

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

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

M.Ing.

PAR
RÉJEAN ROY

TRAJECTOIRE DE TYPE SPIRALE ADAPTATIVE POUR
L'USINAGE HAUTE VITESSE DES CAVITÉS

MONTRÉAL, LE 25 JUIN 2007

© droits réservés de Réjean Roy

CE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-François Châtelain, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. René Mayer, codirecteur
Département de génie mécanique à l'École Polytechnique de Montréal

M. Victor Songmene, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Chalut, maître de conférence
Ingénierie de la fabrication, Bombardier Aéronautique

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

LE 18 JUIN 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

TRAJECTOIRE DE TYPE SPIRALE ADAPTATIVE POUR L'USINAGE HAUTE VITESSE DES CAVITÉS

Réjean Roy

SOMMAIRE

La venue de l'usinage à haute vitesse (UHV) permet de réaliser en un temps relativement court, l'usinage de pièces d'une très grande précision. Cette nouvelle technologie est en plein essor et est favorable pour de nombreuses applications de fabrication. À cet effet, l'industrie aéronautique utilise de plus en plus ces nouvelles approches, notamment pour des composantes d'ailes d'avion requérant des opérations de dégrossissage pour des pochettes. Une grande quantité de matériel doit être enlevée pour alléger au maximum la structure. Il va sans dire que beaucoup de temps est nécessaire pour usiner tout ce matériel, d'où le potentiel de l'UHV. Par ailleurs, les logiciels de conception et de fabrication assistés par ordinateur (CFAO) n'ont pas évolué au même rythme que les commandes numériques. Les trajectoires de coupe générées par plusieurs logiciels de CFAO sont demeurées, à peu de choses près, similaires peu importe la vitesse utilisée. Les parcours d'outil sont donc mal adaptés aux performances que peuvent offrir les machines UHV.

La problématique qui en découle est la suivante: plus la vitesse d'avance de l'outil est élevée, plus il faut de temps à la machine pour décélérer et accélérer ses axes, lors de changement de direction dans le parcours d'outil. Ce phénomène engendre des pertes de temps durant l'usinage de pièces. Le présent travail a pour objectif d'optimiser les trajectoires de coupe pour minimiser le temps d'usinage. La recherche sera davantage concentrée sur les opérations d'ébauche de pochettes pour des composantes d'ailes d'avion. La démarche consiste premièrement à étudier le comportement de nouvelles trajectoires et à choisir les stratégies plus prometteuses. Ce choix s'est arrêté plus particulièrement aux trajectoires spiralées s'adaptant au contour de la géométrie d'une pochette. Une fois la dynamique du comportement connue, la seconde étape a permis de créer un algorithme générant des trajectoires spiralées à l'aide du logiciel CATIA®.

Les résultats associés à l'implantation de cette nouvelle méthode ont permis d'établir que le paramètre C% définissant le début de transition de la trajectoire, doit s'effectuer à 50% de la largeur de la pochette. La contribution de ces travaux a favorisé l'implantation des tactiques de coupe spiralées et de nouveaux types d'approches utilisables dans les logiciels de CFAO. L'algorithme prend également en considération les murs inclinés. Cette nouvelle méthode démontre une réduction du temps d'usinage d'environ 15% pour les opérations de dégrossissage. Ce procédé est prometteur et bénéfique pour l'accroissement de la productivité en milieu aéronautique.

SPIRAL ADAPTATIVE TOOL-PATH FOR HIGH SPEED MACHINING OF CAVITIES

Réjean Roy

ABSTRACT

The arrival of high speed machining (HSM) offers the potential to achieve in a time relatively short, the manufacturing of high precision parts. This new technology is in full flight and is favorable for numerous machining applications. Therefore, the aeronautic industry uses these new machines more and more, for wing components requiring roughing operations of pockets. A large quantity of material must be removed to reduce the weight of the structures. Inevitably, a lot of time is necessary to machine all this material, thus the utility of HSM machines. Meanwhile, conception and fabrication software did not evolve at the same pace as the machines. Tool-path generated by software remained the same. Therefore, the tool-path are not well adapted to the performance that HSM can offer.

