil lui-même (acier rapide, carbure, diamant, ...) et de son revêtement. La nature du matériau à usiner constitue également un facteur important. Pour le cas à l'étude, le matériau est de l'aluminium allié. Les variations de nuances peuvent affecter la vitesse de coupe. Évidemment, la machine utilisée est limitée à une plage de vitesses de rotation qui pourra restreindre la vitesse de coupe, notamment sur des outils de petit diamètre. Puisque la température du copeau peut rapidement atteindre le point de fusion de l'aluminium, l'arrosage sera aussi un critère de premier ordre. Enfin, la nature de l'opération (ébauche et finition) de même que son type (usinage de poche, perçage) sont aussi des éléments déterminant la vitesse de coupe.

6.1.5.2 Avance de coupe

Un autre paramètre ayant une influence directe sur le taux d'enlèvement de matière est l'avance de coupe, déterminant l'épaisseur du copeau. L'avance de coupe affecte aussi le fini de surface, qui fait partie des requis de fabrication. Parmi les facteurs influençant sa valeur, citons la nature du matériau à usiner et de l'outil, la machine-outil et l'opération d'usinage.

Puisque les logiciels programment l'avance de coupe selon la trajectoire du centre de l'outil, il est parfois nécessaire de corriger l'avance dans les arcs. Par exemple, pour le rayon intérieur d'une poche, il est fréquent que le rayon de l'outil coïncide avec le rayon de la

géométrie ou qu'il soit légèrement inférieur. Ceci a pour effet de produire une trajectoire, au centre de l'outil, de rayon nul ou très faible. Et puisque l'avance de coupe est déterminée au centre de l'outil, la vitesse tangentielle sera infiniment grande. Il faut alors adapter la vitesse d'avance par un facteur de correction donné par l'équation suivante.

$$C_a = \frac{R_p \pm R_o}{R_p} , \text{ pour un contournage extérieur ou intérieur (voir figure 6.29)}$$

De façon générale, l'avance de coupe est diminuée à 20 % dans les coins internes pour la finition. De plus, il est préférable d'éviter d'utiliser un outil de même rayon qu'un raccordement. Par exemple, pour un raccordement de 1/4 po, un outil d'un diamètre de 7/16 po est utilisé.

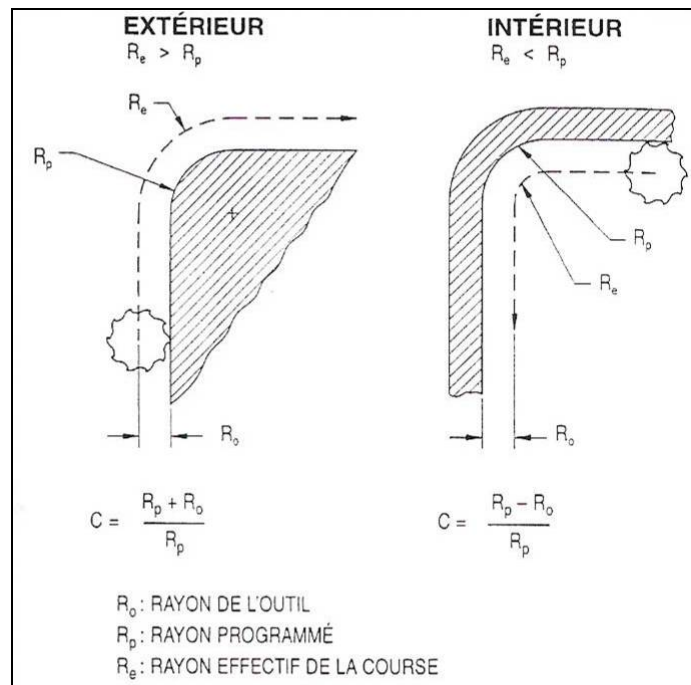


Figure 6.29 Compensation de l'avance dans un rayon.
 (Cameron, 1996)

Source : Cette figure a été tirée du livre de M. Cameron, *Technologie et usinage à commande numérique: éléments de fabrication assistée par ordinateur*, figure 4.18, p. 226.

L'avance de coupe nécessite parfois une correction pour garantir une épaisseur moyenne du copeau adéquate, selon l'engagement de l'outil dans la matière. Dans le cas d'un contournage, l'engagement radial affecte directement l'épaisseur du copeau. Ainsi, lorsque l'angle d'attaque est supérieur à 90° , le copeau atteint le maximum admissible, tandis que pour un angle d'attaque inférieur à 90° , l'épaisseur moyenne du copeau diminue. Il est alors nécessaire d'augmenter l'avance de coupe pour maintenir l'épaisseur moyenne du copeau.

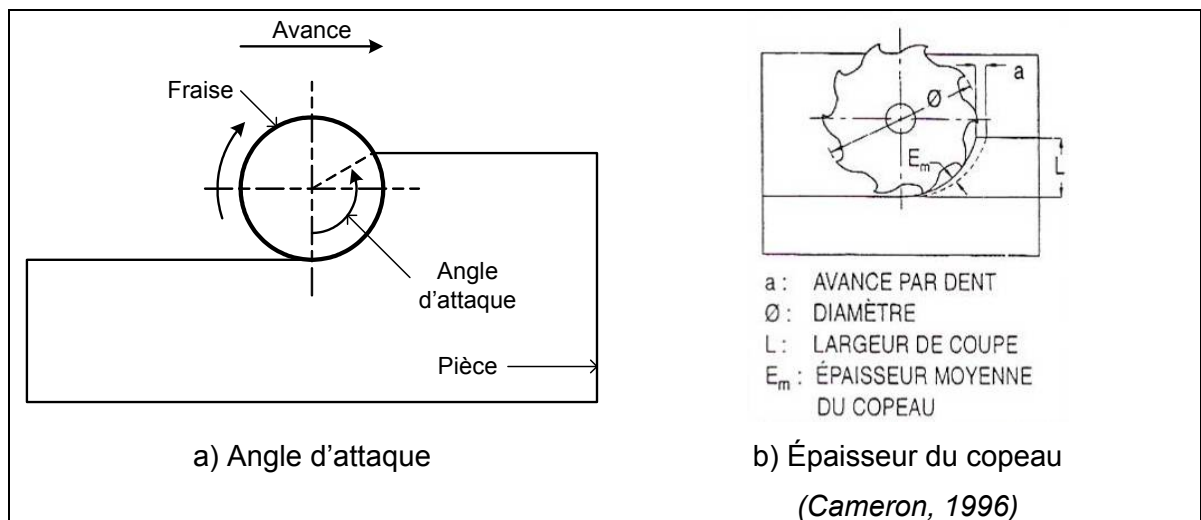


Figure 6.30 Épaisseur du copeau selon l'engagement de l'outil.

Source : La figure b) a été tirée du livre de M. Cameron, *Technologie et usinage à commande numérique: éléments de fabrication assistée par ordinateur*, figure 4.17, p. 224.

6.1.5.3 Profondeur de coupe

La profondeur de coupe peut être vue selon deux directions, soit la profondeur radiale correspondant au chevauchement latéral de l'outil sur la coupe précédente et la profondeur axiale qui correspond quant à elle à l'enfoncement de l'outil dans la matière suivant l'axe de l'outil. La profondeur est dépendante de la dimension de l'outil, soit son diamètre, la longueur de la partie tranchante et sa longueur sortie. En règle générale, lorsque le ratio d'outil est inférieur ou égal à 3 :1, la profondeur de coupe radiale et axiale correspond à la moitié du diamètre de l'outil. Pour un ratio supérieur à 3 :1, la profondeur de coupe axiale est diminuée, tandis que la profondeur radiale est maintenue à la moitié du diamètre.

La position de l'outil de coupe sur la surface à usiner peut aussi influencer le nombre de dents engagées dans la matière. En surfacage, lorsque le diamètre de l'outil est plus grand que la surface à usiner, il est préférable d'éviter de centrer l'outil sur la surface. De cette manière, un nombre maximal de dents est en contact avec la matière, comme le montre le graphique de la figure 6.31a.

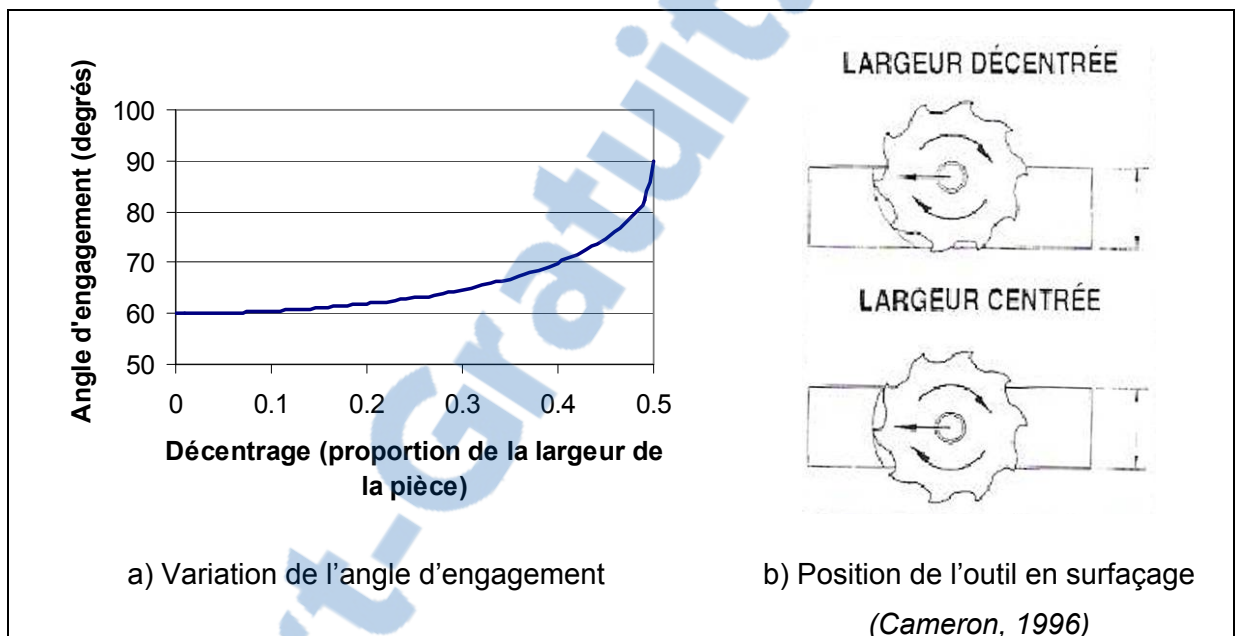


Figure 6.31 Décentrage de l'outil en surfacage.

Source : Cette figure a été tirée du livre de M. Cameron, *Technologie et usinage à commande numérique: éléments de fabrication assistée par ordinateur*, figure 4.15, p. 223.

6.1.5.4 Arrosage

En fraisage, l'arrosage joue généralement deux rôles distincts. Le premier consiste à contrôler la température générée lors de l'arrachement du copeau, par une lubrification et par transfert de chaleur. Le deuxième consiste à faciliter l'évacuation du copeau. Pendant l'usinage d'une poche fermée par exemple, les copeaux produits ont tendance à demeurer à l'intérieur de la poche. Ceux-ci risquent donc de s'interposer entre l'arête tranchante de l'outil et la matière à enlever. Évidemment, la position du montage peut favoriser

l'évacuation des copeaux, comme dans le cas des montages verticaux où les copeaux sont évacués par gravité.

6.1.5.5 Type de mouvement

Une multitude d'auteurs se sont penchés sur différents algorithmes liés au type de mouvement (Gupta, Saini, & Yao, 2001; Hwang, Wang, & Kim, ; Suh & Shin, 1996). Leurs travaux portent sur l'optimisation des mouvements et la minimisation de la longueur du parcours d'usinage. Ce sont les résultats de ces travaux qui se retrouvent dans les logiciels et qui permettent de générer automatiquement les trajets d'outil pour des opérations telles un surfacage, un contournage et un usinage de poche. Ces mouvements peuvent être en zigzag, en spirale ou bien unidirectionnel, avec une panoplie de variantes. Le choix du type de mouvement dépend généralement de la configuration de la géométrie, comme la présence d'obstacles ou d'îlots ou alors l'orientation principale des surfaces. L'ébauche des poches utilise majoritairement un mouvement en spirale, le mouvement en zigzag étant utilisé pour les opérations d'usinage en bout comme une opération de surfacage. L'usinage unidirectionnel est plutôt associé aux modes d'usinage par balayage.

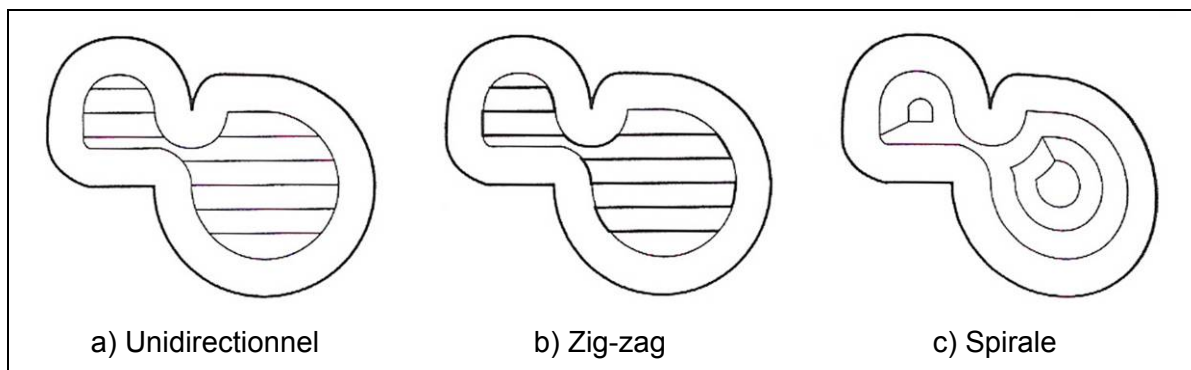


Figure 6.32 Différents types de mouvements pour l'usinage de poche.
(Cordebois, 2003)

Source : Cette figure a été tirée du livre de M. Cordebois, *Fabrication par usinage*, figure 8.29, p. 400.

En perçage, différentes options sont également disponibles pour contrôler le mouvement de l'outil selon la profondeur du trou à exécuter. Les trous de faible profondeur

(profondeur $\leq 2 \times$ diamètre du foret) sont ainsi percés directement, ceux de forte profondeur (profondeur $> 2 \times$ diamètre du foret) utilisant un cycle de perçage profond où l'outil se retire complètement du trou pour évacuer le copeau. Entre les deux catégories précédentes de trous se trouve un cycle intermédiaire de brise-copeau, où un faible retrait de l'outil permet de casser le copeau. L'entreprise rencontrée n'utilise toutefois pas cette stratégie, optant soit pour un perçage standard ou profond. De plus, l'utilisation d'un foret muni de conduits d'arrosage permet de porter la profondeur de perçage à trois fois le diamètre du foret avant de nécessiter un cycle de perçage profond.

Parmi les caractéristiques associées au choix du type de mouvement des opérations d'usinage pour la génération de la gamme, les paramètres significatifs suivants ont été retenus. Ceux-ci pourront être utilisés dans un outil d'assistance à la génération de gammes d'usinage :

- Le mode d'usinage;
- Les caractéristiques de l'entité d'usinage;
- Le type d'outil;
- Les caractéristiques des arêtes;
- Les caractéristiques de la surface.

6.1.5.6 Sens de mouvement

Les mouvements d'usinage s'effectuent en avalant plutôt qu'en conventionnel (voir figure 6.33), de manière à obtenir un meilleur fini de surface et à minimiser l'usure de l'outil de coupe.

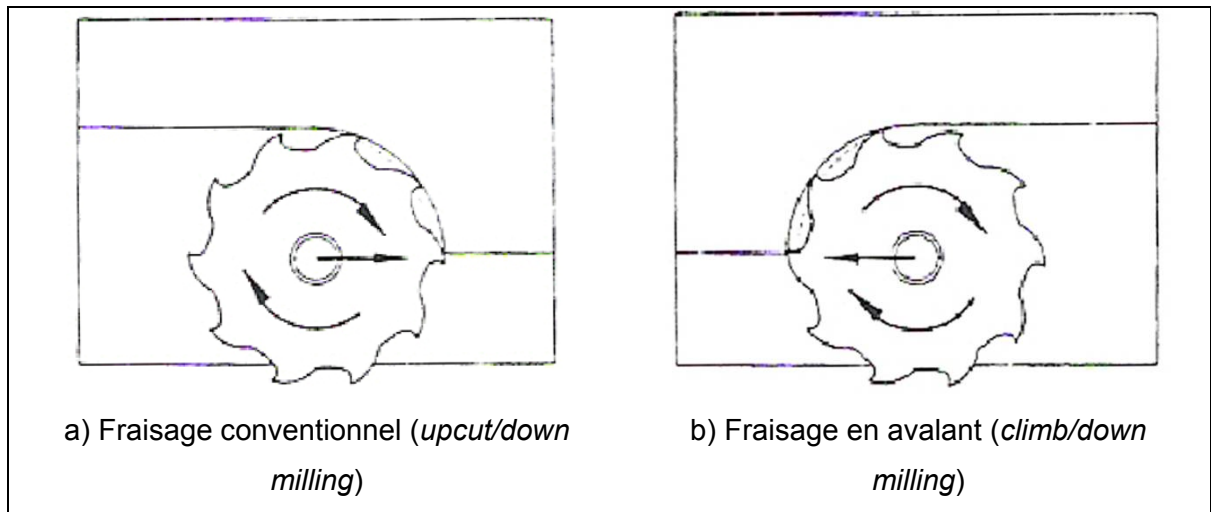
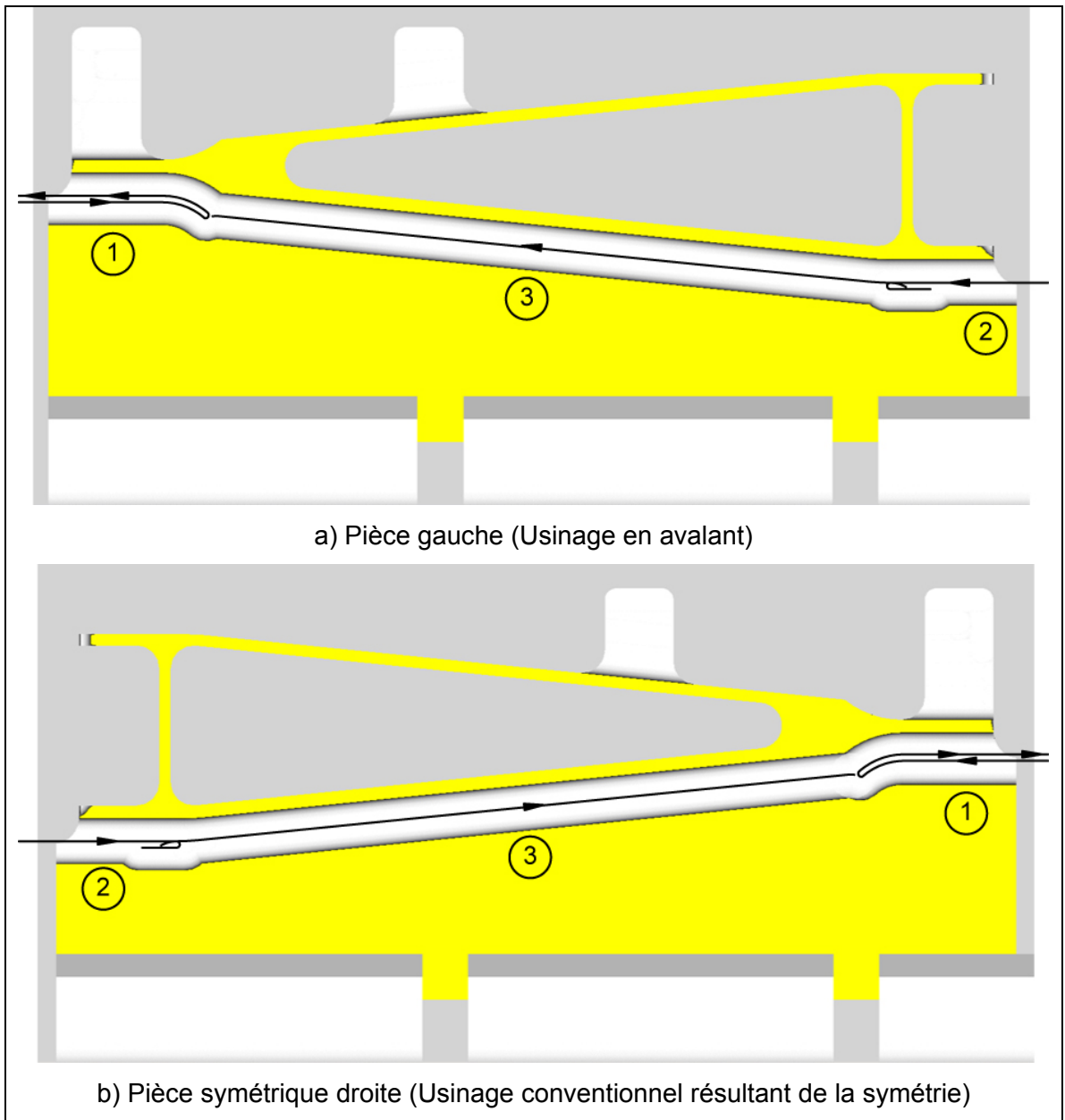


Figure 6.33 Sens de mouvement.
(Cameron, 1996)

Source : Cette figure a été tirée du livre de M. Cameron, *Technologie et usinage à commande numérique: éléments de fabrication assistée par ordinateur*, figure 4.14, p. 222.

Pour les pièces symétriques, le mouvement est inversé, afin que le sens d'usinage redevienne en avalant une fois la symétrie de la trajectoire de l'outil effectuée. Effectivement, le fait de faire une symétrie de la trajectoire inverse un mouvement en avalant en un mouvement conventionnel. Malgré cela, certaines situations nécessitent des corrections plus approfondies pour assurer une opération de qualité. La figure 6.34 représente les étapes d'obtention d'un parcours pour une pièce symétrique.



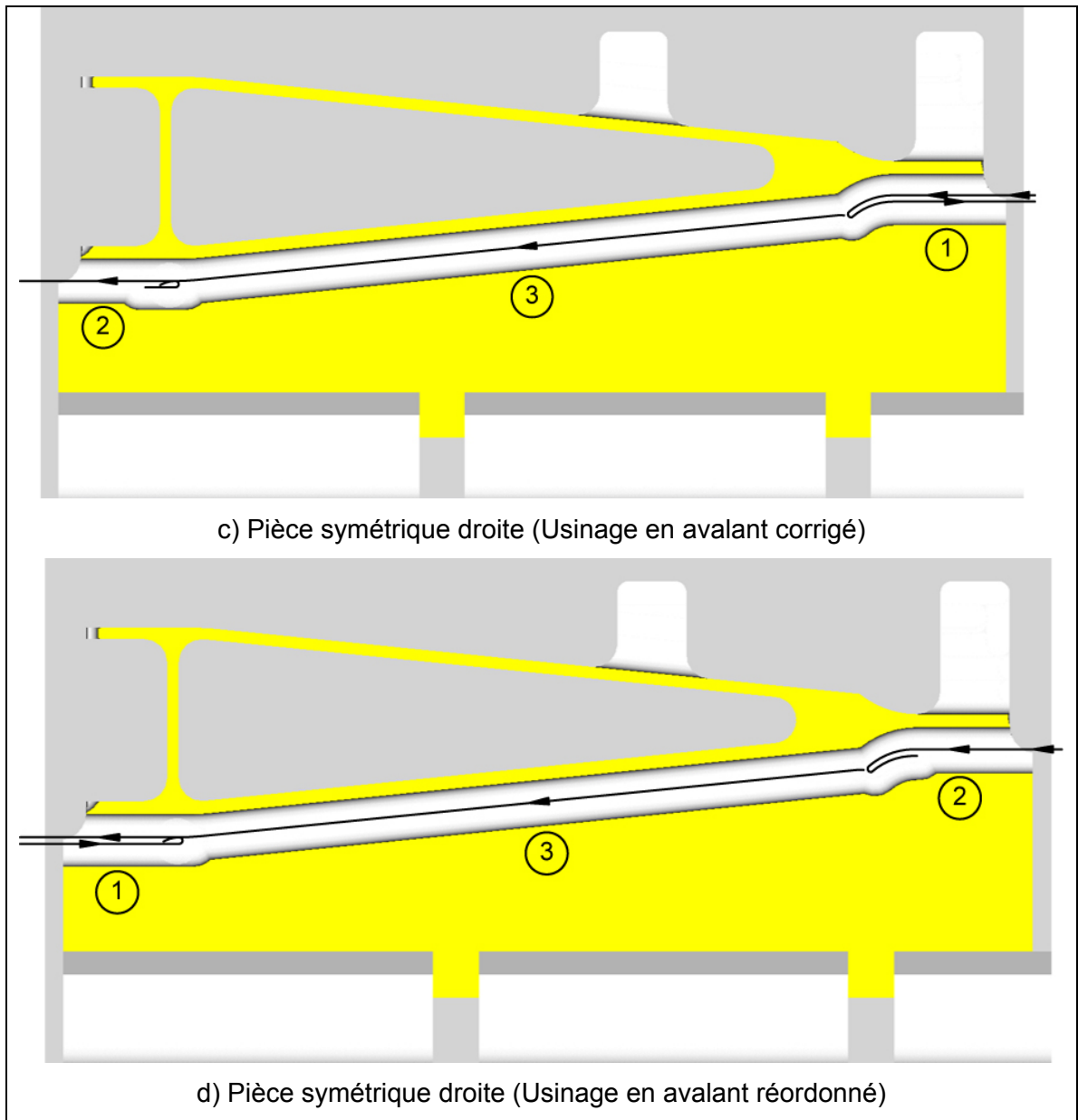


Figure 6.34 Traitement du parcours d'une pièce symétrique.

Cet exemple illustre bien l'effet que peut avoir une symétrie du parcours d'outil sur les entrées en matière. Ceci conduit alors à un réordonnancement des opérations afin de faciliter les entrées en matière. La figure 6.34c ci-haut démontre bien la sortie de matière inutile qui résulte de la symétrie du parcours 1, tandis que le parcours 2 effectue maintenant l'entrée en matière sans mouvement d'approche. La correction de l'ordre des opérations et

la modification des mouvements d'entrée/sortie permettent de corriger la situation (voir figure 6.34d).