The problematic to solve is the following: the faster the feed is, the longer is the time to decelerate and accelerate axes, especially when there are many changes of direction in the tool-path. This phenomenon causes a lost of production time during the machining. The objective of this present work is to optimize the tool-path and reduce the time required for machining. Research will be concentrated more on the roughing operations associated to pockets in wing components. The method used consists in studying the behavior of new trajectories and to choose the more promising strategies. Spiral trajectories adapting to the surrounding perimeter of pockets geometry were used. Once the dynamics is well mastered, the second step permits the creation of an algorithm generating spiral tool-paths in the CATIA® software environment.

The results associated to the implantation of this new method permitted to establish that the C% parameter who defines the beginning of the spiral transition, must takes place at 50% of the width of the pocket. The contribution of these works makes possible the implantation of theses new spiral tool-paths in CAD/CAM softwares. The algorithm also takes in consideration tilted walls. Industrials show a reduction of the machining time by about 15% for the roughing operations. This new process is promising and increase productivity in aeronautic part machining.

REMERCIEMENT

Ces travaux de recherche ont été réalisés dans le cadre du projet 1.8, Usinage haute performance de composantes en alliage léger pour l'industrie aéronautique financé par le CRIAQ - Consortium de Recherche et d'innovation en Aérospatiale au Québec en collaboration avec Bombardier Aéronautique et Pratt & Whitney Canada.

Je tiens à remercier mon directeur de recherche Monsieur Jean-François Châtelain du département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure ainsi que Monsieur René Mayer codirecteur de mémoire à l'École Polytechnique de Montréal. Leur encadrement m'a permis de mener à bien la réussite de ce projet de recherche.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance et souligner l'assistance technique de Mélissa Coté ing.jr., de Guy Gironne et de Louida Laliberté, technicien pour la réalisation des essais expérimentaux.

Également, je tiens à remercier les judicieux conseils de Stéphane Chalut, ingénieur en fabrication chez Bombardier Aéronautique et Serafettin Engin, ingénieur R&D de Pratt & Whitney Canada. Leur expérience dans le domaine de la fabrication a favorisé l'implantation de mes résultats de recherche en milieu industriel.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	iii
ABSTRACT	iv
REMERCIEMENT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	xiv
INTRODUCTION	10
CHAPITRE 1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	13
1.1 Introduction.....	13
1.2 Avantages de l'usinage haute vitesse (UHV)	14
1.3 Stratégies de coupe conventionnelles	15
1.4 Stratégies de coupe non conventionnelles	19
1.5 Types de lignes utilisées pour générer une trajectoire.....	27
1.6 Limitation des machines	32
CHAPITRE 2 CHOIX ET DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE	34
2.1 Introduction.....	34
2.2 Design d'une pièce prototype	34
2.3 Élaboration de diverses stratégies de coupe.....	35
2.4 Essais à vide et étude du gain de temps	45
2.5 Comportement des trajectoires spiralées adaptatives	53
2.6 Nouvelles tactiques de coupe en approche pour l'UGV	58
CHAPITRE 3 IMPLANTATION DU PROGRAMME D'USINAGE	66
3.1 Décalage du contour	66
3.2 Générer la trajectoire de coupe au centre de la pochette	74
3.3 Adapter le reste de la trajectoire de coupe au contour de la pochette	78
3.4 Calcul de l'épaisseur de coupe radiale et de la vitesse d'avance	80
3.5 Description de l'algorithme pour générer les trajectoires.....	83
3.6 Exemple d'application de spirales adaptatives dans CATIA®	87
3.6 Simulation d'usinage dans CATIA®	89

CHAPITRE 4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX D'USINAGE	91
4.1 Introduction.....	91
4.2 Caractéristiques de la machine-outil utilisée	91
4.3 Outil de coupe et conditions d'usinage.....	92
4.4 Usinage des échantillons.....	93
4.5 Application de la nouvelle tactique de coupe sur une pièce industrielle	96
CHAPITRE 5 VALIDATION DU SUIVI DE LA TRAJECTOIRE.....	99
5.1 Introduction.....	99
5.2 Évaluation de l'erreur maximale par la méthode KGM.....	99
CONCLUSION.....	109
RECOMMANDATIONS	111
ANNEXE 1 DESSIN DE FABRICATION D'UNE PIÈCE PROTOTYPE	112
ANNEXE 2 PROGRAMMATION DE LA TRAJECTOIRE SPIRALÉE.....	114
ANNEXE 3 EFFORT DE COUPE EN APPROCHE.....	118
ANNEXE 4 FICHIERS DE DONNÉES DÉCRIVANT LES CONTOURS.....	120
ANNEXE 5 SIMULATION FAO DANS VERICUT	126
ANNEXE 6 INTERFACE UTILISATEUR	128
ANNEXE 7 ESSAIS CIRCULAIRES KGM	133
BIBLIOGRAPHIE	140

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Gain de temps par la méthode elliptique suivie d'une plongée
Tableau II	Temps d'usinage en fonction du type d'interpolation utilisé.....
Tableau III	Temps de coupe des essais à vide
Tableau IV	Gain d'usinage (% temps).....
Tableau V	Durée d'un parcours carré de 0,5'' de côté vs parcours circulaire
Tableau VI	Durée d'un parcours carré de 1'' de côté vs parcours circulaire
Tableau VII	Durée d'un parcours carré de 2'' de côté vs parcours circulaire
Tableau VIII	Durée d'un parcours carré de 4'' de côté vs parcours circulaire
Tableau IX	Durée d'un parcours carré de 6'' de côté vs parcours circulaire
Tableau X	Résultats des efforts de coupe en approche
Tableau XI	Gain de temps pour la plus grande pochette

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1	Poutre transversale d'une aile [1]	10
Figure 2	Usinage conventionnel vers l'extérieur (gauche) et l'intérieur (droite) ...	15
Figure 3	Mouvement de zigzag.....	15
Figure 4	Usinage conventionnel (gauche) et en avalant (droite) [3].....	16
Figure 5	Parallèle "offset" [4]	16
Figure 6	Décalage et relimitation [4]	17
Figure 7	Méthode du diagramme de Voronoi [4]	17
Figure 8	Augmentation de matériau dans les coins vifs [5].....	18
Figure 9	Mouvement circulaire [6]	18
Figure 10	Trajectoire arrondie dans les coins	19
Figure 11	Trajectoire avec sortie circulaire	20
Figure 12	Trajectoire spiralée dans une cavité [7]	20
Figure 13	Trajectoire surfacique avec et sans mouvement spiralé [8].....	21
Figure 14	Méthodes pour générer les trajectoires [9]	22
Figure 15	Trajectoire générée par la méthode iso-scallop [9].....	22
Figure 16	Surplus de matière [10].....	23
Figure 17	Trajectoire usuelle vs nouvelle méthode [10].....	23
Figure 18	Stratégies de coupe dans les coins [11]	24
Figure 19	Application dans un logiciel de CFAO.....	24
Figure 20	Méthode SLS (1 boucle) et DLS (2 boucles) [11].....	25
Figure 21	Génération des trajectoires par méthode itérative [12].....	26
Figure 22	Courbes de type Hermite [13]	28
Figure 23	Courbes de Bezier [13]	29
Figure 24	Courbe B-Spline [13].....	30
Figure 25	Courbe NURBS [13].....	30
Figure 26	Montage pour déterminer les conditions optimales d'usinage [16].....	32