Une autre alternative existe afin de pallier cette situation, soit l'emploi d'outils comportant une hélice inversée. Une inversion du sens de rotation suffit alors pour faire l'usinage. Ceci entraîne toutefois des coûts d'outillage plus élevés, faisant en sorte que cette alternative est intéressante pour des entreprises usinant des pièces de même famille sur des grosses séries, où le nombre d'outils est limité.

6.1.5.7 Surépaisseurs de matière

Afin de garantir une surface finale de qualité, une ébauche est généralement réalisée sur la pièce en laissant une surépaisseur de matière pour la finition et dans certains cas pour la demi-finition. Une demi-finition est réalisée quand la qualité à atteindre est élevée, comme le montre le tableau suivant.

Tableau 6.6 Niveau de finition selon les requis de conception

Rugosités	Qualités	Étapes d'usinage
$Ra \geq 6,3 \mu m$	12 et plus	Finition directe
$0,8 < Ra < 6,3 \mu m$	8 à 11	Ébauche et finition
$Ra \leq 0,8 \mu m$	6 à 7	Ébauche, demi-finition et finition

La surépaisseur de matière joue également un rôle important sur le résultat de l'usinage. Une surépaisseur trop faible ne permettra pas à l'outil d'arracher le copeau, notamment en raison de l'arrondi sur l'arête tranchante, et un écrouissage de la surface en résulte. Il est donc important de prévoir les surépaisseurs minimales présentées au tableau 6.7.

Tableau 6.7 Surépaisseurs d'usinage

Type d'outil	Étapes d'usinage	Surépaisseurs minimales
Outil tranchant	Ébauche	0,4 mm (0.015 po)
	Demi-finition	0,2 mm (0.008 po)
	Finition	0,05 mm (0.002 po)
	Alésage de finition	0,03 mm (0.001 po)
Outil abrasif	Meulage, rectification	0,01 mm (0.0004 po)

En général, pour le cas présent, une surépaisseur est conservée pour exécuter la finition après l'étape d'ébauche, autant sur les parois que sur les cloisons ainsi que sur les surfaces complexes. Les surfaces complexes nécessitant une ébauche par balayage sont usinées avec une surépaisseur de 0.130 po et une hauteur de crête de 0.020 à 0.030 po. La finition est ensuite effectuée avec une surépaisseur de 0.001 po et une hauteur de crête de 0.0005 à 0.001 po.

De plus, il semble fréquent d'effectuer la finition avec le même outil que pour l'ébauche. Ceci peut toutefois conduire à plus de dispersion sur les tolérances dimensionnelles en raison de l'usure accélérée de l'outil. La finition peut s'effectuer selon deux approches : en cours d'ébauche ou après l'ébauche. Puisque les surfaces usinées dépassent régulièrement la profondeur de coupe maximale recommandée, il est nécessaire de procéder à l'usinage par tranches, que ce soit pour l'usinage d'une poche ou pour un contournage. Il est alors possible d'effectuer la finition de la paroi à chaque niveau. Ceci a comme conséquence que plusieurs passes axiales de finition seront nécessaires. À l'inverse, si la finition est effectuée une fois l'ébauche réalisée sur tous les niveaux, il est possible d'augmenter la profondeur de coupe axiale et ainsi diminuer le nombre de passes de finition. La première approche peut s'avérer intéressante dans le cas de murs minces, la rigidité du mur étant maximisée au moment de la finition. Par contre, comme les outils d'ébauche ont une courte longueur de flute, il est fréquent qu'un outil différent soit utilisé pour la finition.

6.1.5.8 Entrée en matière

Les fraises à deux tailles sont conçues pour travailler radialement. Il est alors préférable d'éviter de plonger verticalement, malgré que certaines fraises soient munies d'une ou plusieurs lèvres de coupe permettant de couper au centre de l'outil, puisque la vitesse de rotation au centre est nulle. Dans le cas d'un contournage de l'extérieur d'une pièce, il est souvent possible de plonger dans le vide, à l'extérieur de la matière brute, et d'engager l'outil radialement dans la matière, ce qui correspond au cas idéal. Lors de l'usinage d'une poche fermée, il est impossible d'accéder latéralement à la matière, à moins qu'un trou d'accès ait été percé. Il est alors nécessaire d'effectuer une plongée verticale ou alors en rampe, linéaire ou hélicoïdale. La plongée verticale est à éviter, tandis que la plongée en rampe linéaire est choisie lorsque la dimension de la poche le permet. La plongée en rampe hélicoïdale permet quant à elle d'accommoder les poches plus restreintes. L'angle de la plongée est en général inférieur ou égal à 5° et l'avance de coupe n'est pas réduite.

6.1.5.9 Mouvement d'approche et de sortie

Au même titre que le mouvement d'entrée, le mouvement d'approche ou de sortie est influencé par le caractère de l'entité à usiner. Le mouvement est sélectionné de façon à rendre fluide l'approche de la surface pour la finition et ainsi éviter les marques d'outil sur la surface. Les surfaces externes, comme le contour de la pièce, peuvent être accédées tangentiellement par un mouvement linéaire. Les surfaces internes, comme une poche fermée, sont quant à elles approchées par un mouvement tangentiel en arc de cercle. L'angle de la portion de cercle et son rayon dépendent de la surépaisseur laissée, permettant une plongée dans le vide.

6.1.5.10 Considérations économiques sur l'usure des outils

L'utilisation d'outils avec des rayons de coins aux arêtes tranchantes contribue à diminuer l'usure. Les revêtements de surface sont également un moyen efficace pour prolonger la durée de vie des outils de coupe. Les paramètres de coupe utilisés influencent grandement le rythme d'usure de l'outil, comme démontré par l'équation de Taylor. Le choix des

paramètres de coupe doit donc considérer un juste équilibre entre le taux d'enlèvement de matière et la durée de vie des outils, d'un point de vue économique.

6.2 Synthèse des étapes de génération de la gamme

À l'intérieur de ce chapitre, une foule d'informations ont été présentées relativement aux étapes d'analyse du modèle CAO et d'élaboration du modèle FAO. Afin de remettre le tout en perspective et de simplifier l'intégration de ces connaissances dans un outil de génération de gamme, une synthèse des informations s'impose.

Lors de la génération de la gamme, des décisions sont prises afin de sélectionner les ressources, établir les opérations d'usinage et leurs paramètres. Ces décisions sont prises en fonction des caractéristiques du modèle CAO et du savoir-faire des gammistes. Le tableau suivant présente les décisions qui peuvent être prises par un outil d'assistance à la génération de la gamme et les variables associées qui influencent ces choix de façon significative.

Tableau 6.8 Synthèse du processus de génération de la gamme

Décisions	Paramètres à choisir (valeur de sortie)	Variables influentes (valeurs d'entrée)
Ressources matérielles		
Configuration du montage		
	Type de montage Plateau Équerre	Dimension d'encombrement de la pièce Vecteurs de direction d'accès Nombre de posages d'usinage État actuel du posage (1 ^{er} ou 2 ^e posage)
	Mode de fixation étai crampons-plaqueurs plaque de montage	Longueur de la boîte englobante de la pièce Largeur de la boîte englobante de la pièce Épaisseur de la boîte englobante de la pièce

Décisions	Paramètres à choisir (valeur de sortie)	Variables influentes (valeurs d'entrée)
		Ratio d'épaisseur de la boîte englobante de la pièce Nombre de posages d'usinage État actuel du posage (1 ^{er} ou 2 ^e posage) Vecteurs de direction d'accès
Choix des dimensions de la matière brute	Orientation des surfaces principales de la pièce Surépaisseurs minimales de matière à enlever sur les surfaces brutes	Volume prismatique minimal de la boîte englobante de la pièce Aire des surfaces planes Normales au plan Faces de référence Largeur de la boîte englobante de la pièce Épaisseur de la boîte englobante de la pièce Ratio d'épaisseur de la boîte englobante de la pièce Type de montage Mode de fixation
Outils de coupe		
	Type d'outil Fraise torique Fraise hémisphérique Foret Taraud ... (selon le magasin d'outil)	Type d'entité Entités voisines Mode d'usinage Dimensions Tolérances
	Diamètre ... (selon le magasin d'outil)	Épaisseur de cloison Volume de matière à enlever Rayon de courbure minimal extérieur matière Distance maximale/minimale entre arêtes délimitant la face
	Longueur sortie ... (selon le magasin d'outil)	Longueur maximale des génératrices Distance maximale de la face au brut de la pièce selon la normale du plan

Décisions	Paramètres à choisir (valeur de sortie)	Variables influentes (valeurs d'entrée)
		Longueur du porte-outil
	Longueur coupante ... (selon le magasin d'outil)	Longueur maximale des génératrices Profondeur de coupe axiale
	Rayon de coin ... (selon le magasin d'outil)	Rayon de la surface balayée à rayon constant Convexité / concavité

Opérations d'usinage		
Détermination des opérations d'usinage		
	Modes d'usinage Usinage en bout Usinage en flanc Usinage en flanc multiaxes Usinage en balayage Usinage axial Usinage spécial	Type d'entité Vecteur de direction d'accès de l'entité Outils Montage d'usinage/Orientation Dimensions Tolérances
Ordonnancement des opérations		
	Position hiérarchique de l'opération	Caractéristiques intrinsèques de l'entité d'usinage Caractéristiques extrinsèques de l'entité d'usinage Montage d'usinage/Orientation Mode d'usinage Numéro d'outil Antériorités technologiques Volume de matière à enlever Qualification des arêtes de la face Épaisseur de cloison Entités de construction Taux d'enlèvement de matière Surface de référence Numéro du posage

Paramètres de coupe		
	Vitesse de coupe	Matériau de l'outil et revêtement Matériau de la matière à usiner Type d'arrosage

Décisions	Paramètres à choisir (valeur de sortie)	Variables influentes (valeurs d'entrée)
		Nature de l'opération (ébauche, finition...) Mode d'usinage MOCN (plage de vitesse, rigidité, ...)
	Avance de coupe	Matériau de l'outil et revêtement Matériau de la matière à usiner MOCN Mode d'usinage Fini de surface Type de trajectoire (linéaire, courbe) Engagement de l'outil sans la matière/angle d'attaque
	Profondeur de coupe	Diamètre de l'outil de coupe Longueur tranchante Longueur sortie Ratio de longueur (longueur/diamètre) Type d'arrosage MOCN Rayon de coin de l'outil
	Arrosage Huile soluble Brouillard d'huile À travers la broche	Type d'outil Type de montage Matériau de la matière à usiner Matériau de l'outil et revêtement MOCN
	Type de mouvement Zigzag Spirale Unidirectionnel Perçage standard Perçage profond	Mode d'usinage Caractéristiques de l'entité d'usinage Type d'outil Caractéristiques des arêtes Caractéristiques de la surface
	Sens du mouvement Avalant Conventionnel	Fini de surface Pièce symétrique
	Surépaisseur de matière	Fini de surface Type d'outil (tranchant, abrasif) Nature de l'opération (ébauche, finition...) Mode d'usinage

Décisions	Paramètres à choisir (valeur de sortie)	Variables influentes (valeurs d'entrée)
		Épaisseur de cloison Longueur maximale des génératrices Distance maximale de la face au brut de la pièce selon la normale du plan
	Entrée en matière Linéaire radiale Linéaire axiale Rampe linéaire Rampe hélicoïdale	Type d'outil Mode d'usinage Accessibilité Caractéristiques de l'entité d'usinage Caractéristiques des arêtes Caractéristiques de la surface
	Mouvement d'approche et de sortie Linéaire normale Linéaire tangente Radiale tangente	Nature de l'opération (ébauche, finition...) Mode d'usinage Surépaisseur de matière Diamètre de l'outil de coupe

Ce tableau résume les différentes étapes de génération d'une gamme d'usinage, excluant le choix de la machine-outil. Le processus est décomposé en trois grandes catégories, soit le choix des ressources, le choix des opérations et la sélection des paramètres de coupe. La première catégorie propose les variables de décision pour les choix liés au montage d'usinage et aux outils de coupe. La deuxième catégorie suggère les variables influentes pour la détermination des opérations d'usinage et leur ordonnancement. Enfin, la dernière catégorie propose des variables pour le choix de neuf paramètres de coupe fréquemment rencontrés. Au total, 19 décisions sont présentées dans ce tableau, tandis que près d'une centaine de variables influentes contribuent à guider ces décisions. Ceci indique que le problème de génération automatique de gammes d'usinage en est un de taille, malgré le fait que l'application ait été limitée au cas bien particulier des pièces aéronautiques structurales usinée sur une machine-outil sélectionnée.

CHAPITRE 7

ÉTUDE DE CAS ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Afin de valider l'exhaustivité des paramètres significatifs recensés, un exemple est présenté. La pièce choisie correspond à une pièce aéronautique de faible complexité. Une pièce simple comportant un nombre d'entité faible est choisie afin d'alléger le traitement manuel de l'étude de cas. Ce type de pièce représente tout de même un grand nombre de composants aéronautiques usuels.

Comme exposé au chapitre 1, on procèdera à une évaluation des ressources disponibles mises en relation avec les informations provenant du requis de fabrication. Une gamme de fabrication sera ensuite élaborée à la lumière des informations contenues dans les chapitres précédents.

7.1 Génération de la gamme d'usinage

Les objectifs de la gamme d'usinage sont de minimiser le temps d'usinage, de respecter la qualité exigée par le bureau d'études et de minimiser le nombre de posages. Comme établi auparavant, la MOCN disponible est une fraiseuse à quatre axes comportant une table de montage à cinq faces. Elle est munie d'un magasin d'outil possédant une variété d'outils de coupe d'usage commun.

7.1.1 Analyse de la géométrie et choix des ressources

La géométrie de la pièce est illustrée à la figure suivante.

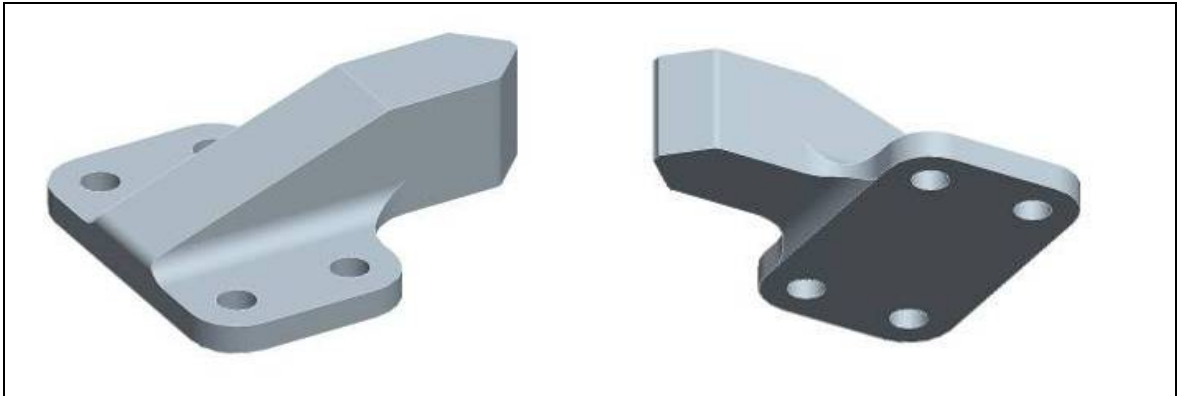


Figure 7.1 Représentation de la pièce exemple.

La première étape consiste en l'évaluation des requis provenant du bureau d'études. Les documents permettant d'obtenir l'information sur la pièce à usiner sont le modèle CAO et le dessin de fabrication. Ce dernier indique que le matériau utilisé pour fabriquer la pièce est un aluminium allié du type 7475-T7351. Les tolérances de la pièce sont générales, dans la majorité des cas, sauf pour la largeur de la protubérance et les trous où une tolérance particulière est spécifiée (voir ANNEXE I). Les trous doivent également respecter la tolérance géométrique de positionnement rattachée aux surfaces références A, B et C qui correspondent respectivement à la surface 30 (voir la numérotation à la figure 7.4), au plan de symétrie de la pièce et à la surface 1. Cette tolérance géométrique fournit une indication quant aux surfaces qui devraient être usinées dans un même montage d'usinage. Les géométries non fonctionnelles, comme les arrondis, répondent quant à elles aux tolérances générales de forme spécifiées dans les normes internes de l'entreprise. La figure 7.2 présente quelques informations sur la pièce à usiner.

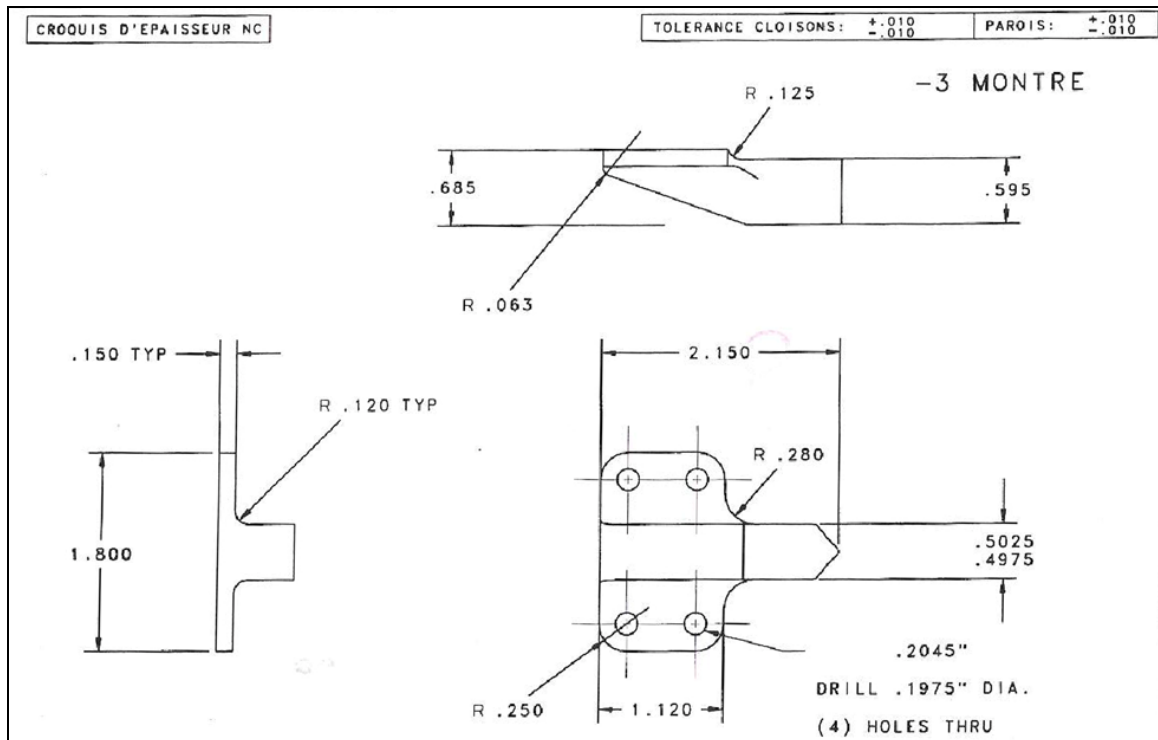


Figure 7.2 Croquis d'épaisseur de la pièce exemple.
(Bombardier-Aéronautique)

Source : Cette figure a été tirée de la documentation interne de Bombardier Aéronautique.

Le modèle CAO fournit quant à lui une multitude d'informations sur la géométrie, puisqu'il contient toutes les arêtes et les surfaces associées à la pièce. L'extraction de ces informations est présentée ci-dessous.

7.1.1.1 Types de géométrie et enrichissement

L'évaluation de la pièce à fabriquer nous conduit à la conclusion que l'usinage ne nécessite pas de précaution particulière pour assurer la qualité requise, les tolérances étant relativement larges. La phase d'enrichissement de la géométrie permet de caractériser la pièce en détail par des attributs qui guideront la reconnaissance des entités d'usinage. La figure 7.3 illustre les arêtes de la pièce et leur numérotation.

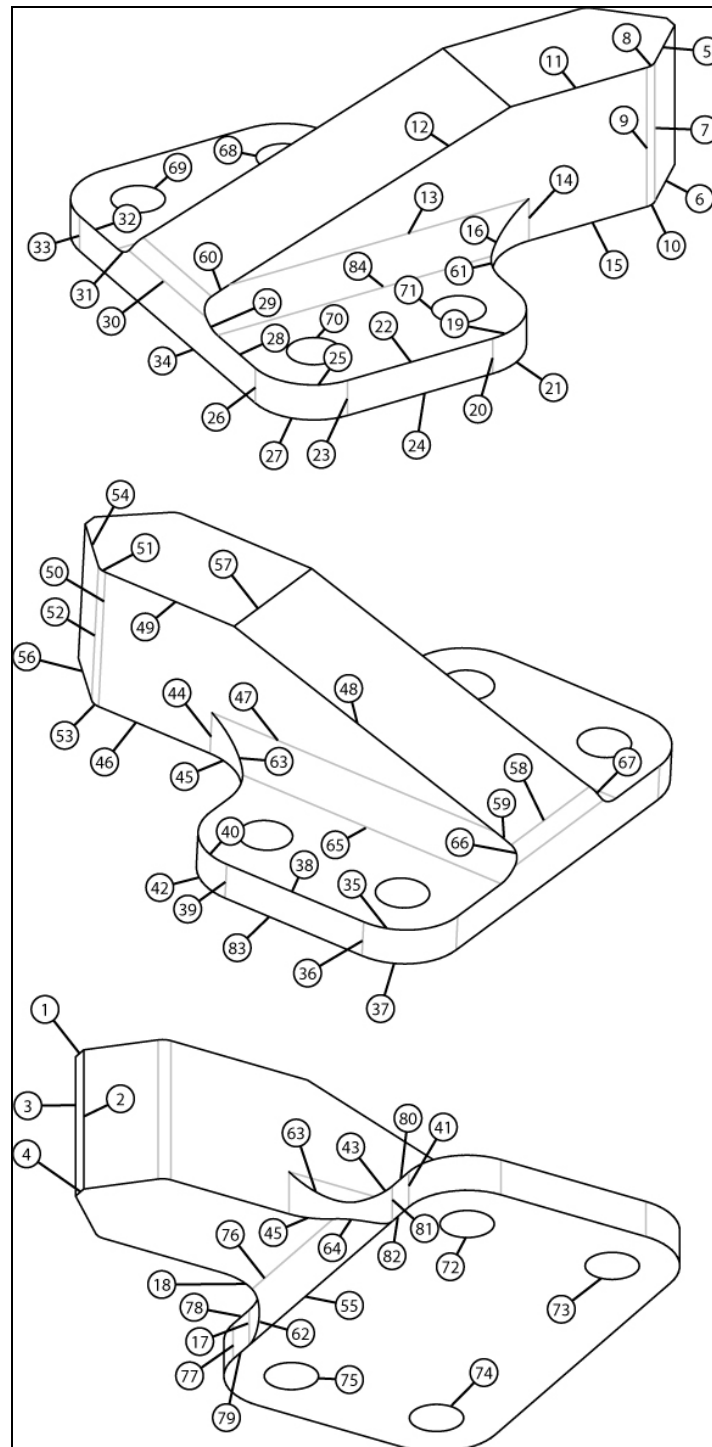


Figure 7.3 Analyse des arêtes de la pièce exemple.

Le tableau 7.1 représente la phase d'enrichissement manuel des arêtes de la pièce exemple, où on lui attribue des caractéristiques additionnelles.

Tableau 7.1 Enrichissement des arêtes de la pièce exemple

Numéro de l'arête	Type	Qualification	Faces adjacentes	Angle des faces adjacentes
A1	Droite	Ouverte	1-19	270°
A2	Droite	Ouverte	1-18	225°
A3	Droite	Ouverte	1-2	225°
A4	Droite	Ouverte	1-32	270°
A5	Droite	Ouverte	2-19	270°
A6	Droite	Ouverte	2-32	270°
A7	Droite	Tangente-ouverte	2-3	180°
A8	Circulaire	Ouverte	3-19	270°
A9	Droite	Tangente-ouverte	3-4	180°
A10	Circulaire	Ouverte	3-32	270°
A11	Droite	Ouverte	4-19	270°
A12	Droite	Ouverte	4-20	270°
A13	Droite	Tangente-fermée	4-23	180°
A14	Droite	Tangente-fermée	4-5	180°
A15	Droite	Ouverte	4-32	270°
A16	Circulaire	Ouverte	5-23	Variable
A17	Droite	Tangente-fermée	5-6	180°
A18	Circulaire	Ouverte	5-32	270°
A19	Circulaire	Ouverte	7-24	270°
A20	Droite	Tangente-ouverte	7-8	180°
A21	Circulaire	Ouverte	7-30	270°
A22	Droite	Ouverte	8-24	270°
A23	Droite	Tangente-ouverte	8-9	180°
A24	Droite	Ouverte	8-30	270°
A25	Circulaire	Ouverte	9-24	270°
A26	Droite	Tangente-ouverte	9-10	180°
A27	Circulaire	Ouverte	9-30	270°

Numéro de l'arête	Type	Qualification	Faces adjacentes	Angle des faces adjacentes
A28	Droite	Ouverte	10-24	270°
A29	Circulaire	Ouverte	10-23	270°
A30	Droite	Tangente-ouverte	10-25	180°
A31	Circulaire	Ouverte	10-22	270°
A32	Droite	Ouverte	10-21	270°
A33	Droite	Tangente-ouverte	10-11	180°
A34	Droite	Ouverte	10-30	270°
A35	Circulaire	Ouverte	11-21	270°
A36	Droite	Tangente-ouverte	11-12	180°
A37	Circulaire	Ouverte	11-30	270°
A38	Droite	Ouverte	12-21	270°
A39	Droite	Tangente-ouverte	12-13	180°
A40	Droite	Ouverte	13-21	270°
A41	Droite	Tangente-ouverte	13-14	180°
A42	Circulaire	Ouverte	13-30	270°
A43	Circulaire	Ouverte	15-21	270°
A44	Droite	Tangente-fermée	15-16	180°
A45	Circulaire	Ouverte	15-32	270°
A46	Droite	Ouverte	16-32	270°
A47	Droite	Tangente-fermée	16-22	180°
A48	Droite	Ouverte	16-20	270°
A49	Droite	Ouverte	16-19	270°
A50	Droite	Tangente-ouverte	16-17	180°
A51	Circulaire	Ouverte	17-19	270°
A52	Droite	Tangente-ouverte	17-18	180°
A53	Circulaire	Ouverte	17-32	270°
A54	Droite	Ouverte	18-19	270°
A55	Droite	Ouverte	30-31	254°
A56	Droite	Ouverte	18-32	270°
A57	Droite	Ouverte	19-20	199°
A58	Droite	Tangente-ouverte	20-25	180°

Numéro de l'arête	Type	Qualification	Faces adjacentes	Angle des faces adjacentes
A59	Droite	Ouverte	20-22	Variable
A60	Droite	Ouverte	20-23	Variable
A61	Circulaire	Ouverte	5-24	270°
A62	Circulaire	Ouverte	5-31	Variable
A63	Circulaire	Ouverte	15-22	Variable
A64	Circulaire	Ouverte	15-31	Variable
A65	Droite	Tangente-fermée	21-22	180°
A66	Circulaire	Ouverte	22-25	270°
A67	Circulaire	Ouverte	23-25	270°
A68	Circulaire	Ouverte	21-26	270°
A69	Circulaire	Ouverte	21-27	270°
A70	Circulaire	Ouverte	24-28	270°
A71	Circulaire	Ouverte	24-29	270°
A72	Circulaire	Ouverte	26-30	270°
A73	Circulaire	Ouverte	27-30	270°
A74	Circulaire	Ouverte	28-30	270°
A75	Circulaire	Ouverte	29-30	270°
A76	Droite	Tangente-fermée	31-32	180°
A77	Droite	Tangente-ouverte	6-7	180°
A78	Droite	Ouverte	6-24	270°
A79	Droite	Ouverte	6-30	270°
A80	Droite	Ouverte	14-21	270°
A81	Droite	Tangente-fermée	14-15	180°
A82	Droite	Ouverte	14-30	270°
A83	Droite	Ouverte	12-30	270°
A84	Droite	Tangente-ouverte	23-24	270°

La phase d'enrichissement des arêtes représente une étape qui est facilement automatisable puisque les informations sont aisément extractibles. À ces attributs, la longueur des arêtes et le rayon de courbure minimal extérieur matière pourraient être ajoutés également.

Ensuite, une analyse des surfaces est exécutée, permettant de faire le lien entre les surfaces et leurs arêtes respectives. Ceci correspond en fait au graphe d'adjacence. La numérotation des surfaces est présentée dans la figure 7.4 ci-dessous.

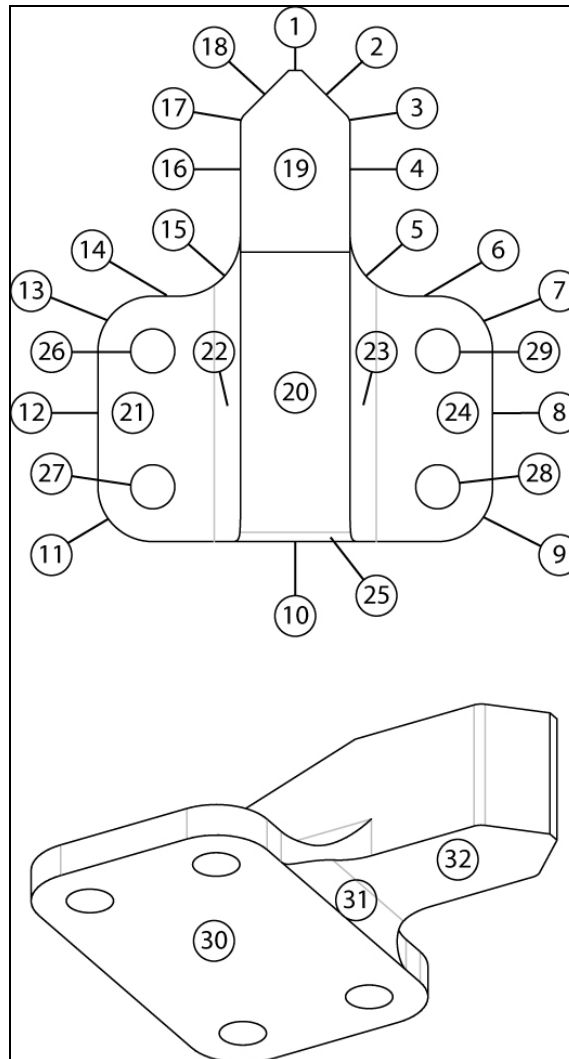


Figure 7.4 Analyse des surfaces de la pièce exemple

Le tableau ci-dessous montre le résultat de l'enrichissement manuel des surfaces de la pièce exemple, incorporant le type de surface, les arêtes délimitant la surface, les surfaces adjacentes de même que la nature de la surface qui est dictée par la nature des arêtes délimitant la surface. Ceci guidera l'assignation des entités à l'étape suivante.

Tableau 7.2 Enrichissement des surfaces de la pièce exemple

Numéro de surface	Type	Arêtes	Adjacence	Nature
S1	Plane	1-2-3-4	2-18-19-32	Ouverte
S2	Plane	3-5-6-7	1-3-19-32	Ouverte
S3	Cylindrique convexe	7-8-9-10	2-4-19-32	Ouverte
S4	Plane	9-11-12-13-14-15	3-5-19-20-23-32	Semi-ouverte
S5	Cylindrique concave	14-16-17-18-19-61-62	4-6-23-24-31-32	Semi-ouverte
S6	Plane	17-77-78-79	5-7-24-30	Semi-ouverte
S7	Cylindrique convexe	19-20-21-77	6-8-24-30	Ouverte
S8	Plane	20-22-23-24	7-9-24-30	Ouverte
S9	Cylindrique convexe	23-25-26-27	8-10-24-30	Ouverte
S10	Plane	26-28-29-30-31-32-33-34	9-11-21-22-23-24-25-30	Ouverte
S11	Cylindrique convexe	33-35-36-37	10-12-21-30	Ouverte
S12	Plane	36-38-39-83	11-13-21-30	Ouverte
S13	Cylindrique convexe	39-40-41-42	12-14-21-30	Ouverte
S14	Plane	41-80-81-82	13-15-21-30	Semi-ouverte
S15	Cylindrique concave	43-44-45-63-64-81	14-16-21-22-31-32	Semi-ouverte
S16	Plane	44-46-47-48-49-50	15-17-19-20-22-32	Semi-ouverte
S17	Cylindrique convexe	50-51-52-53	16-18-19-32	Ouverte
S18	Plane	2-52-54-56	1-17-19-32	Ouverte
S19	Plane	1-5-8-11-49-51-54-57	1-2-3-4-16-17-18-20	Ouverte
S20	Plane	12-48-57-58-59-60	4-16-19-22-23-25	Ouverte
S21	Plane	32-35-38-40-43-65-68-69-80	10-11-12-13-14-15-22-26-27	Semi-ouverte
S22	Cylindrique concave	31-47-59-63-65-66	10-15-16-20-21-25	Semi-ouverte
S23	Cylindrique concave	13-16-29-60-67-84	4-5-10-20-24-25	Semi-ouverte

Numéro de surface	Type	Arêtes	Adjacence	Nature
S24	Plane	19-22-25-28-61-70-71-78-84	5-6-7-8-9-10-23-28-29	Semi-ouverte
S25	Cylindrique convexe	30-58-66-67	10-20-22-23	Ouverte
S26	Cylindrique concave	68-72	21-30	Ouverte
S27	Cylindrique concave	69-73	21-30	Ouverte
S28	Cylindrique concave	70-74	24-30	Ouverte
S29	Cylindrique concave	71-75	24-30	Ouverte
S30	Plane	21-24-27-34-37-42-55-72-73-74-75-79-82-83	6-7-8-9-10-11-12-13-14-26-27-28-29-31	Ouverte
S31	Cylindrique concave	55-62-64-76	5-15-30-32	Semi-ouverte
S32	Plane	4-6-10-15-18-45-46-53-56-76	1-2-3-4-5-15-16-17-18-31	Semi-ouverte

Ici également, l'enrichissement des surfaces est une opération qui se prête bien à un contexte d'automatisation. De nombreux autres attributs pourraient être associés à chacune des surfaces. Afin d'illustrer l'étendue des informations qui sont associées aux surfaces, le tableau suivant présente l'enrichissement des surfaces 1 et 3, en reprenant les variables influentes soulevées au chapitre 5.

Tableau 7.3 Enrichissement détaillé des surfaces 1 et 3

Attributs	Surface 1	Surface 3	Automatisation
Type	Plane	Cylindrique	Facile
Nature	Ouverte	Ouverte	Facile
Convexité / concavité	-	Convexe	Facile
Rayon de courbure minimal extérieur matière	-	-	Facile
Aire de la face	0.0357	0.0292	Facile
Périmètre de la face	1.252	1.288	Facile
Indicateur d'élément mince	non	non	Difficile
Indicateur de raccordement	non	oui	Difficile
Longueur maximale des génératrices	0.595	0.595	Facile

Attributs	Surface 1	Surface 3	Automatisation
Axe du cylindre	-	(0 0 1)	Facile
Rayon du cylindre	-	0.063	Facile
Origine du cylindre	-	(.437;-.246;.090)	Facile
Normale au plan	(0 1 0)	-	Facile
Distance maximale/minimale entre les arêtes délimitant la face	0.031/0.595	-	Facile

Le tableau démontre les valeurs que peuvent prendre les attributs en plus de fournir une appréciation du niveau de difficulté pour extraire ces informations de façon automatique. L'automatisation peut s'effectuer facilement pour la majorité des attributs, tandis que les indicateurs d'élément mince et de raccordement nécessitent un traitement informatique plus élaboré.

À une étape plus avancée de la génération de la gamme, des attributs supplémentaires pourront être associés aux surfaces. Ces attributs sont : l'indicateur d'accessibilité en bout, l'indicateur d'accessibilité en flanc, la distance maximale de la face à la boîte englobante de la pièce selon les génératrices et la distance maximale de la face au brut de la pièce selon la normale au plan. Ces attributs sont dépendants des dimensions et du positionnement de la matière brute.

7.1.1.2 Entités d'usinage

Une fois l'enrichissement fait sur la géométrie, il est possible d'associer une entité à chacune des surfaces en analysant la qualification des arêtes la composant. Le tableau 7.4 présente les résultats obtenus pour la pièce exemple.

Tableau 7.4 Première évaluation des entités de la pièce exemple

Numéro de l'entité	Surface associée	Type	Numéro de l'entité	Surface associée	Type
E1	S1	Plan libre	E17	S17	Raccordement
E2	S2	Plan libre	E18	S18	Plan libre
E3	S3	Raccordement	E19	S19	Plan libre

Numéro de l'entité	Surface associée	Type	Numéro de l'entité	Surface associée	Type
E4	S4	Plan libre	E20	S20	Plan libre
E5	S5	Raccordement	E21	S21	Plan libre
E6	S6	Plan libre	E22	S22	Raccordement
E7	S7	Raccordement	E23	S23	Raccordement
E8	S8	Plan libre	E24	S24	Plan libre
E9	S9	Raccordement	E25	S25	Raccordement
E10	S10	Plan libre	E26	S26	Alésage
E11	S11	Raccordement	E27	S27	Alésage
E12	S12	Plan libre	E28	S28	Alésage
E13	S13	Raccordement	E29	S29	Alésage
E14	S14	Plan libre	E30	S30	Plan libre
E15	S15	Raccordement	E31	S31	Raccordement
E16	S16	Plan libre	E32	S32	Plan libre

La pièce est composée de plans libres, de raccordements et d'alésages. Les plans libres laissent une latitude quant au mode d'usinage (en bout ou en flanc), qui sera déterminé selon le posage choisi et en fonction des relations d'adjacence entre les surfaces ou de simultanéité.

Le tableau suivant présente le résultat d'une analyse détaillée des entités 1 et 3, en utilisant les attributs proposés pour les entités d'usinage comme présenté au chapitre 6.

Tableau 7.5 Enrichissement détaillé des entités 1 et 3

Attributs	Entité 1	Entité 3	Automatisation
Type	Plan libre	Raccordement	Difficile
Forme géométrique	Surfacique	Surfacique	Difficile
État brut et gestion des états	Semi-fini	Semi-fini	Facile
Qualité – Précision	+/- 0.010 po	+/- 0.010 po	Difficile
Qualité – État de surface	125 µpo (Ra)	125 µpo (Ra)	Difficile
Matériau – Matière	Aluminium	Aluminium	Facile
Matériau – Dureté	135 Br.	135 Br.	Facile

Attributs	Entité 1	Entité 3	Automatisation
Positionnement local	(0 0 0.388)	(0.245 -0.222 0.388)	Difficile
Interaction topologique	Aucune	Aucune	Difficile
Visibilité	Sphère Gauss	Sphère Gauss	Difficile

L'association des surfaces à des entités d'usinage représente une étape essentielle du passage de la CAO à la FAO. Cette classification des entités permet de s'approcher d'un contexte d'usinage en associant des caractéristiques propres à celle-ci. Ainsi, des conclusions partielles peuvent être tirées quant au mode d'usinage, selon le type d'entité par exemple. Point intéressant à noter, chacune des entités peut être subdivisée en sous-entité afin de refléter l'évolution de l'état de la pièce brute. Par exemple, l'entité 1 passera par un état brut, pour ensuite atteindre un état semi-fini et finalement fini, en fonction des différentes étapes d'usinage. Des attributs sont également associés au niveau de qualité permettant d'orienter le choix des outils ou les paramètres de coupe. Le positionnement contribuera quant à lui à l'ordonnancement des opérations d'usinage.

À cette étape de l'analyse, la visibilité est représentée par un point, une courbe ou une surface sur la sphère de Gauss, sans tenir compte de la dimension de l'outil de coupe. Une analyse subséquente est effectuée afin de déterminer l'accessibilité de l'entité, une fois le posage complété. Ceci assure que la totalité de la pièce peut être usinée selon la configuration de la machine. Une même entité peut comporter plus d'une direction d'accès, ce qui laisse place à différentes combinaisons pour la fabrication, notamment au niveau de l'orientation de la pièce selon les degrés de liberté de la machine sélectionnée. Le tableau 7.5 illustre également que cette étape présente un niveau de difficulté important afin de permettre l'automatisation de l'enrichissement des entités. Un traitement informatique plus élaboré sera ainsi nécessaire afin d'obtenir les attributs pour chaque entité d'usinage.

7.1.1.3 Dimensionnement de la matière brute

Une évaluation préliminaire de la dimension de la matière brute est également possible en considérant l'encombrement de la pièce dans un prisme. En orientant ce prisme selon les principales surfaces de la pièce et ses surfaces perpendiculaires, l'encombrement minimum est de 2,150 x 1,800 x 0,685. On peut d'ores et déjà ajouter la surépaisseur minimale de

matière sur l'épaisseur de la pièce. Puisque celle-ci est inférieure à 1 pouce, une surépaisseur de 0,040 pouce est nécessaire sur chaque face, portant l'épaisseur à 0,765 pouce. L'épaisseur peut également avoir été déterminée directement par le bureau d'études. Dans ce cas-ci, une épaisseur de 1 pouce est spécifiée. Une surépaisseur de 0,080 pouce est également ajoutée sur les autres faces du prisme, portant les dimensions minimales de la pièce à 2,310 x 1,960 x 0,765. Selon les dimensions normalisées des plaques et les requis provenant du bureau d'études, la dimension de la matière d'œuvre est portée à 2,375 x 2,375 x 1,000.

Afin de procéder à l'automatisation de cette étape de dimensionnement de la matière brute, les paramètres significatifs soulevés au chapitre 6 sont déterminés. Les surfaces de référence identifiées sur le dessin de fabrication permettent d'y associer un numéro de surface. À partir de ces numéros de surface, des informations additionnelles sont obtenues, comme la normale et l'aire de ces surfaces. Enfin, la boîte englobante de la pièce est déterminée. Les dimensions préliminaires de la matière brute ainsi que son orientation en sont déduites. Dans un contexte d'automatisation, l'identification des surfaces de référence nécessite un traitement informatique modéré, pour ensuite associer le numéro de surface correspondant. La normale et l'aire de ces surfaces sont facilement identifiables, tandis que le volume du prisme englobant la pièce nécessite un traitement informatique plus complexe.

Pour l'exemple à l'étude, le tableau 7.6 présente les paramètres extraits du modèle CAO et du dessin de fabrication qui servent au processus d'automatisation. Les informations comme l'aire et la normale aux surfaces planes sont présentées uniquement pour les surfaces de référence de la pièce. Toutefois, il est utile de considérer toutes les surfaces planes dans le dimensionnement de la matière brute et son orientation.

Tableau 7.6 Paramètres significatifs pour le dimensionnement de la matière brute

Paramètres significatifs	Valeur	Automatisation
Volume prismatique minimal de la boîte englobante de la pièce	A : 0,685 B : 1,800 C : 2,150	Difficile
Aire des surfaces planes de la géométrie	A : 1,962 B : 0,582 C : 0,036	Facile

Paramètres significatifs	Valeur	Automatisation
Normale des surfaces planes de la géométrie	A : (0 0 -1) B : (± 1 0 0) C : (0 1 0)	Facile
Identification des surfaces de références	A : S30 B : S4 et S16 C : S1	Difficile

La détermination du volume prismatique minimal de la boîte englobante de la pièce est relativement facile à obtenir dans le cas de la pièce à l'étude. Les surfaces de référence fournissent un bon point de départ pour orienter le prisme rectangulaire. Il ne reste qu'à agrandir le prisme jusqu'à ce qu'il englobe toute la pièce. Toutefois, ces étapes simples à réaliser mentalement sont plus difficiles à incorporer dans un contexte d'automatisation.

7.1.1.4 Configuration du montage

Maintenant, il faut déterminer quel sera le montage utilisé pour réaliser l'usinage de cette pièce. Selon la MOCN disponible, un montage à 1 ou 2 posages est possible. Une évaluation du ratio d'épaisseur permet d'orienter ce choix. Dans le cas présent, le ratio est de 2,375, ce qui nous mène à un usinage en 1 posage. De façon à assurer une emprise de la pièce dans l'étau et un dégagement sécuritaire, la longueur est augmentée de 1,500 pouce, celle-ci devenant 3,875 pouces. L'encombrement final de la matière brute, toujours en considérant les dimensions standards disponibles, est alors de 4,000 x 2,375 x 1,000.

La symétrie sur la pièce permet également de l'orienter à l'intérieur du brut, de façon à ce que l'axe de symétrie se trouve perpendiculaire à la longueur de l'étau. La pièce peut encore être orientée selon deux possibilités, soit l'alignement du fond de l'étau avec les surfaces 1 ou 10. Puisque la pièce est usinée en un posage, une patte d'attache doit permettre de maintenir la pièce reliée à la matière brute. La surface 10 s'y prête alors très bien, puisqu'elle doit être près du point de fixation de l'étau et qu'elle ne doit pas être une surface de référence. Les directions d'accès des entités et la cinématique de la machine devront être considérées également afin de faciliter l'usinage. Par exemple pour le cas présent, la surface 20 nécessitera un positionnement à l'aide de l'axe rotatif pour usiner le plan libre et ainsi éviter un usinage en balayage. Pour permettre ce positionnement de la

pièce, il est nécessaire d'utiliser le montage en équerre plutôt que celui en plateau. La figure suivante illustre l'orientation relative de la pièce par rapport à la matière brute et l'étau.

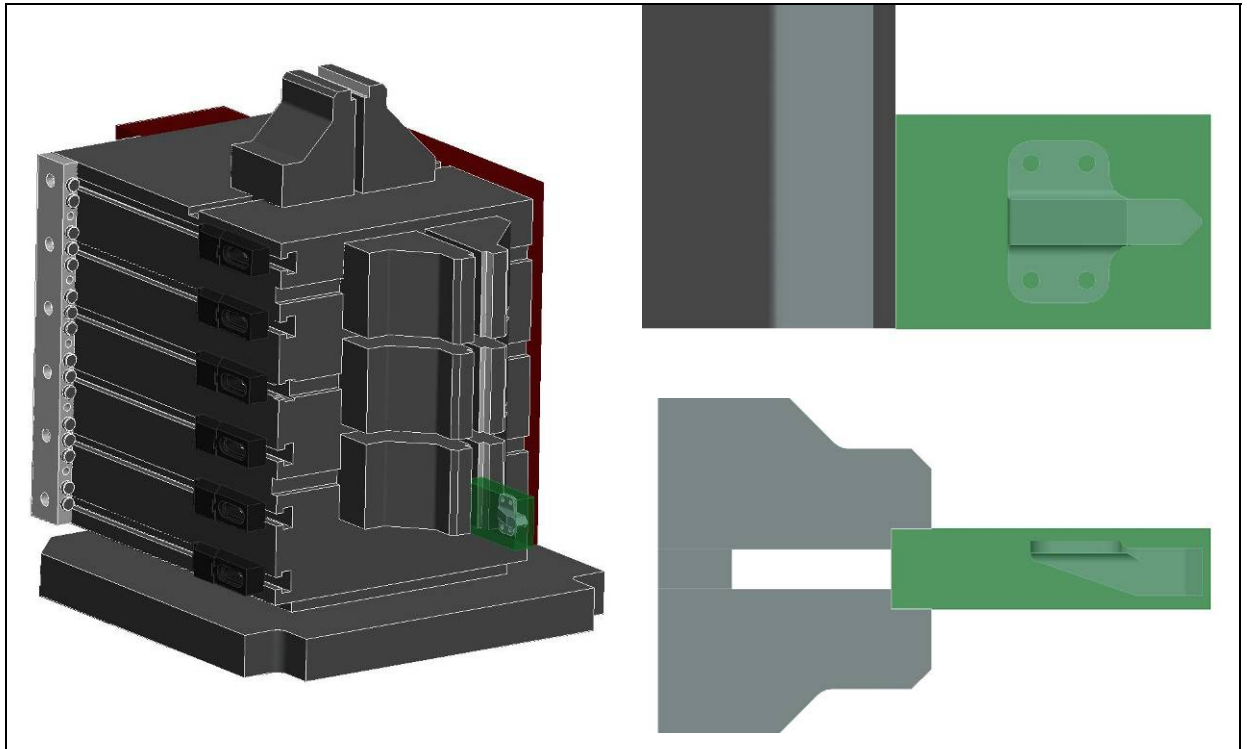


Figure 7.5 Positionnement de la pièce dans le montage d'usinage.

L'automatisation de l'étape de sélection de la configuration du montage nécessite de déterminer des paramètres significatifs associés à ce choix. Le tableau 7.7 présente les valeurs obtenues pour la pièce à l'étude. Les dimensions de la matière brute sont obtenues de l'étape précédente, en conformité avec les dimensions normalisées de la matière brute disponible. De ces dimensions, le ratio d'épaisseur et le nombre de posages nécessaires sont facilement déduits. Un indicateur doit également être fourni afin d'indiquer l'état d'avancement des posages pour les pièces nécessitant deux posages. Cette étape est facilement automatisable en utilisant une logique très simple, de façon à déterminer quelle face du bloc de montage sera utilisée.

Tableau 7.7 Obtention des paramètres significatifs pour la configuration du montage

Paramètres significatifs	Valeur	Automatisation
Volume prismatique minimal de la boîte englobante de la pièce (dimensions préliminaires du brut)	A : 1,000 B : 2,375 C : 2,375	Facile
Ratio d'épaisseur de la boîte englobante de la pièce	2,375	Facile
Nombre de posages nécessaires	1	Facile
État du posage actuel (1 ^{er} ou 2 ^e)	1 ^{er}	Facile

La sélection d'un usinage en étau nécessite un traitement additionnel afin de choisir parmi le montage en plateau ou en équerre. Une analyse subséquente des directions d'accès est également essentielle afin de positionner et d'orienter la pièce dans le montage d'usinage sélectionné. L'approche proposée par (Cordebois, 2003) et présentée à la section 6.1.3.2 peut être utilisée pour y parvenir. Le tableau 7.8 illustre les paramètres d'analyse qui peuvent être obtenus de façon automatique pour les entités d'usinage 1 et 20

Tableau 7.8 Analyse de la visibilité selon le montage en équerre ou en plateau

Paramètres d'analyse	Équerre	Plateau	Automatisation
Vecteur normal E1 de l'entité d'usinage 1	(0 0 1)	(0 1 0)	Difficile
Vecteur normal E1 de l'entité d'usinage 20	(-0.945 0 -0.326)	(-0.945 -0.326 0)	Difficile
Vecteur normal E2 de la face de montage	(0 0 1)	(0 1 0)	Facile
Vecteur B de l'axe rotatif	(0 1 0)	(0 1 0)	Facile
Valeur du produit scalaire E1 • E2 pour l'entité d'usinage 1	1	1	Facile
Norme du produit vectoriel E1 X B pour l'entité d'usinage 1	1	-	Facile
Valeur du produit scalaire E1 • E2 pour l'entité d'usinage 20	-0.326	-0.326	Facile
Norme du produit vectoriel E1 X B pour l'entité d'usinage 20	1	-	Facile

L'analyse des résultats des produits vectoriels et scalaires permet de valider la visibilité des entités d'usinage selon les différentes faces de montage. Le vecteur de l'entité d'usinage est donc exprimé dans un repère global correspondant à celui de la machine-outil, selon différentes orientation de la pièce. Selon les critères énoncés à la section 6.1.3.2, le

traitement vectoriel permet de conclure que l'entité d'usinage 1 n'est pas usinable en bout sur le montage en plateau, mais qu'elle est usinable en bout sur le montage en équerre. Quant à l'entité d'usinage 20, l'analyse indique qu'elle est impossible à usiner en bout sur le montage en plateau. Elle est également impossible à usiner sur le montage en équerre puisqu'elle se trouve dans le demi-cylindre invisible du montage. Une analyse de visibilité en flanc est alors nécessaire dans ce cas-ci. L'interprétation du résultat du produit vectoriel sur le montage en équerre indique que le vecteur normal de l'entité d'usinage 20 est perpendiculaire à l'axe rotatif de la machine-outil, permettant ainsi le positionnement pour l'usinage en flanc. La face de montage en équerre est donc favorisée afin d'éviter un usinage par balayage de l'entité d'usinage 20.

Cet exemple illustre une méthode d'analyse de visibilité utilisant des opérations vectorielles. L'analyse peut également reposer sur la sphère de Gauss pour valider la visibilité des entités d'usinage.

7.1.2 Stratégie d'usinage

La stratégie d'usinage consiste à choisir le mode d'usinage permettant de générer chacune des surfaces de la pièce à usiner, à choisir l'outil de coupe approprié, à regrouper les surfaces pouvant être usinées au cours d'une même opération et à ordonner les opérations résultantes. Ceci est réalisé en minimisant le temps d'usinage, en respectant les critères de qualité associés à la pièce et en minimisant les posages nécessaires.