Figure 27	Copeau d'épaisseur variable [19]	33
Figure 28	Exemples de pièces d'aéronefs.....	34
Figure 29	Pièce prototype	35
Figure 30	Trajectoires spiralées dans MATLAB [®]	36
Figure 31	Points distribués le long d'éléments linéaires et curvilignes	37
Figure 32	Trajectoire spiralée avec boucles dans les coins.....	38
Figure 33	Trajectoire elliptique, coins usinés à la fin avec dégagement	38
Figure 34	Plongée de l'outil pour usiner les coins.....	39
Figure 35	Exemple d'interpolation	40
Figure 36	Passes étagées décroissantes.....	42
Figure 37	Éléments de support.....	43
Figure 38	Trajectoire de coupe d'une pochette avec murs obliques.....	44
Figure 39	Amélioration de la trajectoire pour une pochette à murs obliques	44
Figure 40	Paramètres pour la génération de la trajectoire.....	46
Figure 41	Évolution de la trajectoire spiralée	47
Figure 42	Temps d'usinage à des vitesses d'avance variables	49
Figure 43	Temps d'usinage pour une transition de trajectoire à avance variable....	50
Figure 44	Temps d'usinage pour une transition à 40%.....	51
Figure 45	Temps d'usinage pour une transition à 70%.....	52
Figure 46	Trajectoire carrée et circulaire	53
Figure 47	Comparaison de temps entre une trajectoire carrée et circulaire.....	56
Figure 48	Effet de la vitesse d'avance	57
Figure 49	Transition entre les passes	57
Figure 50	Schéma des 6 essais d'approche	58
Figure 51	Essais d'approche simulés dans CATIA [®]	59
Figure 52	Approche normale à la trajectoire.....	60
Figure 53	Logiciel CUTPRO 7.0	60
Figure 54	Estimation des efforts de coupe.....	61
Figure 55	Usinage des essais d'approche.....	61

Figure 56	Logiciel LabVIEW 7.1 pour mesurer les efforts de coupe.....	62
Figure 57	Graphique des efforts de coupe pour l'essai 1	62
Figure 58	Graphique de comparaison des efforts de coupe	63
Figure 59	Réduction de l'usure à l'extrémité de l'outil	64
Figure 60	Décalage de 2 droites et calcul du nouveau point d'intersection.....	67
Figure 61	Décalage vers l'intérieur d'un arc de cercle	68
Figure 62	Décalage vers l'extérieur d'un arc de cercle.....	68
Figure 63	Décalage sans perte d'élément.....	69
Figure 64	Élimination d'un arc de cercle et intersection de 2 droites.....	69
Figure 65	Décalage vers l'intérieur et élimination d'un arc de cercle	70
Figure 66	Élimination d'un arc de cercle et calcul d'intersection	70
Figure 67	Exemple des résultats de décalage sur diverses géométries	72
Figure 68	Autres exemples de décalage sur diverses géométries	73
Figure 69	Dernière passe avec plus de points de contrôle	74
Figure 70	Trajectoire de coupe au centre de la pochette.....	76
Figure 71	Trajectoire de coupe centrale pour d'autres pochettes	77
Figure 72	Inspecter le contour et répartir des points de contrôle.....	78
Figure 73	Enlèvement de points de contrôle dans les coins.....	79
Figure 74	Comparaison sans enlèvement de points	79
Figure 75	Mesure de l'épaisseur par la méthode des triangles rectangles	80
Figure 76	Calcul de la vitesse d'avance	81
Figure 77	Variation de la vitesse d'avance	82
Figure 78	Trajectoires de coupe de pochettes rectangulaires dans CATIA [®]	87
Figure 79	Simulation d'usinage des pochettes rectangulaires dans CATIA [®]	87
Figure 80	Trajectoires de coupe des géométries variables dans CATIA [®]	88
Figure 81	Simulation d'usinage pour des géométries variables dans CATIA [®]	88
Figure 82	Étapes d'une simulation d'usinage dans CATIA [®]	89
Figure 83	Centre d'usinage MITSUI SEIKI HU40-T	91
Figure 84	Outil de coupe.....	92