L'étape précédente a permis de déterminer la configuration du montage, en analysant la visibilité des entités selon un montage en équerre ou en plateau, ainsi que selon l'orientation de la pièce. Cette configuration du montage, jumelée à la cinématique de la machine, contribuera à diminuer les directions d'usinage potentielles. Par exemple, la surface 2 ne peut plus être usinée en bout. Il ne reste alors que l'option de l'usinage en flanc. Les surfaces 10 et 20 ne sont plus accessibles puisque l'outil interfère avec le montage d'usinage, éliminant également le mode d'usinage en bout. Une précision s'exerce alors sur les entités d'usinage quant à leur type. On obtient alors le tableau 7.9.

Tableau 7.9 Deuxième évaluation des entités de la pièce exemple

Numéro de l'entité	Surface associée	Type	Numéro de l'entité	Surface associée	Type
E1	S1	Plan libre	E17	S17	Raccordement
E2	S2	Plan en flanc	E18	S18	Plan en flanc
E3	S3	Raccordement	E19	S19	Plan libre
E4	S4	Plan en flanc	E20	S20	Plan en flanc
E5	S5	Raccordement	E21	S21	Plan libre
E6	S6	Plan libre	E22	S22	Raccordement
E7	S7	Raccordement	E23	S23	Raccordement
E8	S8	Plan en flanc	E24	S24	Plan libre
E9	S9	Raccordement	E25	S25	Raccordement
E10	S10	Plan en flanc	E26	S26	Alésage
E11	S11	Raccordement	E27	S27	Alésage
E12	S12	Plan en flanc	E28	S28	Alésage
E13	S13	Raccordement	E29	S29	Alésage
E14	S14	Plan libre	E30	S30	Plan libre
E15	S15	Raccordement	E31	S31	Raccordement
E16	S16	Plan en flanc	E32	S32	Plan libre

Il reste encore des entités « Plan libre » qui doivent être converties en « Plan en flanc » ou en « Plan en bout ». Pour ce faire, une analyse de l'adjacence des surfaces permet de diriger ce choix. Ainsi, puisque le voisinage de la surface 1 (les surfaces 2 et 18) correspond à des « Plan en flanc », il est logique d'enchaîner cette surface avec celles à proximité. De plus, l'adjacence avec les surfaces 19 et 32 est défavorable puisque leur enchaînement avec la surface 1 nécessiterait un repositionnement du montage à chacune des faces compte tenu de la cinématique de la machine. La même logique est appliquée pour attribuer aux entités 6 et 14 un type « Plan en flanc ».

Une analyse de simultanéité conduit également à une précision sur le type d'entité de la surface 21. Guidé par sa nature semi-ouverte avec son raccordement (surface 22), lui-même de nature semi-ouverte avec la surface 16 et par l'angle de 90° entre les surfaces 16 et 21, une simultanéité d'usinage est alors possible. Comme la surface 16 est obligatoirement en flanc, l'entité 21 obtient le type « Plan en bout ». En appliquant le même

raisonnement à l'entité 24, le type « Plan en bout » lui est également attribué. Il est à noter que les entités 6 et 14 auxquelles un type « Plan en flanc » a été attribué sur la base du critère d'enchaînement auraient également pu recevoir un type « Plan en bout » sur la base de la simultanéité. Toutefois, cette option est rejetée compte tenu du large rayon de leur raccordement respectif (les surfaces 5 et 15), celui-ci étant avantageusement usiné en flanc plutôt qu'à l'aide du rayon de coin d'un outil torique.

Enfin, les surfaces 19, 30 et 32 restent à classer. L'analyse de l'entité 30 conduit à l'attribution du type « Plan en bout ». Sa grande aire en est la principale raison, appuyée par le fait qu'un usinage en flanc aurait nécessité un outil long pour éviter une collision avec la pièce. Les surfaces 19 et 32 sont quant à elles réalisables autant en bout qu'en flanc. Le tableau des entités apparaît maintenant comme suit :

Tableau 7.10 Troisième évaluation des entités de la pièce exemple

Numéro de l'entité	Surface associée	Type	Numéro de l'entité	Surface associée	Type
E1	S1	Plan en flanc	E17	S17	Raccordement
E2	S2	Plan en flanc	E18	S18	Plan en flanc
E3	S3	Raccordement	E19	S19	Plan libre
E4	S4	Plan en flanc	E20	S20	Plan en flanc
E5	S5	Raccordement	E21	S21	Plan en bout
E6	S6	Plan en flanc	E22	S22	Raccordement
E7	S7	Raccordement	E23	S23	Raccordement
E8	S8	Plan en flanc	E24	S24	Plan en bout
E9	S9	Raccordement	E25	S25	Raccordement
E10	S10	Plan en flanc	E26	S26	Alésage
E11	S11	Raccordement	E27	S27	Alésage
E12	S12	Plan en flanc	E28	S28	Alésage
E13	S13	Raccordement	E29	S29	Alésage
E14	S14	Plan en flanc	E30	S30	Plan en bout
E15	S15	Raccordement	E31	S31	Raccordement
E16	S16	Plan en flanc	E32	S32	Plan libre

À ce posage, certaines entités présentent encore une liberté au niveau du mode d'usinage. Comme énoncé précédemment, les plans libres admettent deux options, mais les raccordements aussi peuvent être usinés selon différents modes. Les raccordements issus d'une surface cylindrique concave peuvent être usinés en flanc, en utilisant un outil de rayon inférieur au rayon du raccordement, ou bien en bout ou en balayage, la forme étant générée par le rayon de coin d'un outil torique ou hémisphérique. En général, un raccordement de faible rayon sera usiné en bout, tandis que les rayons plus grands seront usinés en flanc. L'analyse des rayons de la pièce nous permet de faire une première évaluation des outils de coupe qui seront nécessaires, les rayons concaves étant : 0,120, 0,125 et 0,280. Ces dimensions guideront soit le diamètre de l'outil ou la dimension du rayon de coin. Quant aux raccordements issus d'une surface cylindrique convexe, ils seront usinés de préférence en flanc. Lorsque l'accessibilité ne le permet pas, l'usinage par balayage avec une fraise torique ou hémisphérique sera choisi. La surface 25 illustre cette situation, où la seule option est un usinage par balayage.

Outre la liberté au niveau du mode d'usinage, certaines entités offrent encore des directions d'accès multiples. Effectivement, les plans en flanc offrent en général une infinité de possibilités d'orientation, l'axe de l'outil pouvant être parallèle à la surface selon plusieurs orientations. Toutefois, la cinématique de la machine limite souvent les orientations possibles. Par exemple, l'entité 1 offre seulement 2 possibilités d'orientation opposées, tandis que l'entité 8 en offre une infinité. Les enchaînements pourront alors être déterminants quant au choix de la direction d'usinage, ainsi que le critère de minimisation de la longueur de l'outil de coupe. Le cas où l'entité 8 serait usinée par un enchaînement avec l'entité 7 limiterait le choix des directions d'accès, le tout couplé à la décision d'y accéder par la surface 30 plutôt que par la surface 24 pour minimiser la longueur de l'outil.

7.1.2.1 Détermination des modes d'usinage

Une fois les entités d'usinage établies, des modes d'usinage sont associés. Le passage de l'entité d'usinage au mode d'usinage est relativement direct compte tenu du haut degré d'information contenu dans la définition de l'entité d'usinage. Le tableau 7.11 présente les modes d'usinage associés, tandis que la figure 7.6 illustre les directions d'accès de l'outil.

Tableau 7.11 Association des modes et direction d'usinage

Numéro d'entité	Mode d'usinage	Direction d'usinage
1	Usinage en flanc (E+F)	1
2	Usinage en flanc (E+F)	1
3	Usinage en flanc (E+F)	1
4	Usinage en flanc (E+F)	1 et 2
5	Usinage en flanc (E+F)	2
6	Usinage en flanc (E+F)	2
7	Usinage en flanc (E+F)	2
8	Usinage en flanc (E+F)	1
9	Usinage en flanc (E+F)	2
10	Usinage en flanc (E+F) et Usinage en flanc (F)	2
11	Usinage en flanc (E+F)	2
12	Usinage en flanc (E+F)	2
13	Usinage en flanc (E+F)	2
14	Usinage en flanc (E+F)	2
15	Usinage en flanc (E+F)	2
16	Usinage en flanc (E+F)	1 et 2
17	Usinage en flanc (E+F)	1
18	Usinage en flanc (E+F)	1
19	Usinage en bout (E+F)	1
20	Usinage en flanc (E+F)	3
21	Usinage en bout (E+F)	1
22	Usinage de forme (F)	1
23	Usinage de forme (F)	1
24	Usinage en bout (E+F)	1
25	Usinage en balayage (F)	1
26	Usinage axial	2
27	Usinage axial	2
28	Usinage axial	2
29	Usinage axial	2
30	Usinage en bout (E+F)	2

Numéro d'entité	Mode d'usinage	Direction d'usinage
31	Usinage de forme (F)	2
32	Usinage en bout (E+F)	2

Le tableau révèle que certaines entités (E4, E10 et E16) sont usinées à plusieurs reprises, selon différents modes et directions d'usinage. Ceci est le résultat de la division d'une surface en deux ou trois portions. Par exemple, l'entité 4 est usinée en flanc, suivi du raccordement (E5) en tangence. L'usinage de l'autre portion de l'entité 4 est effectué dans un mode d'usinage séparé. Comme l'entité 16 est symétrique à 4, la même procédure est appliquée. L'entité 10 est un cas particulier puisqu'en raison de sa liaison avec la patte d'attache, elle est usinée en plusieurs étapes, ses extrémités étant d'abord usinées, pour finalement procéder à l'amincissement de la patte d'attache à une opération subséquente.

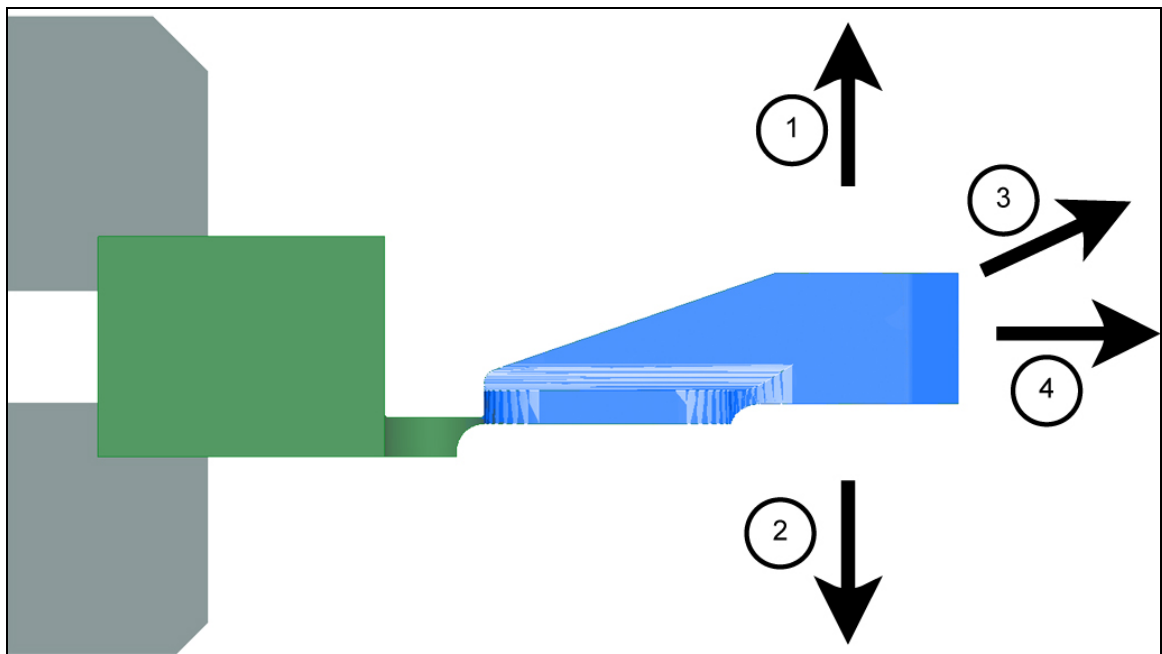


Figure 7.6 Directions d'accès des entités de la pièce exemple.

Dans un contexte d'automatisation, les paramètres significatifs doivent être extraits parmi les informations disponibles sur la pièce à usiner, les ressources matérielles et parmi la gamme partiellement construite. Le tableau 7.12 indique les éléments extraits pour les entités d'usinage 1 et 3 ainsi que leur degré de difficulté pour l'automatisation. L'orientation

de la matière brute correspond à la transformation que doit subir le repère local normalisé de la matière brute par rapport au repère global de la machine-outil.

Tableau 7.12 Paramètres significatifs pour la détermination des opérations d'usinage

Paramètres significatifs	Entité 1	Entité 3	Automatisation
Type de l'entité d'usinage	Plan en flanc	Raccordement	Facile
Vecteur de direction d'accès de l'entité d'usinage	(-1 0 0)	(-1 0 0)	Facile
Liste des outils disponibles	Liste Makino	Liste Makino	Facile
Configuration du montage d'usinage	Étau, face 1	Étau, face 1	Facile
Orientation de la matière brute	(0 -90 0)	(0 -90 0)	Facile
Dimensions associées à l'entité d'usinage	Voir l'enrichissement de la surface 1	Voir l'enrichissement de la surface 3	Facile
Tolérances associées à l'entité d'usinage	Voir l'enrichissement de l'entité 1	Voir l'enrichissement de l'entité 3	Facile

Le tableau précédent indique que l'automatisation de l'extraction des paramètres est facile, considérant le fait que plusieurs d'entre eux ont déjà été obtenus par une analyse effectuée lors d'une phase antérieure.

7.1.2.2 Choix des outils de coupe

Le choix de l'outil de coupe dépend de plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci, les plus importants sont le mode d'usinage et les dimensions caractéristiques de l'entité d'usinage. Les outils utilisés sont présentés dans le tableau 7.13. Les usinages en flanc utilisent tous la fraise torique 1/2 po, à l'exception de l'usinage de l'entité 10. Le diamètre de 1/2 po est déterminé selon le rayon maximum permettant d'usiner les surfaces cylindriques concaves. Les surfaces 5 et 15 de rayon 0,280 po ont dicté ce choix à la dimension normalisée inférieure. Évidemment, il faut respecter un ratio longueur/diamètre inférieur à 3 :1 pour minimiser la déflexion tout en étant conscient qu'un outil de gros diamètre génère des efforts de coupe importants et nécessite des dépassements plus élevés, ce qui peut occasionner des collisions. Par exemple, l'usinage des entités 9 ou 11 doit considérer les risques de collision

de l'outil et du porte-outil avec l'étau. Pour cette raison, une fraise torique d'un diamètre de 3/8 po est utilisée pour finaliser la surface 10. De plus, celle-ci est munie d'un rayon de coin très petit de 1/64 po afin minimiser le dépassement axial nécessaire.

Tableau 7.13 Association des outils aux opérations d'usinage

Numéro d'entité	Mode d'usinage	Direction d'usinage	Outil
1	Usinage en flanc (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
2	Usinage en flanc (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
3	Usinage en flanc (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
4	Usinage en flanc (E+F)	1 et 2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
5	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
6	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
7	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
8	Usinage en flanc (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
9	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
10	Usinage en flanc (E+F) et Usinage en flanc (F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16 et Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
11	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
12	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
13	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
14	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
15	Usinage en flanc (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
16	Usinage en flanc (E+F)	1 et 2	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
17	Usinage en flanc (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
18	Usinage en flanc (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
19	Usinage en bout (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1-1/2, R 1/16
20	Usinage en flanc (E+F)	3	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
21	Usinage en bout (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
22	Usinage de forme (F)	1	Fr. hémisphérique, dia. 1/4
23	Usinage de forme (F)	1	Fr. hémisphérique, dia. 1/4
24	Usinage en bout (E+F)	1	Fr. torique, dia. 1/2, R 1/16
25	Usinage en balayage (F)	1	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
26	Usinage axial	2	Foret à pointer et foret #7

Numéro d'entité	Mode d'usinage	Direction d'usinage	Outil
27	Usinage axial	2	Foret à pointer et foret #7
28	Usinage axial	2	Foret à pointer et foret #7
29	Usinage axial	2	Foret à pointer et foret #7
30	Usinage en bout (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1-1/2, R 1/16
31	Usinage de forme (F)	2	Fr. hémisphérique, dia. 1/4
32	Usinage en bout (E+F)	2	Fr. torique, dia. 1-1/2, R 1/16

Cette même raison justifie l'utilisation de cet outil pour l'usinage de l'entité 25 par balayage. En effet, en plus de l'épaisseur de la patte d'attache, le rayon de coin de l'outil contribue à augmenter la quantité de matière qui devra être enlevée par sablage après l'usinage sur la surface d'attache. Il est donc avantageux d'utiliser un outil comportant un faible rayon de coin.

Les usinages en bout utilisent une fraise torique comportant un diamètre de 1/2 po ou 1-1/2 po, selon la nature de la surface et de l'encombrement. Ainsi, les entités 19 et 30, issues de surfaces de nature ouverte admettent l'utilisation d'une fraise de grand diamètre pouvant dépasser les frontières de la surface à usiner. Une fraise à surfacer aurait également été admissible. Les entités issues de surfaces de nature semi-ouverte nécessitent plus d'attention. L'entité 32, adjacente à l'entité 31 (un raccordement), ne permet pas de dépassement sur l'arête tangente-fermée (A76). Il existe toutefois un dégagement suffisant sur les autres arêtes pour justifier l'utilisation d'une fraise de grand diamètre. Le mouvement sera quant à lui parallèle à l'arête tangente-fermée. La même logique est appliquée pour les entités 21 et 24. Toutefois, l'encombrement et la proximité de l'étau orientent plutôt le choix de l'outil vers un diamètre inférieur.

Les outils pour les entités utilisant un mode d'usinage de forme (entités 22, 23 et 31) sont guidés par le rayon de la forme à générer. L'outil peut être une fraise hémisphérique ou une fraise torique, la limitation se situant au niveau de l'angle de la géométrie. Pour les angles inférieurs ou égaux à 90°, la fraise torique est préférable puisque sa rigidité peut être améliorée par l'augmentation de son diamètre tout en maintenant le rayon de coin constant (voir figure 7.7).

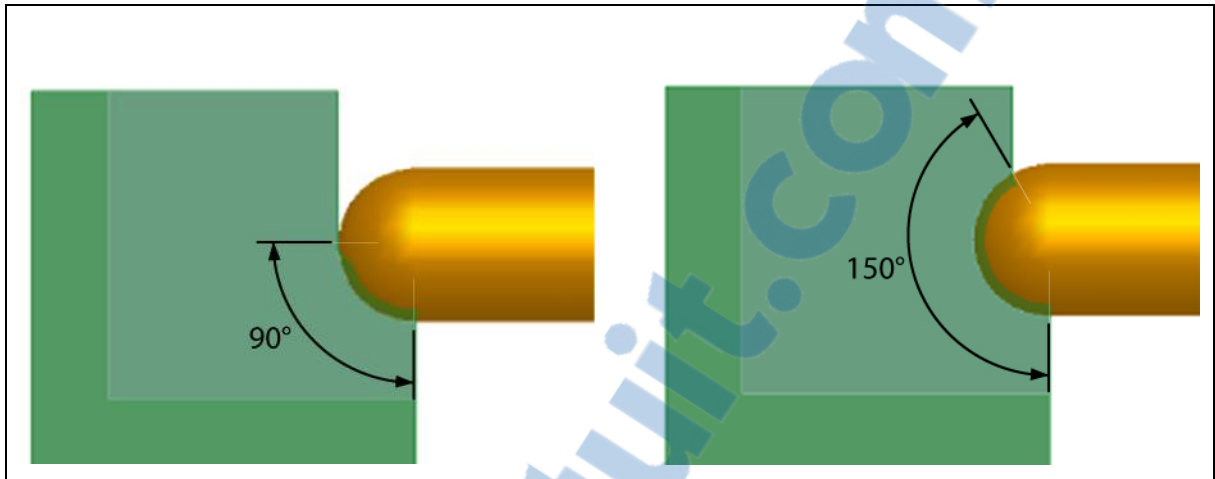


Figure 7.7 Usinage de rayons de raccordement.

Enfin, les outils des usinages axiaux (entités 26, 27, 28 et 29) sont choisis en fonction de la géométrie à usiner. Le diamètre du foret correspond alors au diamètre de l'alésage. Puisque le diamètre est petit et que la tolérance est large, il n'est pas nécessaire d'effectuer d'ébauche, la finition étant effectuée directement. Pour faciliter l'accessibilité, notamment pour le pointage, la direction d'accès est du côté de l'entité 30.

Fait intéressant à noter, les entités 4, 23 et 24 sont usinées par différentes opérations malgré le fait qu'elles auraient pu être usinées simultanément comme présenté précédemment. Ceci est attribuable au rayon de raccordement (0,120 po) qui aurait nécessité une fraise torique avec un rayon équivalent (selon le niveau de qualité demandé, un rayon plus standard de 0,125 po aurait pu être acceptable). Conformément à la stratégie illustrée à la section 6.1.2.3, l'usinage en simultanée avec une fraise torique comportant un rayon de coin de 0,120 po aurait limité la profondeur radiale admissible. Pour cette raison, une fraise torique de rayon 1/16 po est utilisée pour les entités 4 et 24 tandis qu'une opération additionnelle est nécessaire pour réaliser la finition du raccordement.

L'automatisation de la sélection des outils de coupe nécessite l'identification des valeurs associées aux paramètres significatifs soulevés à la section 6.1.3.3. Ceux-ci sont présentés au tableau 7.14 pour les entités 1 et 3, permettant de sélectionner le type d'outil et son diamètre. À chacun de ces paramètres, un indicateur du degré de difficulté d'obtention des

valeurs est présenté. Des paramètres additionnels sont nécessaires afin de caractériser l'outil de coupe de façon détaillée.

Tableau 7.14 Paramètres significatifs pour la sélection des outils de coupe

Paramètres significatifs	Entité 1	Entité 3	Automatisation
Type de l'entité d'usinage	Plan en flanc	Raccordement	Facile
Type des entités voisines	Plan en flanc (2-18) Plan libre (19-32)	Plan en flanc (2-4) Plan libre (19-32)	Facile
Mode d'usinage sélectionné pour l'entité d'usinage	Usinage en flanc (F)	Usinage en flanc (F)	Facile
Dimensions associées à l'entité d'usinage	Voir l'enrichissement de la surface 1	Voir l'enrichissement de la surface 3	Facile
Tolérances associées à l'entité d'usinage	Voir l'enrichissement de l'entité 1	Voir l'enrichissement de l'entité 3	Facile
Épaisseur de la cloison	-	-	Difficile
Volume de matière à enlever	0.000357 po ³	0.000292 po ³	Difficile
Rayon de courbure minimum extérieur matière	-	-	Facile
Distance minimale et maximale entre les arêtes délimitant la surface	-/-	-/-	Facile

L'analyse du tableau précédent indique que la majorité des paramètres sont faciles à obtenir. Toutefois, l'épaisseur de cloison et le volume de matière à enlever nécessite un traitement plus complexe. À titre d'exemple, pour le volume de matière à enlever lors de l'usinage en flanc pour la finition de l'entité 1, celui-ci correspond à l'aire de la surface multipliée par la surépaisseur de matière restante lors de l'opération d'ébauche. Ce traitement, relativement simple pour une opération de finition, se complique lors du calcul du volume de matière à enlever pour une opération d'ébauche. En effet, l'analyse doit considérer la position de la surface par rapport à la frontière de la matière brute. Ce paramètre est significatif pour la sélection du diamètre de l'outil, cette caractéristique affectant largement le taux d'enlèvement de matière et par le fait même, le temps d'usinage pour un volume donné.

Certains paramètres du tableau sont également sans valeur, notamment pour l'épaisseur de cloison, le rayon de courbure minimum extérieur matière et la distance minimale et maximale entre les arêtes délimitant la surface. Ceci est attribuable à l'objectif du paramètre en question. En effet, la valeur de l'épaisseur de cloison est nécessaire uniquement pour les surfaces possédant un indicateur d'élément mince. Des précautions particulières quant au choix de l'outil seront prises afin de refléter cet aspect de la pièce. Dans un même ordre d'idée, le rayon de courbure minimum extérieur matière permet de déterminer le diamètre d'outil maximum pouvant usiner une surface cylindrique concave. Puisque les entités 1 et 3 sont respectivement des surfaces plane et cylindrique convexe, ce paramètre n'est pas applicable. Enfin, la distance minimale et maximale entre les arêtes délimitant la surface permet de déterminer les bornes minimales et maximales associées au diamètre de l'outil usinant une surface plane de nature fermée, comme le fond d'une poche par exemple. Puisque les entités 1 et 3 sont de nature ouverte, ce paramètre n'est pas applicable.

7.1.2.3 Ordonnancement des opérations d'usinage

Une fois les modes d'usinage établis et les outils de coupe sélectionnés, tout est en place pour la constitution d'opérations d'usinage, alliant à la fois le groupement d'entités d'usinage en une même opération et leur ordonnancement. Comme mentionné au chapitre 6, il faut maximiser la rigidité de la pièce tout au long de l'usinage pour limiter les vibrations et les déflexions. L'usinage débutera alors par les entités les plus éloignées de l'étau pour s'en approcher graduellement. L'ébauche de la matière brute s'effectuera graduellement et sera suivie par une opération de finition. Le centre de gravité des surfaces peut ainsi donner une information sur l'ordre des surfaces à usiner. De plus, les entités utilisant le même mode d'usinage et la même direction d'usinage sont regroupées ensemble afin de minimiser une surabondance de repositionnement de la machine. La symétrie de la pièce permet également d'alterner entre le côté droit et le côté gauche de la pièce, partant des entités extrêmes pour s'approcher de l'axe de symétrie de la pièce. Puisque la patte d'attache qui retient la pièce est reliée à la surface 10, elle sera usinée à la toute fin. La considération de tous ces éléments conduit au tableau 7.15 qui présente le regroupement d'entités ainsi que l'ordonnancement proposé des opérations.

Tableau 7.15 Ordonnancement des opérations d'usinage

Numéro d'opér.	Mode d'usinage	Numéro des entités	Direction d'usinage
1	Usinage en flanc (E+F)	17-18-1-2-3	1
2	Usinage en bout (E+F)	19	1
3	Usinage en bout (E+F)	32	2
4	Usinage de forme (F)	31	2
5	Usinage en flanc (E+F)	13-14-15-16	2
6	Usinage en flanc (E+F)	7-6-5-4	2
7	Usinage en bout (E+F)	30	2
8	Usinage en flanc (E+F)	12	2
9	Usinage en flanc (E+F)	8	1
10	Usinage en bout (E+F)	21	1
11	Usinage en flanc (E+F)	16	1
12	Usinage en bout (E+F)	24	1
13	Usinage en flanc (E+F)	4	1
14	Usinage de forme (F)	23	1
15	Usinage de forme (F)	22	1
16	Usinage axial	26-27-28-29	2
17	Usinage en flanc (E+F)	20	3
18	Usinage en flanc (E+F)	11-10	2
19	Usinage en flanc (E+F)	9-10	2
20	Usinage en balayage (F)	25	1
21	Usinage en flanc (F)	10	2

Le raisonnement permettant de procéder à l'ordonnancement des opérations repose sur une foule de paramètres. Ceux jugés significatifs et proposés à la section 6.1.4.2 sont présentés au tableau 7.16 pour les entités 1 et 3. Ceci permet d'illustrer les valeurs qui y sont associées ainsi que l'indice du degré de difficulté de l'automatisation de chacun des paramètres.

Tableau 7.16 Paramètres significatifs pour l'ordonnancement des opérations

Paramètres significatifs	Entité 1	Entité 3	Automatisation
Caractéristiques intrinsèques et extrinsèques de l'entité d'usinage	Voir l'enrichissement de l'entité 1	Voir l'enrichissement de l'entité 3	Facile
Configuration du montage d'usinage	Étau, face 1	Étau, face 1	Facile
Orientation de la matière brute	(0 -90 0)	(0 -90 0)	Facile
Mode d'usinage sélectionné	Usinage en flanc (F)	Usinage en flanc (F)	Facile
Numéro de l'outil sélectionné	B206	B206	Facile
Antériorités technologiques associées à l'entité	Usinage en flanc (E) de E1	Usinage en flanc (E) de E3	Difficile
Volume de matière à enlever	0.000357 po ³	0.000292 po ³	Difficile
Qualification des arêtes de l'entité	O-O-O-O	TO-O-TO-O	Facile
Épaisseur de la cloison	-	-	Difficile
Entités de construction nécessaires	non	non	Facile
Taux d'enlèvement de matière	2.24 po ³ /min	2.24 po ³ /min	Facile
Surfaces de référence associées	-	-	Difficile
Numéro du posage	1	1	Facile

L'ordonnancement des opérations est une étape complexe reposant sur de multiples variables comme l'illustre le grand nombre de paramètres significatifs du tableau 7.16. Plusieurs de ces paramètres sont obtenus facilement à partir des résultats d'analyses précédentes. Néanmoins, quelques paramètres nécessitent un traitement plus difficile, rendant la tâche de l'automatisation plus complexe. Parmi les nouveaux paramètres, la

détermination des antériorités technologiques associées à l'entité impliquent une analyse élaborée des étapes d'usinage (ébauche, semi-finition et finition) ainsi que des interactions entre deux entités distinctes. Un autre paramètre significatif qui apporte des difficultés pour l'automatisation correspond aux surfaces de références associées à l'entité d'usinage. Par exemple, pour une entité incorporant une tolérance géométrique, il est souhaitable d'y associer les surfaces de référence. Ainsi, il sera possible de garantir que ces surfaces de référence et l'entité seront usinées au cours du même montage.

7.2 Validation de la gamme d'usinage

Afin de vérifier la justesse des informations, l'analyse effectuée sur la pièce exemple est comparée à la gamme d'usinage (la gamme de référence) utilisée pour usiner la pièce chez le partenaire industriel. La figure suivante illustre le montage d'usinage utilisé.

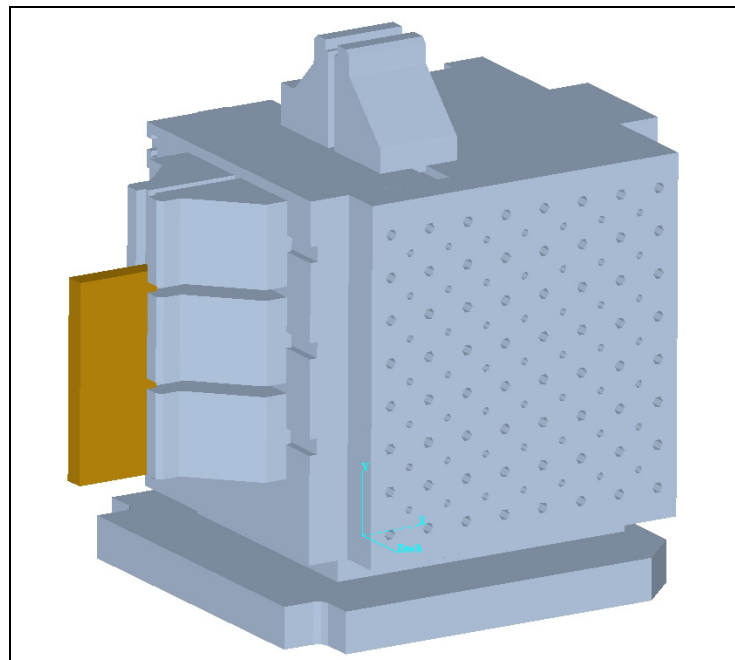


Figure 7.8 Montage d'usinage de la pièce de référence.

La dimension de la matière brute laisse immédiatement présager une différence par rapport à la configuration de la pièce exemple. En effet, le partenaire industriel a choisi de fabriquer cette pièce en pièces multiples, c'est-à-dire que quatre exemplaires de la même pièce sont

usinés en même temps. L'état de l'usinage terminé est représenté par la figure suivante. Cette illustration représente la simulation de l'enlèvement de matière effectué sur la matière brute, basée sur la liste des outils modélisés et sur le code APT provenant du logiciel FAO.

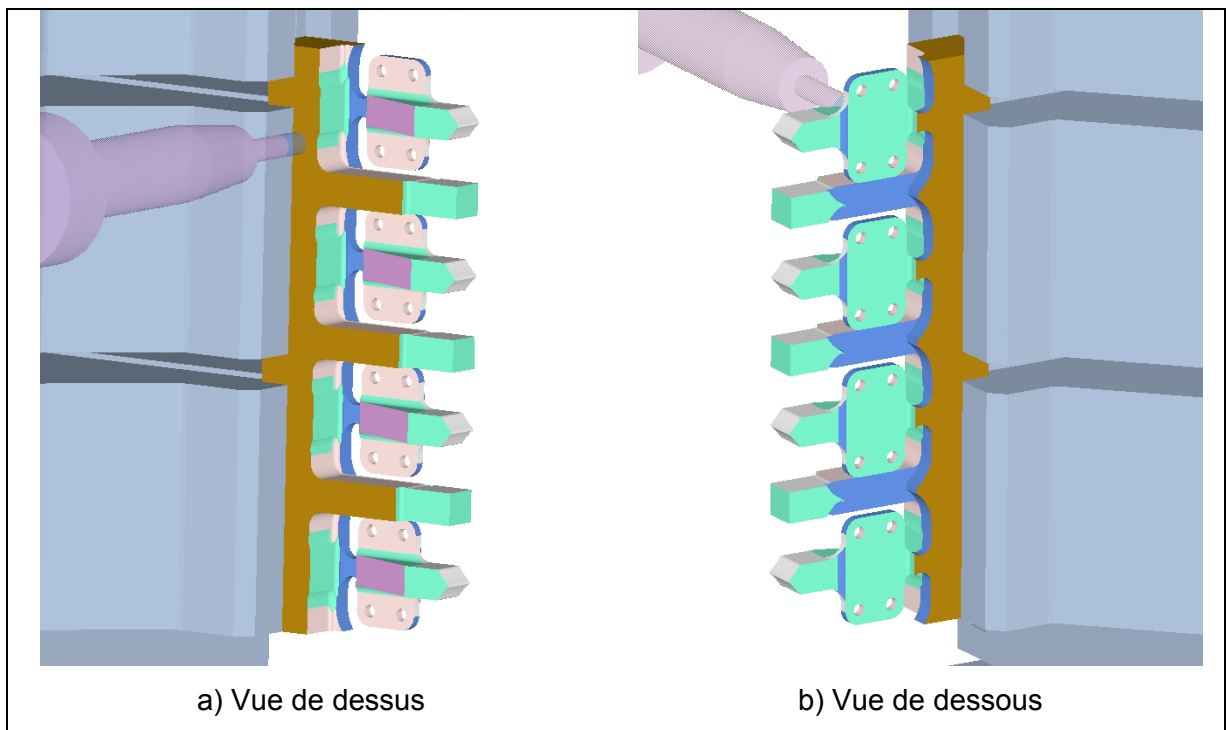


Figure 7.9 Représentation de l'état usiné de la pièce de référence.

Le tableau 7.17 présente les opérations utilisées de façon détaillée. Ce tableau permet donc d'établir un parallèle entre la pièce exemple et la pièce de référence. De plus, chaque opération est associée à une entité, incluant également la direction d'accès et l'outil utilisé. Une représentation de l'état de la pièce à différentes étapes de l'usinage est représentée en annexe.

Tableau 7.17 Ordonnancement des opérations de la pièce de référence

Numéro d'opér.	Mode d'usinage	Numéro des entités	Dir. d'accès	Outil
1	Usinage en bout (E)	1	4	Fr. torique, dia. 2, R 1/16
2	Usinage en bout (E+F)	32	2	Fr. torique, dia. 2, R 1/16
3	Usinage en bout (E+F)	30	2	Fr. torique, dia. 2, R 1/16
4	Usinage en bout (E+F)	19	1	Fr. torique, dia. 2, R 1/16
5	Usinage de forme (F)	31	2	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/8
6	Usinage en flanc (E+S-F)	14-15-16-17-18-1-2-3-4-5-6	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/16
7	Usinage en flanc (F)	14-15-16-17-18-1-2-3-4-5-6	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/8
8	Usinage en flanc (E)	4-23-24	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/16
9	Usinage en bout (F)	24	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/16
10	Usinage en flanc (E)	16-22-21	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/16
11	Usinage en bout (F)	21	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/16
12	Usinage en flanc (F)	4-23	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/8
13	Usinage en flanc (F)	16-22	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/8
14	Usinage en flanc (E+S-F)	20	3	Fr. torique, dia. 3/4, R 1/16
15	Usinage en flanc (F)	20	3	Fr. torique, dia. 7/16, R0.010
16	Usinage axial	26-27-28-29	2	Foret à pointer
17	Usinage axial	26-27-28-29	2	Foret #8
18	Usinage en flanc (E)	10	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/16
19	Usinage en balayage (E+F)	25	1	Fr. torique, dia. 7/16, R 1/16
20	Usinage en flanc (E+F)	13	2	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
21	Usinage en flanc (E+F)	12	2	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
22	Usinage en flanc (E+F)	11	2	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
23	Usinage en flanc (E+F)	10	2	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64

Numéro d'opér.	Mode d'usinage	Numéro des entités	Dir. d'accès	Outil
24	Usinage en flanc (E+F)	7	2	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
25	Usinage en flanc (E+F)	8	2	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
26	Usinage en flanc (E+F)	9	2	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
27	Usinage en flanc (E+F)	10	2	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64
28	Usinage en flanc (E+F)	10	1	Fr. torique, dia. 3/8, R 1/64

Tout d'abord, la partie d'analyse de la géométrie effectuée semble correspondre à celle de la gamme de référence. La majorité des entités recensées sont associées aux mêmes modes d'usinage, ce qui laisse croire que la détermination du type d'entité est correcte. Certaines différences mineures apparaissent au niveau de l'ordonnancement des opérations, mais en règle générale, la même logique semble appliquée. Un élément différent correspond au fait que les opérations d'ébauche et de finition sont exécutées en utilisant deux outils différents. Ceci est attribuable à l'utilisation d'un outil comportant une faible longueur de coupe pour l'ébauche, permettant de maximiser la rigidité de l'outil et ainsi augmenter le taux d'enlèvement de matière. La finition est ensuite effectuée avec un outil muni d'une partie tranchante plus longue qui permet d'usiner la surface sur toute sa profondeur. Un autre élément distinctif correspond à l'ébauche de la surface 1 qui est faite comme première opération. Celle-ci est effectuée afin de pallier la large tolérance attribuée à la largeur de la matière brute qui est coupée à la scie. L'usinage des entités 4 et 23 (plan en flanc et raccordement) est effectué en simultanée dans la même opération. Ceci nécessite toutefois un changement d'outil avec un rayon de coin égal au rayon du raccordement afin de remplacer l'outil utilisé à l'ébauche.

Une autre particularité très intéressante correspond à la configuration de la patte d'attache. Puisqu'une seule patte retient la pièce, une patte d'attache usinée selon les caractéristiques présentées à la section 6.1.4.3 entraîne trop d'instabilité. Cette approche est applicable pour les pièces usinées en 2 posages, mais elle n'est pas optimale pour les pièces usinées en 1 posage. Il est alors préférable de maximiser la rigidité de la patte en évitant de l'amincir sur toute sa largeur. La figure 7.10 illustre la configuration résultante.

Cette approche permet de supporter la pièce jusqu'à la fin de l'usinage sans complexifier l'opération consistant à scier et meuler la patte d'attache.

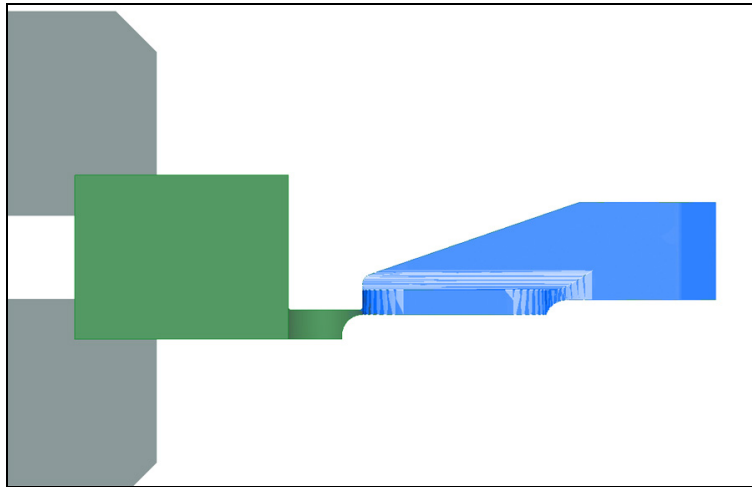


Figure 7.10 Patte d'attache de la pièce référence.

CHAPITRE 8

EXPLOITATION DES RÉSULTATS DANS UN SYSTÈME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE UTILISANT LES RÉSEAUX DE NEURONES

Les observations et le recensement effectués dans ce travail ont permis de mettre en lumière des connaissances d'usinage spécifiques au secteur aéronautique. De façon plus précise, les observations correspondent à des pièces structurales usinées sur une MOCN à quatre axes et dotée d'un dispositif de fixation des pièces comportant cinq faces.

Cette information, présentée de façon détaillée et synthétique, répond en très grande partie aux objectifs du présent travail. Les résultats obtenus pourront par la suite être incorporés dans un outil de génération de gamme d'usinage. Les informations recueillies consistent donc en une étape indispensable de la réalisation d'un outil plus global incorporant des champs d'expertise variés. En effet, le projet chapeautant ce travail implique la cohabitation de métiers aussi distincts que machiniste et spécialiste en intelligence artificielle. Puisqu'il est difficile de réunir ces compétences chez une même personne, l'approche préconisée pour ce projet a consisté à diviser le travail en sous-projet. Ainsi, la caractérisation des connaissances d'usinage a été effectuée en gardant à l'esprit que les résultats seront utilisés dans le cadre de la construction d'un système de génération de gamme d'usinage incorporant de l'intelligence artificielle pour la prise de décisions.

L'intégration des connaissances d'usinage, dans un logiciel de génération de gamme d'usinage contribue à solutionner en majeure partie la problématique présentée au début du travail. Par contre, la méthode d'intégration des connaissances peut également représenter un problème additionnel selon le choix du moteur de décision. En effet, certaines approches utilisant l'intelligence artificielle peuvent rapidement alourdir un système de FAO qui souffre déjà d'embonpoint. Par exemple, les systèmes experts reposent sur des règles de décisions qui doivent être mises à jour afin de refléter l'évolution des procédures internes propres à l'entreprise. Pour cette raison, il importe de choisir judicieusement le type de moteur lié à l'intelligence artificielle, afin qu'il permette de représenter adéquatement les connaissances d'une entreprise et qu'il nécessite une maintenance faible. Le réseau de neurones est une forme d'intelligence artificielle qui cadre bien dans les requis énoncés précédemment. Pour

les besoins du présent travail, le réseau de neurones sera donc considéré comme le choix optimal sans plus de justification, cette sélection étant hors du cadre de cette étude. La présentation des caractéristiques principales d'un réseau de neurones est toutefois de mise.

8.1 Caractéristiques d'un réseau de neurones

Un réseau de neurones est un outil mathématique inspiré du mécanisme de décision du cerveau humain. De façon simplifiée, un réseau de neurones est un outil permettant de prendre une décision parmi des options prédéfinies. Cette décision est basée sur des paramètres significatifs proposés en entrée au réseau de neurones. Le processus décisionnel est effectué dans une boîte noire intermédiaire entre les paramètres proposés (les entrées) et les options envisageables (les sorties). La particularité des réseaux de neurones réside précisément dans cette boîte noire, où le raisonnement n'est pas préalablement défini. En effet, contrairement à des systèmes algorithmiques ou des systèmes experts où des règles de décision sont explicitement énoncées, les réseaux de neurones n'incorporent pas de connaissance. Cette connaissance est plutôt implicite, c'est-à-dire qu'elle est incorporée de façon transparente au fur et à mesure que le système acquiert de l'expérience. Cet apprentissage est acquis de manière supervisée afin d'entraîner le réseau. La démarche consiste donc à présenter différentes situations comportant des paramètres d'entrée variables et à enseigner au réseau de neurones la décision qu'il aurait dû prendre dans chacun de ces cas particuliers. Cette approche d'un problème est comparable au processus de résolution de l'humain, où son expérience acquise avec le temps lui dictera les choix opportuns. Une fois le système entraîné, il sera en mesure de prendre des décisions éclairées basées sur son expérience. L'entraînement aura donc permis d'incorporer un savoir-faire au système de décision sans lui dicter de règles. C'est plutôt par un entraînement supervisé que le réseau de neurones construit son propre système de règles qui demeure toujours invisible à l'utilisateur. De plus, ce système de décision flexible permet de traiter des cas très variés, qui peuvent même être différents des problèmes rencontrés lors de l'entraînement du réseau. Cet avantage confère au réseau de neurones des attributs d'adaptabilité, de résistivité à l'erreur et de généralisation remarquables (Derome, 2008).

Dans le cadre du projet global, des études ont été réalisées afin de comparer et sélectionner le type de réseau de neurones se prêtant le mieux au contexte de génération de gamme d'usinage. Un réseau de neurones perceptron multicouches (« Multi-Layer Perceptron », MLP) avec rétro-propagation a été sélectionné (Derome, 2008). Le réseau de neurones a également été développé afin d'accueillir les paramètres significatifs qui guideront les décisions prises par le système d'intelligence artificielle pour la génération de la gamme d'usinage. L'architecture du réseau est donc composée d'une couche d'entrée, d'une couche de sortie et de couches cachées dans la boîte noire, comme l'illustre la figure 8.1.

La couche d'entrée est composée de neurones associés à des paramètres significatifs ayant une influence sur la décision à prendre. Ces paramètres doivent être numériques et toujours disponibles pour un même réseau de neurones. Par exemple, pour le choix du type de montage de la pièce, les paramètres d'entrée pourraient être les dimensions d'encombrement de la pièce (longueur, largeur et épaisseur) et le vecteur de direction d'accès à l'entité d'usinage, donc un total de quatre neurones.

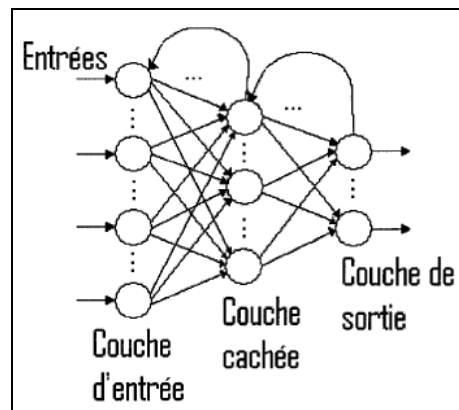


Figure 8.1 Représentation d'un réseau de neurones MLP avec rétro-propagation.
(Derome, 2008)

Source : Cette figure a été tirée du mémoire de M. Derome, *L'association de stratégies d'usinage pour les pièces structurales en aéronautique avec des caractéristiques de forme en utilisant un réseau de neurones*, p. 213.



La couche de sortie est également composée de neurones représentant les solutions possibles au problème. Pour l'exemple précédent, les solutions possibles pourraient être un montage en plateau ou en équerre, donc comportant 2 neurones de sortie.

Enfin, pour la couche cachée, un nombre de neurones doit être déterminé, généralement entre le nombre de neurones d'entrée et de sortie. Le nombre de neurones de la couche d'entrée, de sortie et cachée pour un même réseau doit demeurer invariable. Ainsi, pour le choix du type de montage (plateau ou équerre), il est essentiel de fournir les quatre paramètres d'entrée énoncés plus haut. Il faut donc s'assurer de la disponibilité des paramètres dans les différentes situations possibles. Pour cette raison, il peut être avantageux de diviser un problème général en plusieurs petits problèmes. L'exemple du choix du type de montage illustre bien cette difficulté. En effet, il est essentiel de considérer l'ensemble des entités d'usinage pour effectuer un choix optimal du type de montage. Toutefois, puisque le nombre d'entités d'usinage varie d'une pièce à une autre, ceci implique que le nombre de neurones en entrée varie également. Il est donc impossible de sélectionner le type de montage en une seule étape. Il est alors nécessaire de sélectionner le type pour chacune des entités d'usinage. Ensuite, les résultats obtenus pourront être combinés et analysés afin de sélectionner un montage ou une combinaison de montages qui seront adaptés aux diverses entités d'usinage.

La présentation des caractéristiques d'un réseau de neurones suggère donc qu'il faut fournir des paramètres significatifs afin de guider chacune des décisions. Ces paramètres devront être influents dans le choix à effectuer parmi les options disponibles. Évidemment, plus le nombre de paramètres à analyser est élevé, plus le temps de résolution du problème sera grand. Dans cette optique, les connaissances d'usinage pour la fabrication de pièces aéronautiques ont été formalisées et synthétisées. Les paramètres significatifs ont été mis en évidence et ils ont été associés aux différentes décisions qui doivent être prises dans le processus de génération d'une gamme d'usinage. Les résultats de ce travail permettront donc de déterminer le nombre et la nature des paramètres d'entrée et de sortie des réseaux de neurones constituant l'outil de génération de gamme d'usinage.

8.2 Structure proposée de l'outil de génération de gamme

Comme suggéré précédemment, il est préférable de diviser le problème global de génération de la gamme d'usinage en plusieurs petits sous problèmes. Ceci implique donc de créer différents modules comprenant chacun un réseau de neurones dédié à l'application spécifique. Pour demeurer en harmonie avec la philosophie derrière un réseau de neurones, il est cohérent de respecter les étapes de résolution du cerveau humain. L'architecture globale correspond donc à la figure 8.2, où la plupart des étapes se prêtent bien à l'utilisation d'un réseau de neurones en respectant les caractéristiques associées à celui-ci. Toutefois, l'étape de l'enrichissement du modèle CAO repose plutôt sur un traitement informatique d'interprétation du modèle.

8.2.1 Enrichissement du modèle CAO

Les éléments de départ que le préparateur détient au moment de construire la gamme d'usinage sont les ressources matérielles disponibles et les informations sur le modèle CAO de la pièce à usiner, comme présentés au chapitre 4 et au chapitre 5 respectivement. À partir de cet instant, le générateur de gamme entre en fonction et commence à analyser la pièce, à partir du fichier CAO, afin de soutirer un maximum d'informations. Cette étape requiert des outils d'extraction de caractéristiques associées à des éléments géométriques élémentaires, comme les surfaces et les arêtes. Les paramètres intéressants à recueillir se retrouvent dans le tableau 5.4. Ces informations, correspondant plutôt à une interrogation du modèle CAO qu'à une décision à prendre ne nécessite pas l'utilisation d'un réseau de neurones. Une fois recueillies, ces informations seront utilisées dans l'outil de détermination des entités d'usinage.

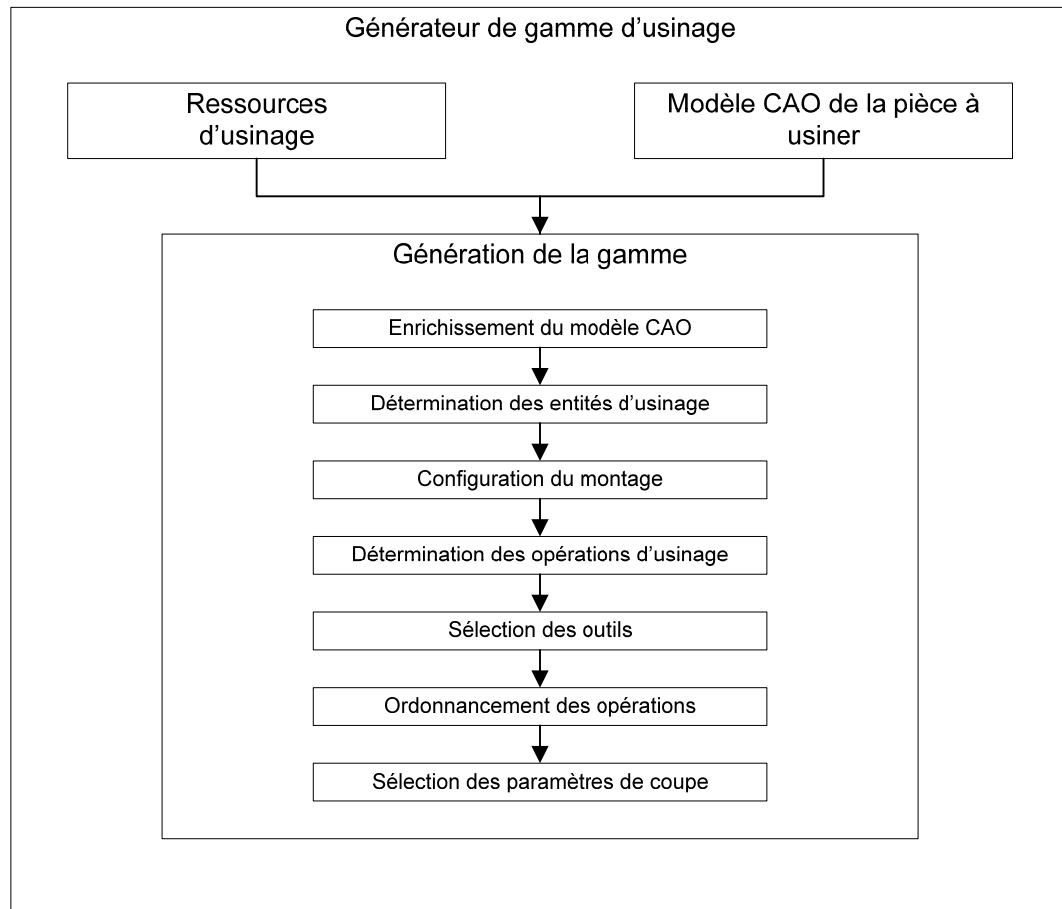


Figure 8.2 Architecture du générateur de gamme d'usinage.