Figure 85	Essai d'usinage	94
Figure 86	Pièce virtuelle	94
Figure 87	Pièce constituée de pochettes ouvertes	95
Figure 88	Pièce industrielle de Bombardier.....	96
Figure 89	Parcours conventionnel vs parcours spirale.....	96
Figure 90	Simulation d'usinage dans CATIA®	97
Figure 91	Instruments pour les essais KGM	100
Figure 92	Méthode KGM: approche de la tête de lecture sur la règle 2D	100
Figure 93	Types d'erreur sur la trajectoire.....	101
Figure 94	Trajectoire suivie par la méthode KGM	101
Figure 95	Trajectoire réelle pour un rayon de 0, 0,5, 1, 1,5 et 2 po.....	103
Figure 96	Erreur du parcours pour un rayons de : 0,5, 1, 1,5 et 2 po.....	104
Figure 97	Erreur maximale pour des rayons de : 0,5, 1, 1,5 et 2 po.....	105
Figure 98	Trajectoire circulaire et répartition de l'erreur	106
Figure 99	Répartition de l'erreur sur un rayon de 1 po à 400 po/min.....	106
Figure 100	Valeur de l'erreur pour tous les angles	107
Figure 101	Erreur en fonction de l'angle pour diverses vitesses d'avance.....	107
Figure 102	Erreur maximale en fonction de la vitesse d'avance	108
Figure 103	Vue de dessus et de côté	113
Figure 104	Dessin de détails	113
Figure 105	Effort de coupe des essais en approche	119
Figure 106	Simulation FAO dans VERICUT	127
Figure 107	Ouverture des macros pour démarrer le programme	129
Figure 108	Rubrique des paramètres de coupe et de la géométrie.....	130
Figure 109	Prise de mesures sur la pochette	130
Figure 110	Routine Visual Basic	131
Figure 111	Tracé de la trajectoire	131
Figure 112	Programme de fabrication.....	132
Figure 113	Simulation de la trajectoire de coupe.....	132

Figure 114	Erreurs sur une trajectoire circulaire de 0,5 po.	134
Figure 115	Erreurs pour $R = 0,5$ po. avec $F = 200, 250$ et 350 po/min.....	135
Figure 116	Erreurs pour $R = 0,5$ po. avec $F = 400, 500$ et 600 po/min.....	136
Figure 117	Erreurs sur une trajectoire circulaire de 2 po.	137
Figure 118	Erreurs pour $R = 2$ po. avec $F = 200, 250$ et 350 po/min.....	138
Figure 119	Erreurs pour $R = 2$ po. avec $F = 400, 500$ et 600 po/min.....	139

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

Av.dent	Avance par dent (po./dent)
a_x	Coefficient constant
b_x	Valeur scalaire du vecteur "b" selon l'axe X
B_i	Point d'une courbe de Bezier
CFAO	Conception et fabrication assistées par ordinateur
CN	Commande numérique
D	Diamètre nominal de l'outil (po.)
db	Diamètre non coupant de l'outil (po.)
$\Delta\theta$	Angle incrémental d'un cercle
ϕ	Diamètre définissant la trajectoire circulaire spiralée
epasse	Épaisseur de coupe par passe radiale
F	Vitesse d'avance (Feed)
%Gain	Gain de temps d'usinage en pourcentage
h	Hauteur
k	Nombre de points de contrôle d'une courbe B-Spline
l	Largeur de la pochette
L	Longueur de la pochette
Lc	Longueur de la partie coupante de l'outil (po.)
nb.dents	Nombre de dents
P_i	Point d'une courbe
P'_i	Vecteur tangent
$P(u)$	Point de passage d'une courbe B-Spline
R	Rayon
Rc	Rayon de courbure de l'outil (po.)
RPM	Vitesse de rotation de la broche (tour/min)
t	Temps (sec.)
t_{conv}	Temps d'usinage conventionnel pour comparer (sec.)

t_i	Valeur des nœuds
$t_{spirale}$	Temps d'usinage pour une trajectoire spiralée (sec.)
t_{xxx}	Temps d'usinage pour une vitesse d'avance spécifiée (sec.)
UHV	Usinage haute vitesse
VC	Vitesse de coupe (po./min)
X	Niveau de transition de la trajectoire (%)
x	Coordonnée en x
y	Coordonnée en y
z	Coordonnée en z

INTRODUCTION

L'industrie de la fabrication aéronautique concentre une très grande partie de son temps de production à effectuer des opérations d'ébauche sur des composantes d'ailes d'avion (figure 1). Ces pièces sont composées de nombreuses pochettes dont la fonction est de rendre rigide la structure tout en ayant un poids minimal.