8.2.2 Détermination des entités d'usinage

Le module d'association des surfaces à des entités d'usinage représente le cœur du générateur de gamme. En effet, une surface plane associée à une entité « plan en bout » est déjà une progression énorme vers la sélection d'une opération d'« usinage en bout ». La structure de l'algorithme est illustrée à la figure 8.3.

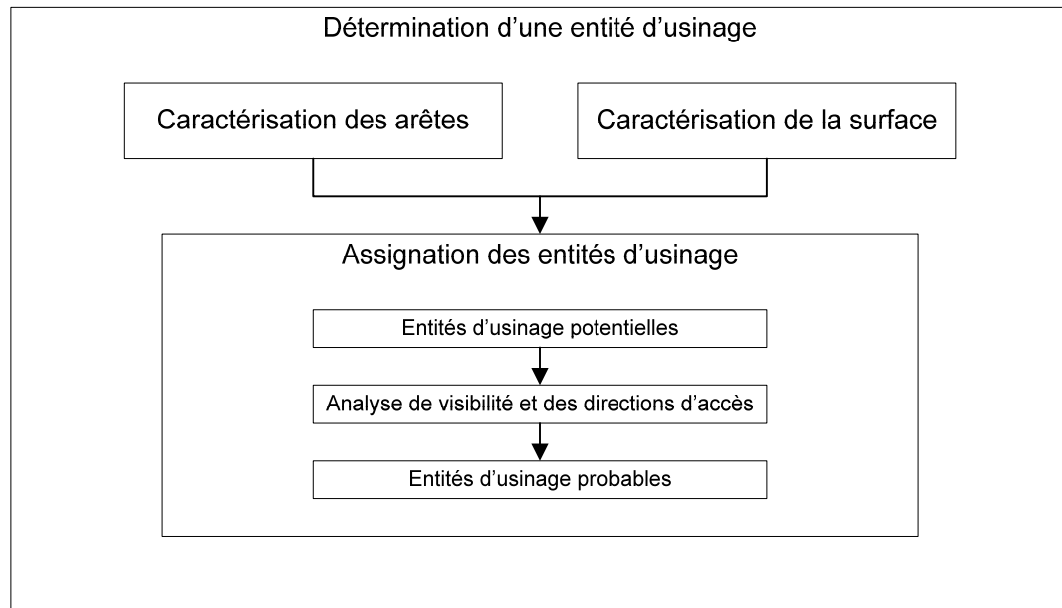


Figure 8.3 Réseau de neurones d'attribution des entités d'usinage.

Les entrées du réseau de neurones sont les caractéristiques de la surface et de ses arêtes. Un réseau de neurones sera donc créé pour chacun des cinq types de surface. Ceci est nécessaire en raison de la limitation des réseaux de neurones à maintenir un nombre d'entrées fixes. Il devient alors difficile de généraliser le problème à une variété de types de surfaces comportant chacune des caractéristiques propres et variables, malgré que certaines caractéristiques soient communes à tous les types. Un problème semblable survient également dans l'analyse des arêtes d'une surface. En effet, puisque le nombre d'arêtes varie d'une surface à une autre de même type, les caractéristiques doivent également être généralisées. Ainsi, plutôt que de spécifier le type de chacune des arêtes, il serait plus significatif de spécifier le nombre d'arêtes droites, circulaires et planaires. La même approche devrait être privilégiée pour la qualification des arêtes. Le nombre d'arêtes ouvertes, fermées, tangentes-ouvertes, tangentes-fermées, prolongements et inflexions serait spécifié comme entrée au réseau de neurones. À partir de ces informations, le réseau de neurones sera en mesure d'établir ses propres règles afin de sélectionner l'entité d'usinage correspondante, parmi les neuf types énoncés à la section 5.2. Par exemple, son entraînement lui dictera les éléments permettant de reconnaître un raccordement, composé dans la majorité des cas par une surface balayée à rayon constant, comportant une nature

fermée ou semi-ouverte, une aire faible, un rayon de balayage de faible dimension, au moins deux arêtes circulaires et deux arêtes directrices de nature tangentes-fermées.

À la suite de cette première assignation des entités d'usinage, une analyse de visibilité pourra être effectuée. Ceci permettra d'éliminer certaines options en raison du voisinage de l'entité, et de définir les entités d'usinage probables. Par exemple, une surface plane peut être associée à un plan en bout, en flanc, libre ou à une extrémité d'élancement. Toutefois, si cette surface correspond au fond d'une poche, il sera impossible de l'usiner en flanc. Cette option pourra donc être éliminée définitivement. La mise en oeuvre de cet outil pourrait reposer sur une des méthodes d'analyse d'accessibilité proposées par Derigent (Derigent, 2005). Les méthodes proposées sont spécifiques à chaque type d'entité. L'étude présentée indique un niveau de difficulté supérieur pour l'analyse des entités « plan en flanc » comparativement aux entités « plan en bout ». Ceci s'explique par la multitude d'orientations possibles de l'outil pour l'usinage en flanc, alors que l'usinage en bout n'est associé qu'à une seule direction d'usinage possible.

Évidemment, puisque cette étape est effectuée tôt dans le processus, il sera impossible pour certaines surfaces de leur associer une seule et unique entité d'usinage. Le réseau de neurones retournera donc un ensemble de possibilités pondérées selon un niveau de confiance. Ces différentes options pourront ensuite être étudiées afin de conserver celle s'adaptant le mieux à la configuration de la MOCN et du montage, afin de garantir l'accès à l'entité.

8.2.3 Configuration du montage

Le tableau synthèse présenté à la fin du chapitre 6 indique qu'il y a deux éléments majeurs à déterminer dans la configuration du montage : le type de montage et le mode de fixation. Le cas à l'étude est muni d'un bloc de montage comportant cinq faces de montage. Il est donc possible de monter la pièce sur le plateau ou en équerre. Le plateau dispose d'un étau d'usinage, tandis que les équerres sont munis de deux plaques de montage, d'un alignement de trois étaux ou de crampons-plaqueurs. Les éléments déterminants dans la sélection de la configuration du montage sont les dimensions d'encombrement de la pièce à usiner et les vecteurs de direction d'accès de chacune des entités d'usinage. De plus, il a

été établi que le ratio d'épaisseur de la matière brute pouvait s'avérer significatif dans le choix du mode de fixation, pour déterminer notamment les montages en un ou deux posages.

Encore ici, l'existence d'un nombre d'entités variable pose un problème afin de vérifier l'accessibilité de celles-ci selon le montage choisi et la plage de visibilité de la MOCN. De plus, l'ensemble infini de possibilités d'orientation pour une MOCN de plus de trois axes, donc comportant un ou plus d'un axe rotatif, est à première vue incompatible avec les critères d'admissibilité d'un réseau de neurones. Une solution à cette difficulté pourrait être de discrétiser le domaine des solutions. À titre d'exemple, la plage de positions angulaires pourrait être subdivisée en portions angulaires finies, par incréments de 45° . Cet aspect devrait donc être étudié plus en détail dans le cadre de travaux futurs. Néanmoins, différentes avenues sont possibles afin de résoudre cette difficulté.

Le choix du mode de fixation semble tout de même propice à l'utilisation du réseau de neurones. Son architecture pourrait correspondre à la figure suivante.

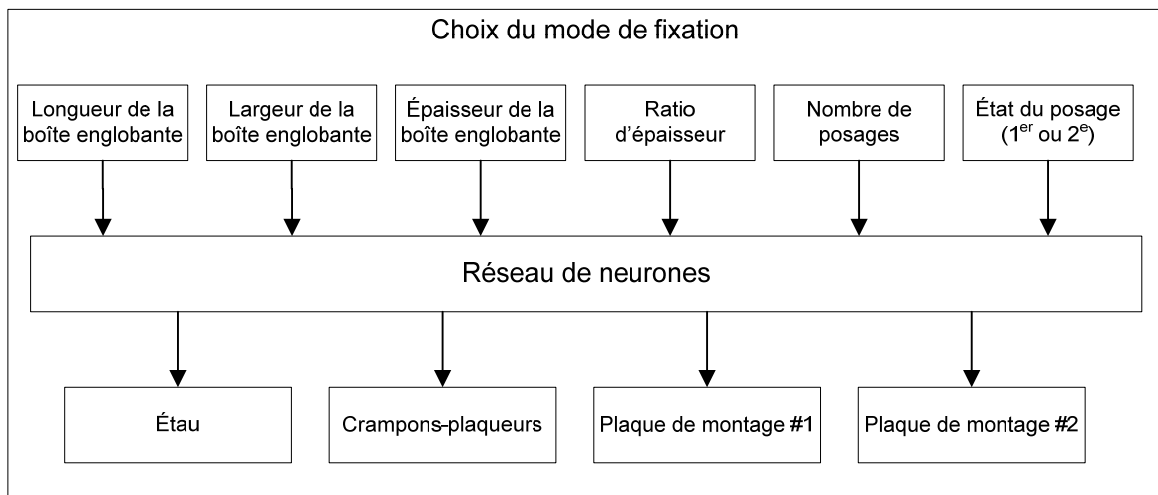


Figure 8.4 Choix du mode de fixation du montage.

Quant au choix lié à la matière brute, il sera probablement impossible d'obtenir comme résultat ses dimensions d'encombrement à la sortie du réseau de neurones, encore une fois en raison du domaine de solution infini qui serait engendré. Malgré le fait qu'il a été

déterminé chez le partenaire industriel que les dimensions de la matière brute sont normalisées, cette discrétisation risque fort de constituer un problème lourd à solutionner et à entraîner. Il est envisageable de déterminer la surépaisseur de matière qui sera ajoutée sur les surfaces de la boîte englobante de la pièce à usiner par un algorithme de calcul simple. De la même façon, les dimensions de la matière brute pourraient être déterminées, le recours à un réseau de neurones étant incompatible avec ce type de décision. Le tableau synthèse fournit également différentes variables ayant une influence sur l'orientation de la matière brute par rapport à la pièce.

8.2.4 Détermination des opérations d'usinage

À la section 8.2.2, il a été affirmé que la détermination des entités d'usinage représente la pierre angulaire du générateur de gamme. En réalité, une fois l'association des surfaces aux entités d'usinage réalisée, une partie importante du travail est effectuée afin de déterminer l'opération d'usinage adéquate. Dans certains cas, une même surface peut être associée à plus d'une entité d'usinage. Un exemple a d'ailleurs été présenté à la figure 6.3, où une surface plane peut correspondre à trois modes d'usinage distincts. Par contre, la configuration du montage et la configuration des axes de la MOCN peuvent contribuer à éliminer des options envisagées à première vue. À cette fin, le générateur de gamme pourrait incorporer un réseau de neurones pour effectuer la sélection du mode d'usinage associé aux entités d'usinage déterminées précédemment. La figure suivante illustre l'architecture proposée.

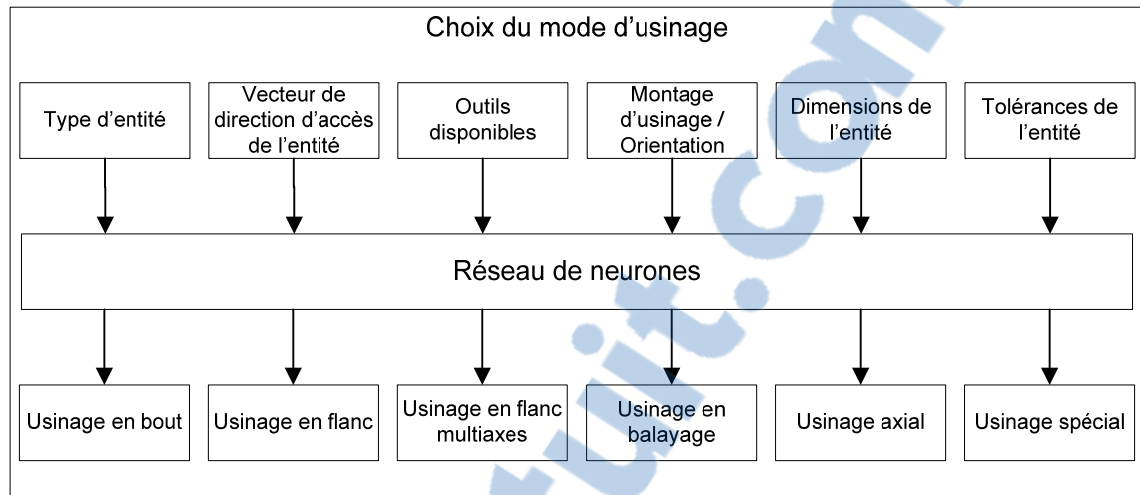


Figure 8.5 Réseau de neurones de sélection du mode d'usinage.

Dans plusieurs cas, l'association de l'entité et du mode d'usinage est directe. Par exemple, un plan en bout est associé à un usinage en bout. Par contre, une vérification de l'accessibilité de la MOCN est nécessaire, en lien avec le vecteur de direction d'accès de l'entité. Ce paramètre pourrait faire l'objet d'une analyse préalable à l'utilisation du réseau de neurones afin de s'adapter aux différentes entités. Par exemple la normale à la surface dans le cas d'une entité « plan en bout », ou bien par le vecteur de la génératrice dans le cas d'une entité « profil » ou « alésage ». Afin de minimiser le temps de résolution du problème, les outils disponibles pourraient être subdivisés par catégories, plutôt que de fournir les paramètres complets de définition de l'outil. Par exemple, les options disponibles pourraient être basées sur le type: fraise en bout torique, sphérique, foret et fraise à surfacer. À titre d'exemple, l'usinage d'un profil incliné avec une fraise conique pourrait être éliminé, permettant de conclure qu'un usinage multiaxes est nécessaire pour usiner l'entité.

La synthèse des connaissances d'usinage a également indiqué que les dimensions et les tolérances associées à l'entité ont un impact sur le choix du mode d'usinage. En effet, comme un mode d'usinage en bout permet d'atteindre un fini de surface et une qualité différente d'un usinage en flanc, ces informations peuvent avoir un effet sur le choix du mode d'usinage.

8.2.5 Sélection des outils

La sélection des outils est généralement intimement liée au mode d'usinage. Par exemple, un usinage en flanc ou en bout est effectué avec une fraise torique dans la majorité des cas. Dans un même ordre d'idée, un usinage axial requiert généralement un foret, tandis qu'un balayage est souvent effectué avec une fraise hémisphérique ou torique. Ainsi, différents petits réseaux de neurones seraient nécessaires afin de sélectionner l'outil de coupe. Celui pour déterminer le type d'outil est illustré ci-dessous. Évidemment, les solutions à la sortie du réseau de neurones seront liées aux types d'outils disponibles dans le magasin d'outil de la MOCN.

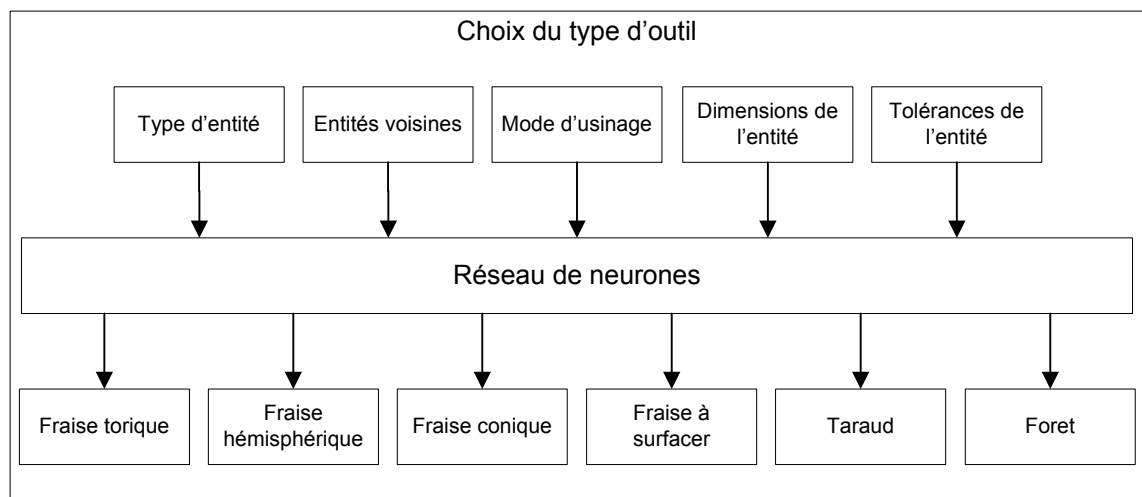


Figure 8.6 Réseau de neurones du choix du type d'outil.

Les entrées du réseau de neurones de sélection du type d'outil devront être adaptées afin de généraliser le problème pour maintenir un nombre d'entrées constant. Ainsi, les entités voisines devront être représentées par leur nombre. Par exemple, un « plan en bout » pourra être entouré de huit entités « raccordement » et d'une quantité nulle pour les autres types d'entité.

Les réseaux de neurones permettant de procéder à une décision liée à une valeur numérique devraient être discrétisés afin de simplifier la résolution. Par exemple, la sélection du diamètre d'une fraise en bout pourrait retourner une plage de diamètre plutôt

qu'une valeur exacte. Cette discrétisation devra par contre faire l'objet d'une étude plus approfondie afin d'optimiser le temps de résolution tout en maintenant un niveau de précision acceptable. L'architecture proposée pour le choix du diamètre de l'outil correspond à la figure suivante. Cette architecture est également représentative des autres dimensions à déterminer pour l'outil, comme les longueurs ou le rayon de coin, dont les paramètres sont présentés au tableau 6.8.

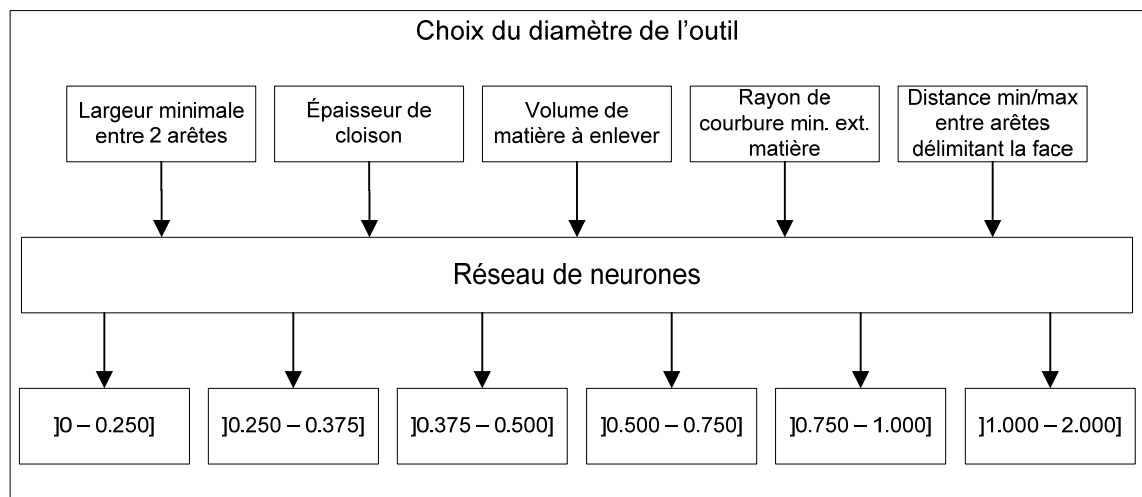


Figure 8.7 Réseau de neurones de choix du diamètre de l'outil.

Le choix du matériau de l'outil ne fait pas l'objet d'une sélection dans le cas présent puisque ce choix ne se présente tout simplement pas. En effet, les outils de fraisage sont généralement disponibles uniquement en carbure de tungstène. Ceux de plus grande dimension sont quant à eux disponibles avec des pastilles de carbure. Les forets sont disponibles soit en cobalt ou en carbure selon la dimension et la tolérance recherchée. Dans certains cas, le foret est dédié à une application particulière, comme le perçage d'un trou de localisation pour les montages en deux posages. Dans ce cas, le foret possède un diamètre spécifique, un matériau et une qualité correspondante à l'application.

8.2.6 Ordonnancement des opérations

Une fois les opérations d'usinage et l'outil de coupe associés à chaque surface, les opérations peuvent être ordonnées. Cette étape est critique puisqu'elle peut avoir des

répercussions importantes sur le résultat de l'usinage. Il a été mentionné précédemment que des antériorités technologiques de même que des considérations de rigidité, de temps et de qualité jouent un rôle important dans l'ordonnancement des opérations. Ces éléments seront donc considérés lors de cette étape de génération de la gamme d'usinage.

De façon globale, les opérations d'usinage peuvent être classifiées selon le montage au cours duquel elles seront réalisées. L'étude a permis de déterminer que les pièces étaient généralement usinées selon un ou deux posages. Ceci permet d'effectuer une distinction fondamentale entre les différentes entités d'usinage. Ensuite, il faut déterminer dans quel ordre seront effectuées les opérations d'usinage pour chacun des montages. La figure 8.8 présente une proposition de l'architecture du module d'ordonnancement des opérations.

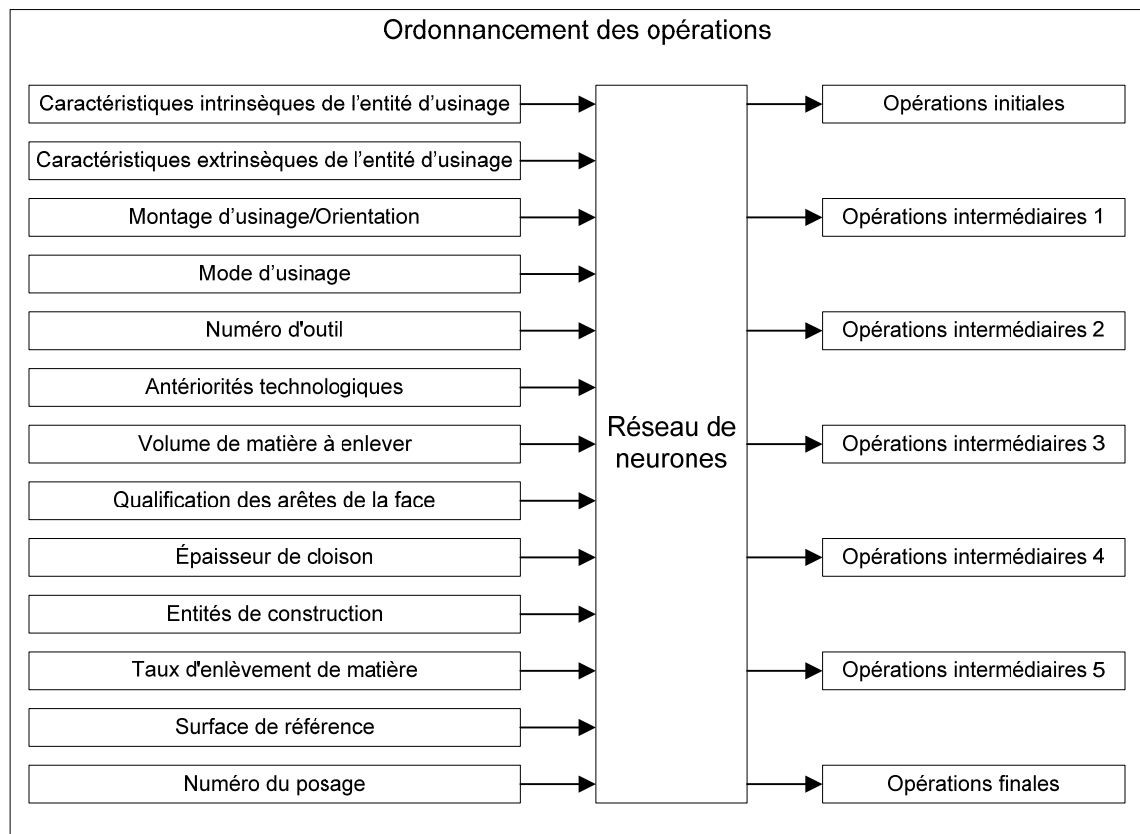


Figure 8.8 Réseau de neurones de l'ordonnancement des opérations.

L'analyse du réseau de neurones proposé indique qu'une multitude de paramètres sont en jeu lors de l'ordonnancement des opérations. En réalité, cette étape implique une

connaissance et une expérience approfondie du comportement de la pièce en cours de fabrication. Il est donc logique que plusieurs paramètres soient considérés dans la décision. La figure précédente liste les paramètres pertinents, dont certains comportent une série de paramètres imbriqués. Par exemple, les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques de l'entité d'usinage associée à l'opération comportent des éléments essentiels à la décision, comme l'état de l'entité (brut, ébauché, semi-fini,...) ou bien sa position relative dans la pièce. Ce dernier point risque d'être particulièrement significatif, notamment face à l'objectif de maximiser la rigidité de la pièce lors de l'usinage. Le numéro de l'outil et son taux d'enlèvement de matière seront un indicateur des efforts de coupe engendrés et du temps d'usinage, par comparaison au volume de matière à enlever.

Le résultat obtenu par le réseau de neurones ne peut toutefois pas indiquer la position chronologique exacte de l'opération d'usinage. Ceci fait partie des limitations des réseaux de neurones, soit leur incapacité à proposer une solution numérique. Les sorties sont plutôt une pondération indiquant un niveau de confiance parmi des sorties préétablies. Ainsi, l'approche proposée consiste donc à subdiviser les résultats en sept groupes d'opérations. La segmentation comporte des opérations initiales, comme l'usinage des faces de référence ou des entités de construction, et des opérations finales, comme la séparation de la pièce de la matière brute. Entre ces deux groupes extrêmes, des opérations intermédiaires seront regroupées, afin de proposer une séquence globale. Le choix du nombre de groupes d'opérations intermédiaires pourrait varier selon les résultats obtenus. Cet élément devra faire l'objet d'une étude ultérieure sortant du cadre du présent travail. De plus, l'ordonnancement préliminaire obtenu sera ensuite retraité afin de déterminer la position exacte des opérations dans la gamme d'usinage.

8.2.7 Sélection des paramètres de coupe

La sélection des paramètres de coupe est une étape de l'usinage généralement bien documentée. Des tables proposant les paramètres de coupe recommandés associés à un outil de coupe sont pratiquement toujours disponibles de la part du manufacturier de l'outil. Malgré le fait que ces tables sont souvent optimistes quant aux performances et qu'elles tiennent peu en considération l'usure des outils, elles sont tout de même un bon point de départ qui peut être ajusté selon les résultats obtenus.

Outre ces tables, des techniques de caractérisation expérimentale permettent de déterminer les paramètres optimaux pour une configuration de machine donnée. Ces techniques sont mieux adaptées et elles permettent même d'établir des paramètres en fonction de différents modes d'usinage et selon l'état de l'entité. Par exemple, des paramètres (avance de coupe, vitesse de rotation et profondeur de coupe axiale) peuvent être établis pour un outil spécifique sur une MOCN donnée lors d'une ébauche en « usinage en flanc » avec une profondeur radiale équivalente au rayon de l'outil.

En somme, ces paramètres associés à des valeurs numériques sont relativement disponibles et faciles à incorporer dans un outil de génération de gamme d'usinage. En réalité, les logiciels de FAO sont généralement pourvus d'une base de données permettant d'inclure les outils disponibles et de leur associer les paramètres adéquats. Toutefois, les réseaux de neurones sont plutôt mésadaptés à ce type de tâche. Pour cette raison, les paramètres de coupe numériques seraient préférablement assignés sans l'utilisation d'un réseau de neurones.

Par contre, les autres paramètres comme le type de mouvement, le sens de mouvement, la surépaisseur de matière pour la finition, les entrées en matière et les mouvements d'approche et de sortie des surfaces se prêtent bien aux réseaux de neurones, notamment parce que ces décisions comportent un ensemble borné de solutions. La figure 8.9 illustre une application possible pour la sélection du type de mouvement d'outil. En effet, selon le mode d'usinage, la trajectoire de l'outil peut différer. L'ébauche d'une poche, qui pourrait être associée à un usinage en bout, est généralement effectuée en spirale. Par contre, le surfacage d'une face ouverte, correspondant également à un « usinage en bout », est plutôt effectué par une trajectoire en zigzag (voir section 6.1.5.5). Ainsi, les caractéristiques de la surface et des arêtes sont également significatives dans le processus de décision, au même titre que les caractéristiques associées à l'entité d'usinage et au type d'outil. Des mouvements spécifiques associés aux perçages sont également inclus parmi les solutions envisageables afin de généraliser le module de sélection du type de mouvement à tous les modes d'usinage disponibles.

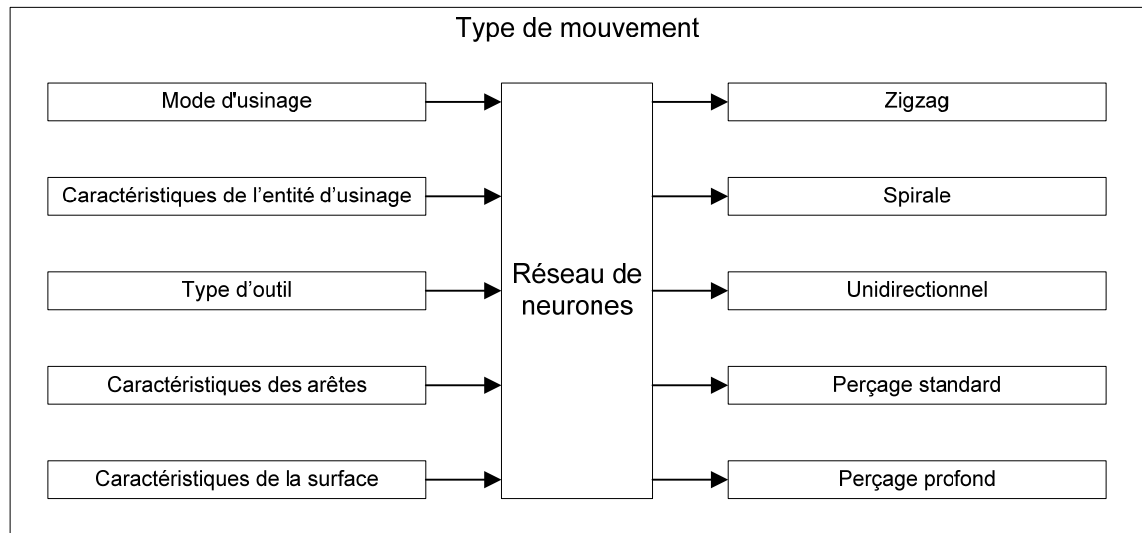


Figure 8.9 Réseau de neurones de sélection du type de mouvement.

Dans une approche similaire, les autres paramètres mentionnés précédemment pourraient faire l'objet d'une sélection utilisant un réseau de neurones incorporant comme paramètres d'entrée et de sortie les éléments présentés à la synthèse du chapitre 6.

8.3 Discussion

De nombreux travaux de recherches ont été effectués jusqu'à présent afin d'apporter une assistance aux étapes de génération de la gamme d'usinage. Ceux-ci ont traité d'une foule de sujets, que ce soit de l'analyse de la géométrie et de reconnaissance d'entités d'usinage ou bien des paramètres de coupe des outils et des montages d'usinage. Certains ont même proposé des solutions pour la génération automatique des gammes de fabrication. Toutefois, deux éléments contraignants reviennent régulièrement : l'existence d'un fossé entre le module de conception et celui de fabrication assistée par ordinateur et le besoin de l'expertise et du savoir-faire du personnel des méthodes pour effectuer les choix qui sont en jeu lors de la génération d'une gamme d'usinage.

La première contrainte a été adressée à de nombreuses reprises, faisant en sorte que le vide sémantique commence à être comblé. Des informations peuvent donc être extraites du

modèle numérique de la pièce à usiner afin de l'enrichir d'attributs constituant les intrants du modèle de décision lors de la génération de la gamme.

La seconde contrainte vient chronologiquement après la première puisque c'est à partir des connaissances du gammiste que les choix sont effectués. Il est fréquent que le savoir-faire des gammistes soit cité comme étant à la base de tout programme d'usinage. Pour cette raison, il est essentiel que ces connaissances soient formalisées afin qu'elles puissent être intégrées à un logiciel d'assistance à la création de gammes d'usinage. C'est spécifiquement sur cet aspect que portait la présente recherche, sur le recensement des paramètres décisionnels d'influence, leur formalisation en vue de leur utilisation dans un système complet d'assistance à la génération de gammes d'usinage utilisant en partie l'approche de l'intelligence artificielle par les réseaux de neurones. L'utilisation de réseaux de neurones et l'entraînement de ceux-ci contribue à réunir l'expertise et le savoir-faire du personnel des méthodes. Cette expertise est ensuite utilisée afin de procéder aux choix implicites lors de la génération d'une gamme d'usinage.

Les différents éléments et paramètres énoncés afin de caractériser les connaissances d'usinage des spécialistes peuvent être mis en relation avec les intrants obtenus par l'enrichissement de la géométrie. Les règles très générales énoncées dans la littérature traitant de l'usinage peuvent alors être raffinées au cas particulier de l'industrie aéronautique, tant au niveau du choix des ressources qu'en ce qui concerne les stratégies d'usinage. Bref, la portion de la génération de la gamme d'usinage qui repose sur les connaissances des experts des méthodes est maintenant plus accessible pour une éventuelle intégration dans la base de connaissances d'un logiciel permettant une transition plus fluide entre la CAO et la FAO.

Cette intégration peut se faire de différentes façons, dont l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle. Les réseaux de neurones figurent parmi ces techniques où des décisions basées sur des paramètres significatifs sont prises parmi une quantité donnée de solutions. Le problème de génération de gamme d'usinage peut ainsi être décomposé en sous-problèmes et résolu en majeure partie à l'aide de cet outil de prise de décision. De plus, les réseaux de neurones possèdent un avantage exceptionnel : ils ne nécessitent pas le recours à des règles de décisions contraignantes. En effet, les réseaux de neurones

construisent, de façon autonome, leurs propres règles de décision lors de leur période d'entraînement. Ces règles demeurent donc transparentes tout au long du processus d'apprentissage. Ces règles, intrinsèques au réseau de neurones, seront ensuite utilisées afin d'effectuer une prise de décision pendant la génération de la gamme d'usinage. En fin de compte, ceci se traduit par une base de connaissances ne nécessitant aucun entretien. De plus, cet aspect confère aux réseaux de neurones une adaptabilité hors du commun.

En se basant sur les caractéristiques des réseaux de neurones, une structure globale de génération de gamme d'usinage a été présentée. La contribution du présent travail consiste donc en une analyse approfondie des techniques d'usinage appliquées aux pièces aéronautiques structurales. De cette analyse, une foule de paramètres décisionnels significatifs ont été mis en évidence. Un exemple a permis d'illustrer la démarche de réalisation de la gamme d'usinage, démontrant parallèlement les paramètres décisionnels pouvant être extraits de façon automatique dans la majorité des cas. De plus, chacune des étapes de génération de la gamme d'usinage a été associée à une architecture de résolution du sous-problème adaptée à un réseau de neurones. Des paramètres d'entrée et de sortie ont été proposés, en lien avec les connaissances d'usinage formalisées à la suite de la revue de la littérature et des entrevues réalisées auprès du partenaire industriel.

CONCLUSION

L'industrie aéronautique est en quête constante de réduction de poids de ses produits. Cet objectif les conduit à optimiser la conception des composants à un niveau très élevé et dans la plupart des cas, il en découle des poches et des géométries peu conventionnelles. L'usinage est donc le procédé de fabrication tout indiqué pour mettre en forme ces composants. Il s'ensuit également une variété impressionnante de pièces, mais produites en faible quantité. Les manufacturiers et leurs bureaux des méthodes sont alors aux prises avec une charge importante de pièces nécessitant une préparation pour l'usinage. Cette tâche est toutefois laborieuse, exigeant plusieurs heures de planification et de programmation, le tout parsemé d'une multitude de tâches répétitives. Ce travail nécessite une bonne connaissance des techniques d'usinage afin de produire des pièces de qualité dans un temps raisonnable. Ceci représente une valeur inestimable pour ces entreprises, leur permettant de se démarquer et de demeurer rentables. Par contre, la situation actuelle de l'emploi favorise une forte mobilité de la main-d'œuvre, ayant pour conséquence le départ d'un savoir-faire précieux.

Face à ces difficultés ainsi qu'à une compétitivité féroce dans le secteur manufacturier, plusieurs démontrent une volonté d'améliorer leur productivité. Celle-ci passe entre autres par une meilleure intégration entre les logiciels de conception et de fabrication assistée par ordinateur. Cette intégration ouvre la porte à des outils d'assistance à la génération des programmes d'usinage, solutionnant du même coup les problèmes de faible productivité et de conservation des connaissances d'usinage.

Les travaux dans ce domaine sont entrepris depuis plusieurs années et des avancées grandement intéressantes ont été réalisées afin d'effectuer la liaison entre les modules de conception et de fabrication. Une multitude d'informations peuvent être extraites du modèle CAO, menant à la définition d'entités d'usinage. Ces entités d'usinage peuvent ensuite être associées à des opérations d'usinage, le logiciel de FAO n'ayant alors plus qu'à générer la trajectoire d'usinage. Une étape reste toutefois à traiter avant de procéder à la création du parcours d'outil et celle-ci repose sur les connaissances du gammiste et du programmeur. En effet, la génération d'un programme d'usinage ne se résume pas uniquement à une succession d'opérations d'usinage. Cette tâche doit être basée sur une stratégie de

fabrication qui doit tenir compte d'une foule de facteurs de décision qui feront en sorte que le résultat atteindra la qualité escomptée pour un temps de fabrication minimum.

L'objectif de cette recherche consistait donc à formaliser les connaissances d'usinage, à définir les étapes de génération de gammes d'usinage et à établir des règles guidant le processus de fabrication par usinage. Puisque cette activité peut rapidement prendre beaucoup d'ampleur, la recherche s'est limitée aux pièces structurales aéronautiques obtenues sur des centres d'usinage.

Les travaux ont d'abord présenté les ressources disponibles pour la fabrication des pièces aéronautiques. Ainsi, les machines-outils, les outils de coupe, les montages d'usinage et la matière brute ont été décortiqués, ceux-ci représentant les instruments de travail du machiniste. Ensuite, les informations brutes provenant du bureau d'études ont été présentées. Ces informations constituent les requis de conception que le bureau des méthodes doit suivre afin de produire une pièce répondant aux critères de fonctionnalité. Celles-ci englobent la géométrie, les dimensions, les tolérances et spécifications particulières, le matériau ainsi que la quantité à fabriquer. Il a été vu que ces éléments influencent fortement les choix qui sont pris lors de la génération de la gamme. Et puis, les étapes de génération de la gamme d'usinage ont été analysées en profondeur dans une optique d'intégration logicielle. Les objectifs ont été établis, pour ensuite présenter les étapes d'analyse de la géométrie basée sur les nombreux travaux de la communauté scientifique relatifs aux entités d'usinage et aux directions d'accès pour l'usinage de ces mêmes entités. Subséquemment, des règles ont été exposées afin de guider les choix quant aux ressources pour l'usinage des entités. Plusieurs méthodes sont présentées afin d'illustrer des stratégies d'usinage, représentant le savoir-faire caractéristique de l'industrie aéronautique. Parmi les stratégies formulées, on retrouve notamment une distinction fondamentale entre deux catégories de pièces représentatives de la grande majorité des pièces rencontrées : celles usinées en un ou deux posages. Les stratégies portent également sur le choix des opérations d'usinage et sur l'ordonnancement de ces dernières. Finalement, les paramètres de coupe mettent l'accent sur les règles générales typiques. Cette formalisation de connaissances et de règles relatives à l'usinage de pièces structurales aéronautiques a permis de mettre en lumière une multitude de paramètres intimement liés aux décisions qui sont prises dans le processus de génération de gamme

d'usinage. Ces paramètres significatifs ont été synthétisés sous la forme de tableaux et ils ont été associés à différents groupes de décision. Les différentes solutions du processus de décision ont également été associées à ces groupes.

Afin de valider la justesse de la formalisation des connaissances d'usinage de pièces structurales aéronautiques, une mise à l'essai de la logique proposée a été effectuée. Sur la base des connaissances recueillies, une gamme d'usinage a été élaborée manuellement, pour l'usinage d'une pièce aéronautique simple sur un centre d'usinage. La gamme résultante a ensuite été comparée à celle réalisée par le partenaire industriel pour la même pièce. L'essai a permis de constater une similitude entre les deux approches d'usinage, notamment au niveau de l'analyse de la géométrie et sur le choix des opérations d'usinage. L'ordonnancement des opérations correspondait également avec la gamme de référence, la majeure différence se situant au niveau du groupement des surfaces. La mise à l'essai a donc permis de confirmer la validité des connaissances présentées.

Enfin, l'utilisation de ce travail de formalisation des connaissances a été présentée. Une structure de génération de gamme d'usinage utilisant des réseaux de neurones a été proposée. Les caractéristiques principales de fonctionnement d'un réseau de neurones ont été exposées. L'élément distinctif d'un réseau de neurones repose sur le fait qu'il ne nécessite pas l'élaboration d'une base de connaissances incorporant des règles de décision explicites. Il construit plutôt sa logique de décision par un entraînement, où des paramètres d'entrée à un problème et la solution lui sont fournis. Cet entraînement lui permet de bâtir ses propres conclusions et d'établir les liens entre les paramètres d'entrée fournis. Une fois entraîné, le réseau de neurones est en mesure de déterminer la solution à un problème, basé sur l'expérience acquise. Ceci met en relief l'importance des paramètres d'entrée qui seront fournis au réseau de neurones. C'est principalement cet aspect qui faisait l'objet de cette étude. La synthèse des paramètres significatifs soulevés lors de la formalisation des connaissances ainsi que les différentes pistes de solutions envisageables sont donc les éléments constitutifs déterminants des réseaux de neurones. Sur cette base, le problème de génération de gamme d'usinage a été décomposé en plusieurs sous-problèmes, où chacun d'eux est résolu à l'aide d'un réseau de neurones comportant les entrées et sorties associées. Une proposition d'architecture des différents modules de résolution du problème

global a été présentée. Ces architectures devront ensuite être mises à l'essai dans le cadre de travaux futurs.

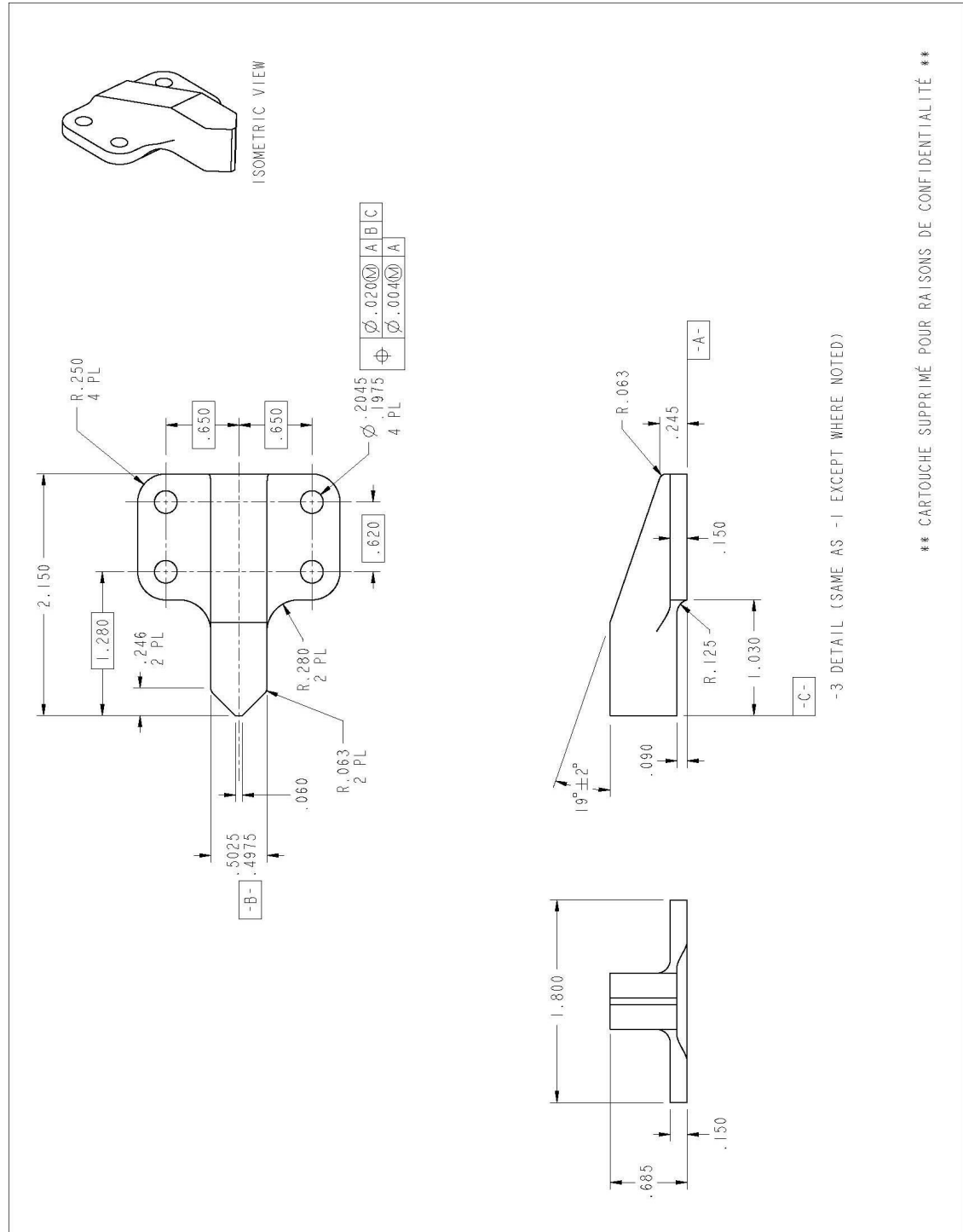
Les résultats obtenus semblent intéressants, mais ils doivent tout de même être analysés dans le contexte du projet. Les connaissances exposées sont valables dans le cadre du secteur aéronautique pour des pièces structurales et plus particulièrement à une configuration de machine spécifique comportant un montage d'usinage standard destiné à un type de pièces relativement restreint, notamment au niveau des dimensions. Les entités d'usinage considérées représentent quant à elles la majorité des pièces rencontrées, mais ne couvrent pas des cas particuliers nécessitant des procédés spécifiques. De plus, dû à la lourdeur de la tâche, l'exploration des méthodes d'usinage s'est restreinte à un faible nombre de pièces. L'étude d'une population de pièces de plus grande envergure permettrait d'enrichir la base de connaissances. Malgré cela, plusieurs règles énoncées sont tout de même applicables à un contexte plus large.

Le travail de recherche apporte donc un élément additionnel à l'intégration des connaissances dans un système d'assistance à la génération de gammes d'usinage. Ces connaissances pourront servir de point de départ, pour ensuite être enrichies afin de refléter un éventail plus large de familles de pièces et de configurations d'usinage. Cet enrichissement pourra passer par l'exploration d'un nombre plus élevé de composants. Une autre approche pourrait consister à procéder par ingénierie inverse sur des programmes d'usinage existants, le tout supporté par un logiciel. Ceci permettrait alors d'amasser un nombre élevé d'informations et d'établir des statistiques basées sur les habitudes de programmation propres à différentes situations.

La mise en œuvre de la structure de génération de gamme d'usinage proposée figure également parmi les prochaines étapes du projet. Celle-ci permettra de valider la structure de l'outil de génération de gamme d'usinage, la pertinence des paramètres d'entrée proposés et de confirmer l'ensemble des solutions associées à chacun des modules de prise de décision. Les paramètres proposés sont donc appelés à évoluer, à être raffinés ou à être adaptés à différents contextes.

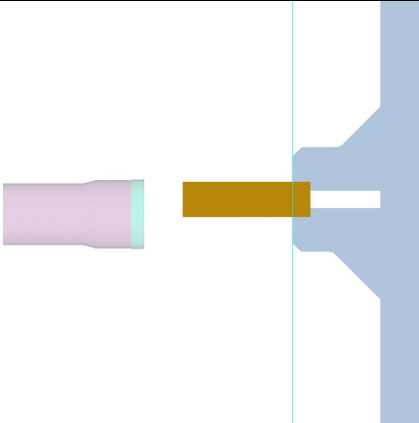
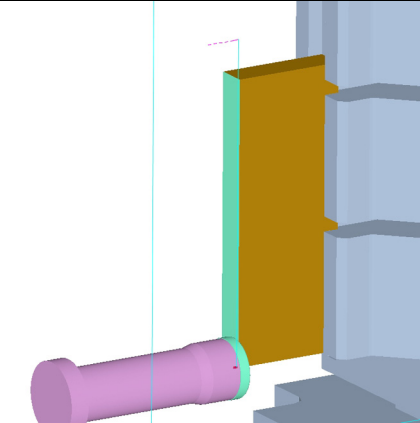
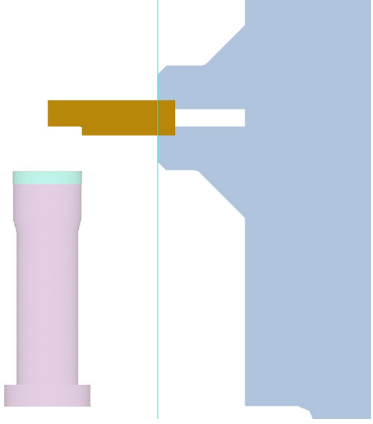
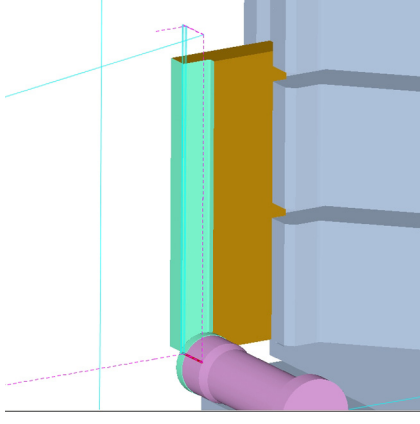
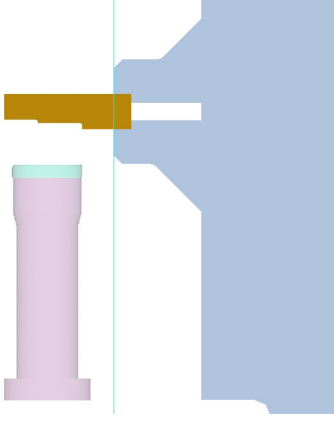
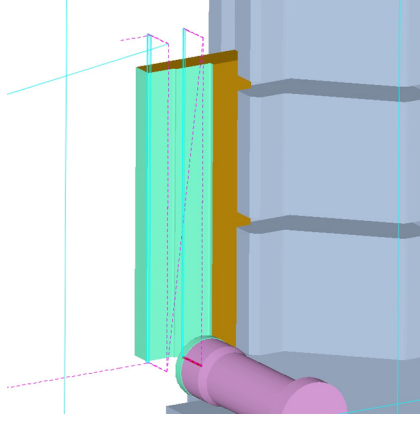
ANNEXE I

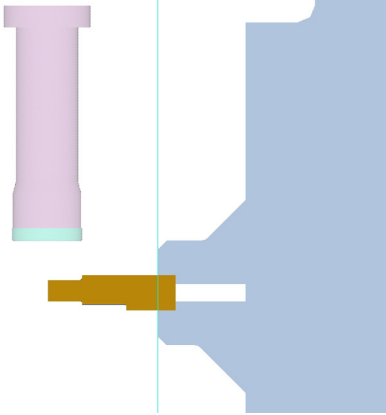
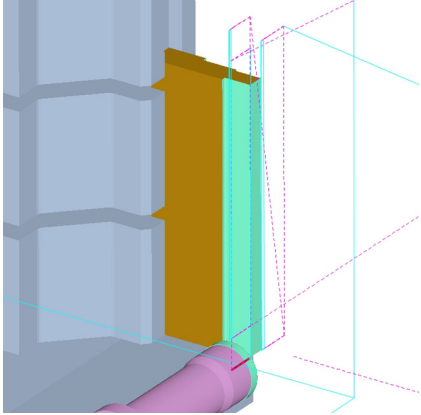
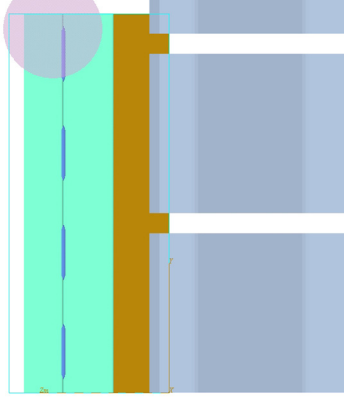
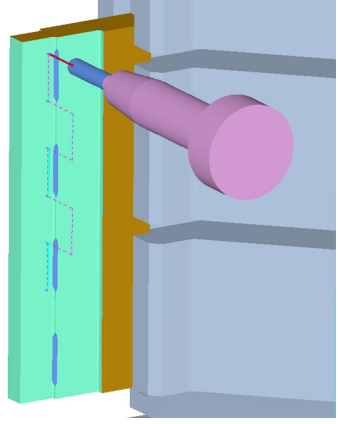
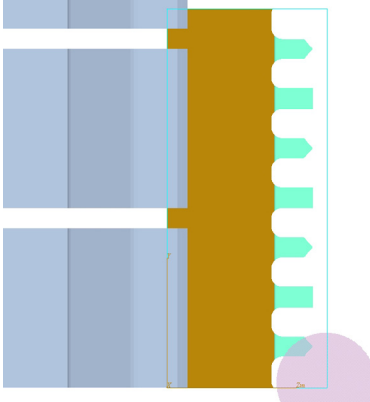
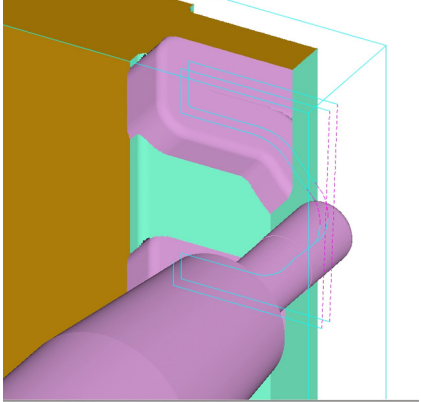
DESSIN DE DÉTAIL DE LA PIÈCE EXEMPLE

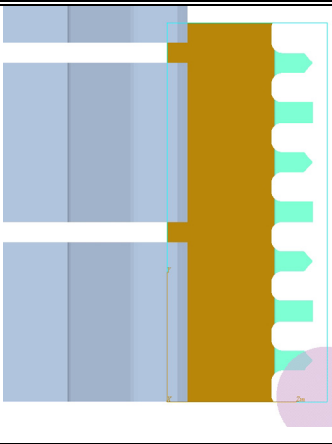
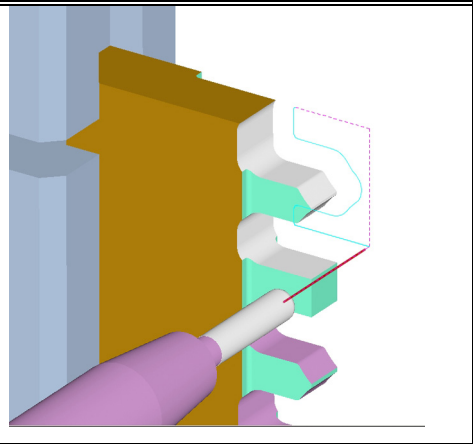
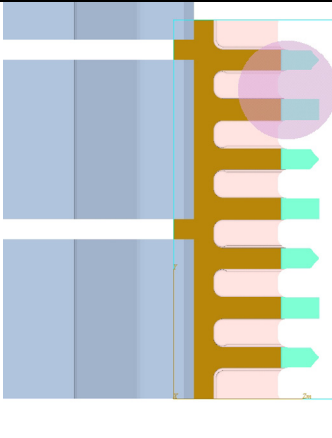
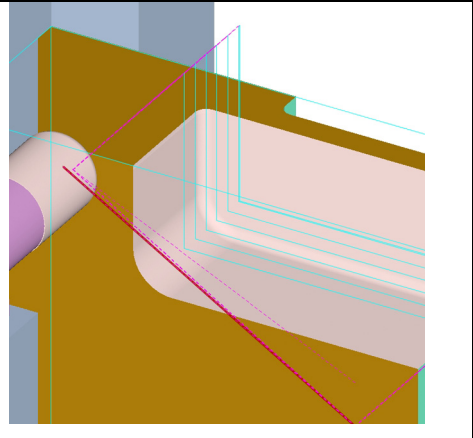
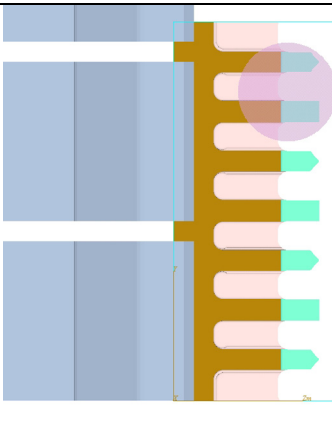
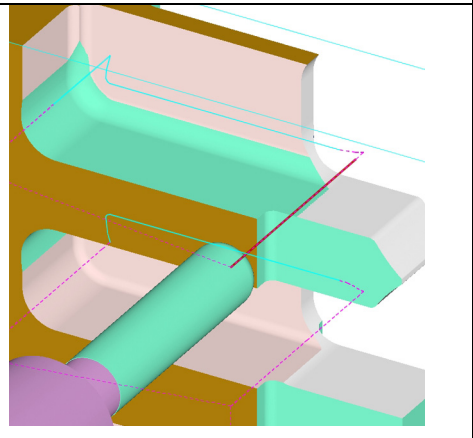


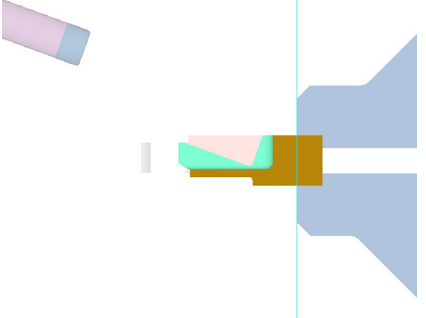
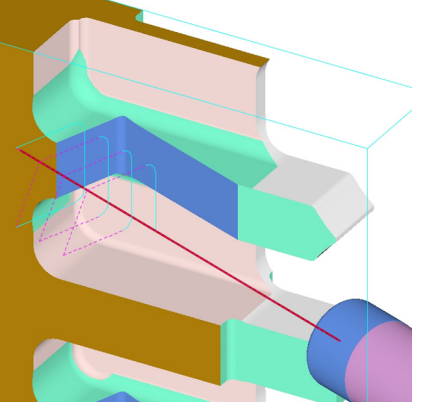
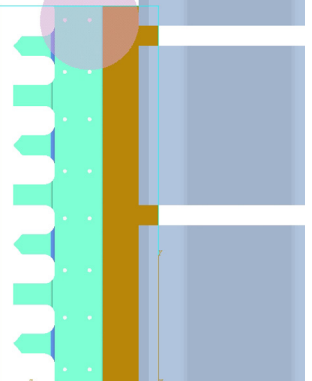
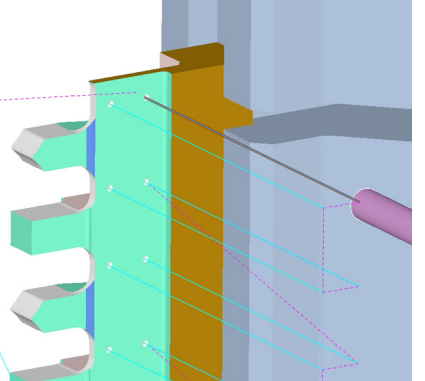
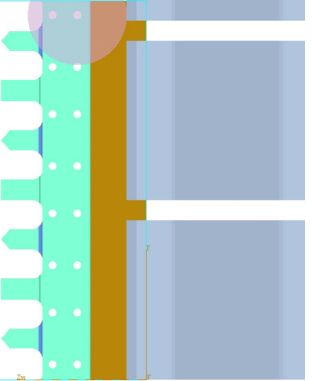
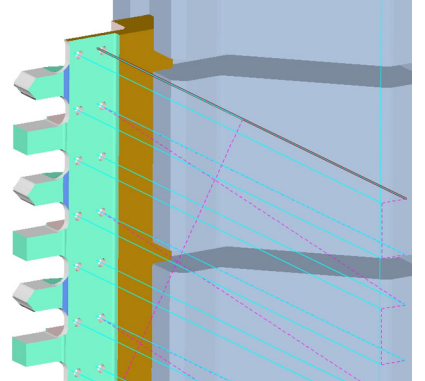
ANNEXE II

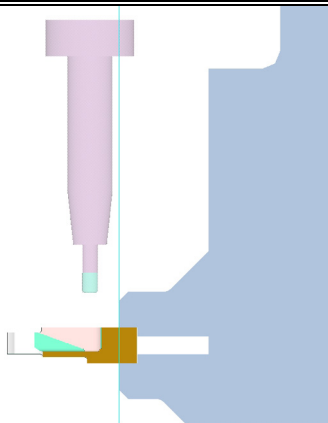
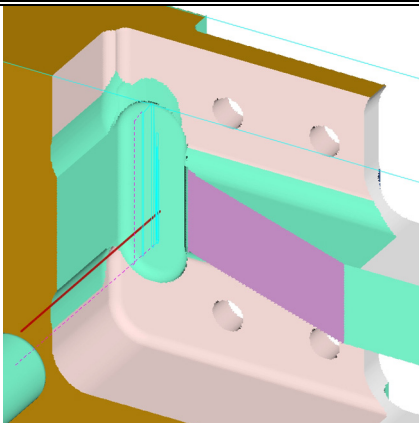
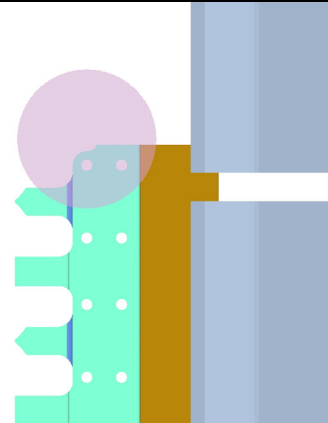
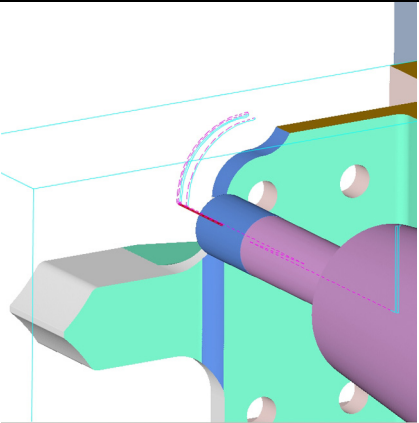
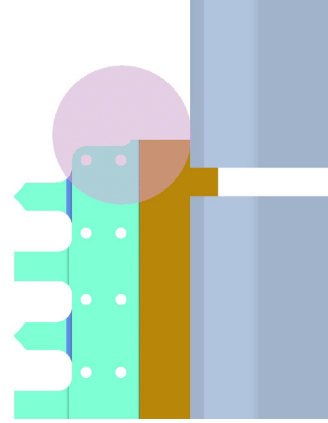
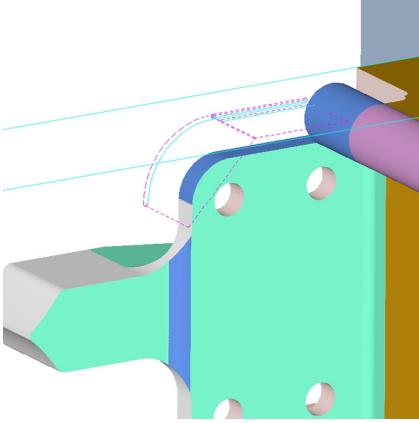
REPRÉSENTATION DES ÉTAPES D'USINAGE DE LA PIÈCE DE RÉFÉRENCE

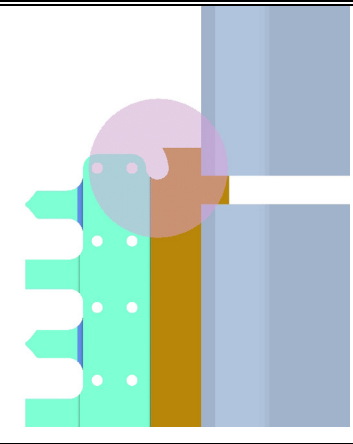
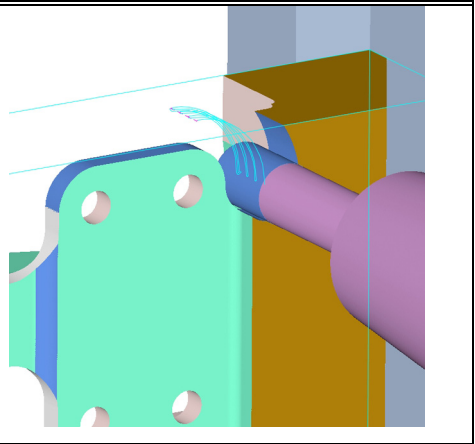
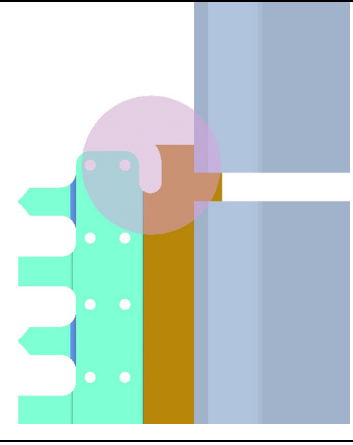
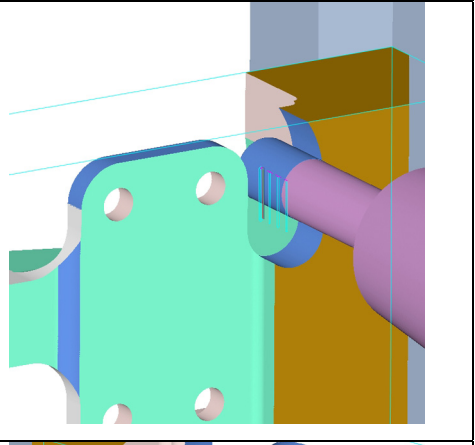
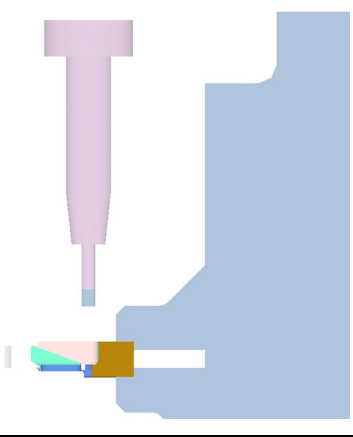
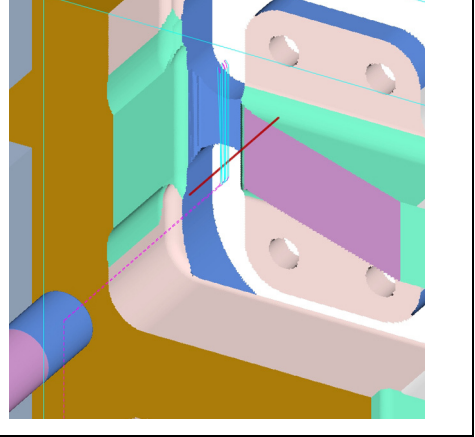
Numéro d'opér.	Représentation de l'usinage	Représentation du parcours d'outil
1		
2		
3		

Numéro d'opér.	Représentation de l'usinage	Représentation du parcours d'outil
4		
5		
6		

Numéro d'opér.	Représentation de l'usinage	Représentation du parcours d'outil
7		
8-9-10-11		
12-13		

Numéro d'opér.	Représentation de l'usinage	Représentation du parcours d'outil
14-15		
16		
17		

Numéro d'opér.	Représentation de l'usinage	Représentation du parcours d'outil
18-19		
7-13		
8-12		

Numéro d'opér.	Représentation de l'usinage	Représentation du parcours d'outil
9-11		
10		
10		

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anselmetti, B. (1990). Algorithme de génération automatique d'une phase de tournage. *Article provenant du livre "La gamme automatique en usinage" (Groupe GAMA)*, 65-83.
- Ben Khalifa, R., Ben Yahia, N., & Zghal, A. (2005). Optimisation du choix des machines-outils par un système neuronal. *CPI*.
- Bombardier-Aéronautique. *Document interne*.
- Boogert, R. M., Kals, H. J. J., & van Houten, F. J. A. M. (1996). Tool paths and cutting technology in computer-aided process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11(3), 186-197.
- Bourdet, P. (1990). Introduction générale à la conception automatique de gammes d'usinage. *Article provenant du livre "La gamme automatique en usinage" (Groupe GAMA)*, 7-18.
- Cameron, R. (1996). *Technologie et usinage à commande numérique: éléments de fabrication assistée par ordinateur* (Première ed.). Montreal: Les éditions Saint-Martin.
- Capponi, V., Zirmi, O., Brissaud, D., & Villeneuve, F. (2006). Computer aided process planning, strategy, and models in the aircraft industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, 220(B4), 541-553.
- Chang, T.-C. (1990). *Expert process planning for manufacturing*: Addison-Wesley.
- Chen, S.-L., Chang, C.-C., & Chang, C.-H. (2000). Application of a neural network for improving the quality of five-axis machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, 214(B1), 47-59.
- Chep, A. (1990). Formalisation et modélisation de la connaissance d'un système génératif en tournage. *Article provenant du livre "La gamme automatique en usinage" (Groupe GAMA)*, 84-101.
- Chou, Y.-C., Srinivas, R. A., & Saraf, S. (1994). Automatic design of machining fixtures: conceptual design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 9(1), 3-12.
- Cordebois, J.-P. (2003). *Fabrication par usinage*. Paris: Dunod.
- Deiab, I. M., & Elbestawi, M. A. (2004, 2004/I). *Experimental investigation of workpiece/fixture contact and its implementation in numerical simulation of machining processes*. Paper presented at the Materials Processing and Design. Modeling,

Simulation and Applications. NUMIFORM 2004. Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, 13-17 June 2004

AIP Conference Proceedings, Columbus, OH, USA.

Derigent, W. (2005). *Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques: Prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK*. Université Henri Poincaré, Nancy.

Derome, J.-P. (2008). *L'association de stratégies d'usinage pour les pièces structurales en aéronautique avec des caractéristiques de forme en utilisant un réseau de neurones*. Unpublished Mémoire, École de technologie supérieure, Montréal.

Dormer. (2006). *Dormer Technical Handbook*.

Dotcheva, M., & Millward, H. (2005). The application of tolerance analysis to the theoretical and experimental evaluation of a CNC corner-milling operation. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(1-2), 284-297.

El-Mounayri, H., Kishawy, H., & Tandon, V. (2002). Optimized CNC end-milling: a practical approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 15(5), 453-470.

Eltool-Corporation. (2007). *Coolant Driven Drill Heads*. Retrieved 25 octobre, 2007

Fidan, I., & Elsayy, A. (2002). The development of a knowledge-based engineering tool for CNC machining. *International Journal of Engineering Education*, 18(6), 732-735.

Giardini, C., Maccarini, G., Ceretti, E., & Bugini, A. (1994, 1994//). *A generative CAPP: the automated generation of machining integrated cycle*. Paper presented at the Proceedings of IFAC International Conference on CAD/CAM: Robotics and Factories of the Future, 21-24 Aug. 1994, Ottawa, Ont., Canada.

Gupta, S. K., Saini, S. K., & Yao, Z. (2001). *An algorithm to generate efficient cutter path for pocket milling operations using modified zigzag strategy*. Paper presented at the Proceedings of the 2001 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, Sep 9-12 2001, Pittsburgh, PA, United States.

Harik, R., & Ris, G. (2006). *Aeronautical planar flank milling automation: Computing the G-Zones*. Paper presented at the 2006 ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information In Engineering Conference, DETC2006, Sep 10-13 2006, Philadelphia, PA, United States.

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*. Université Henri Poincaré, Nancy.

- Hatna, A., Grieve, R. J., & Broomhead, P. (1998). Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 11(4), 309-330.
- Hinduja, S., Roaydi, A., Philimis, P., & Barrow, G. (2001). Determination of optimum cutter diameter for machining 2-1/2 D pockets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(5), 687-702.
- Hinduja, S., & Sandiford, D. (2004). An optimum two-tool solution for milling 2 1/2 D features from technological and geometric viewpoints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(1), 77-80.
- Hwang, I.-K., Wang, E., & Kim, Y. S. Feature-based, automatic generation of machining tool paths.
- Kannan, B., & Wright, P. K. (2004). Efficient algorithms for automated process planning of 2.5D machined parts considering fixturing constraints. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(1), 16-28.
- Krar, S. F., Oswald, J. W., & St-Amand, J. E. (1980). *L'ajustage mécanique* (2e ed.). Montréal: McGraw-Hill.
- Li, J. K., Huang, Z. H., & Shen, H. (1994). Computer-aided process planning techniques for complicated aircraft structural parts. *CIRP Annals*, 43(1), 417-420.
- Mamalis, A. G., Ganovsky, V. S., & Guenova, V. (1994). System-based approach to the development of a CAPP-system for automated discrete production. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 9(3), 175-179.
- McCormack, A. D., & Ibrahim, R. (2002). Process planning using adjacency-based feature extraction. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20(11), 817-823.
- Méry, B. (1997). *Machines à commande numérique*. Paris: Hermès.
- Opas, J., Kanerva, F., & Mantyla, M. (1994). Automatic process plan generation in an operative process planning system. *International Journal of Production Research*, 32(6), 1347-1363.
- Paris, H., & Brissaud, D. (2005). Process planning strategy based on fixturing indicator evaluation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9-10), 913-922.
- Patil, L., & Pande, S. S. (2002). An intelligent feature-based process planning system for prismatic parts. *Modelling, Planning and Scheduling of Manufacturing Systems, International Journal of Production Research*, 40(17), 4431-4447.
- Prabhu, P., Elhence, S., Wang, H., & Wysk, R. (1990). An operations network generator for computer aided process planning. *Journal of Manufacturing Systems*, 9(4), 283-291.

- Ratchev, S., Govender, E., Nikov, S., Phuah, K., & Tsiklos, G. (2003). Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144(1), 796-801.
- Reddy, D. C., & Ghosh, K. (1994, 1994/I). *Sequencing and cutting parameter optimization in computer aided process planning*. Paper presented at the Proceedings of IFAC International Conference on CAD/CAM: Robotics and Factories of the Future, 21-24 Aug. 1994, Ottawa, Ont., Canada.
- Risacher, P., Hascoet, J.-Y., & Bennis, F. (1997, 1997/I). *Workpiece shape and setup in milling*. Paper presented at the Proceedings of 4th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems 1997, 21-23 July 1997, Seoul, South Korea.
- Sakal, R. L., & Chow, J. G. (1994). Integrated intelligent process planning system for prismatic parts using PC-based CAD and CAM software packages. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 9(3), 166-174.
- Sarma, S. E., & Wright, P. K. (1996). Algorithms for the minimization of setups and tool changes in "simply fixturable" components in milling. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(2), 95-112.
- Selvaraj, P., Thirumal, E., & Radhakrishnan, P. (2006). Multi-tasking machines: A new approach to increase the productivity of aircraft components manufacture. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 27(1), 24-30.
- Sharma, V., & Hayes, C. C. (2001). *Operation ordering principles and intra-setup planner: Combining human control with automation in process planning*. Paper presented at the 6th Design for Manufacturing Conference, Sep 9-12 2001, Pittsburgh, PA, United States.
- Spyridi, A. J., & Requicha, A. A. G. (1990). *Accessibility analysis for the automatic inspection of mechanical parts by coordinate measuring machines*. Paper presented at the Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 13-18 1990, Cincinnati, OH, USA.
- Sridharan, N., & Shah, J. J. (2004). Recognition of multi axis milling features: Part I- topological and geometric characteristics. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 4(3), 242-250.
- Suh, S.-H., & Shin, Y.-S. (1996). Neural network modeling for tool path planning of the rough cut in complex pocket milling. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(5), 295-304.
- Tolouei-Rad, M., & Bidhendi, E. (1995). *Application of expert systems for determination of machining parameters in milling operations*. Paper presented at the Int. Conference on Intelligent Manufacturing, Jun 10 1995, Wuhan, China.
- Tseng, Y.-J., & Joshi, S. B. (1994). Recognizing multiple interpretations in 2½ D machining of pockets. *International Journal of Production Research*, 32(5), 1063-1086.

- Valentino, J. (2000). *Introduction to computer numerical control* (2e ed.): Prentice-Hall.
- Verma, A. K., Holcomb, S. L., Blessner, P., Tilman, D., & Johnston, W. F. (2003). *Parametric study of surface finish in end milling using robust design techniques*. Paper presented at the 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress, Nov 15-21 2003, American Society of Mechanical Engineers, Mechanical Engineering Division Publication (MET), Washington, DC, United States.
- Wang, H.-P., & Prabhu, P. (1990, 1990//). *Algorithm-based computer aided process planning*. Paper presented at the Proceedings of Manufacturing International '90, 25-28 March 1990, Atlanta, GA, USA.
- Yan, X., Yamazaki, K., & Liu, J. (2000). Extraction of milling know-how from NC programs through reverse engineering. *International Journal of Production Research*, 38(11), 2443-2457.