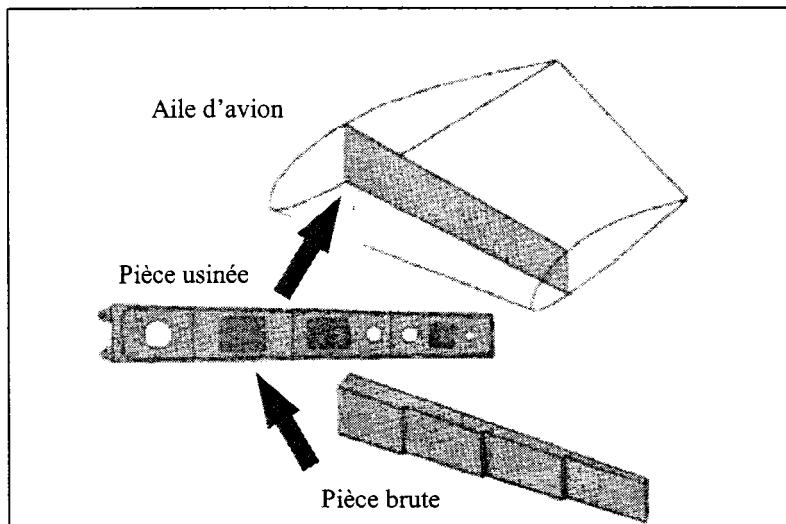


Figure 1 Poutre transversale d'une aile [1]

La venue de nouvelles commandes numériques à usinage haute vitesse (UHV) ont permis de réduire significativement le temps des opérations. Cependant, les trajectoires de coupe créées par les logiciels de CFAO, tel que CATIA[®], ne permettent pas d'exploiter à pleine capacité ces nouvelles machines. Les fortes vitesses d'avance qu'elles peuvent offrir sont limitées par des parcours d'outil non adéquats.

De récentes recherches dans ce domaine indiquent qu'il est possible de réduire le temps d'usinage en adaptant des trajectoires d'outil comprenant des changements de direction moins brusques. L'objectif de ce travail consiste à développer une application dans

CATIA® permettant de générer un parcours d'outil adapté aux caractéristiques supérieures des machines UHV.

Dans ce document, la revue bibliographique présentée au chapitre 1, permet de faire un bref survol sur les stratégies de coupe traditionnelles et les récentes tactiques développées dans le domaine de l'usinage haute vitesse. La fin de ce chapitre se termine par une revue détaillée des types d'interpolations utilisées dans les logiciels de CFAO pour générer les trajectoires de coupe.

Par la suite, le chapitre 2 intitulé "Développement et choix de la méthode" traite de l'ensemble des idées qui ont été mises de l'avant pour améliorer les tactiques de coupe haute vitesse. Ce chapitre contient de nouvelles techniques à l'essais pour concevoir la tactique de coupe la plus appropriée aux conditions d'usinage actuelles. La planification d'essais d'usinage a permis de vérifier les gains potentiels face à de nouvelles approches, et de choisir les trajectoires spiralées comme étant la tactique de coupe offrant le plus de potentiel. Cette nouvelle méthode sera traitée dans ce mémoire et programmée dans CATIA®. Une étude du comportement des trajectoires spiralées adaptatives permet de mieux comprendre la façon dont réagissent ces parcours d'outil. Le chapitre prend fin avec l'expérimentation de nouvelles tactiques de coupe en approche dans le matériau et l'évaluation des gains relatifs à ces nouvelles méthodes d'engagement.

L'implantation du programme d'usinage fait ensuite l'objet du chapitre 3. Cette section présente l'élaboration de la méthode utilisée pour programmer les trajectoires spiralées dans le logiciel CATIA®. Le chapitre se termine par des essais d'usinage virtuels dans le logiciel. Ainsi, il est possible de faire une mise en application directe et de vérifier la viabilité de la nouvelle méthode pour des pochettes de géométries variables.

Les résultats d'usinage sont par la suite présentés au chapitre 4. L'usinage des échantillons, permet de valider l'efficacité de cette nouvelle méthode dans un contexte industriel. Les premiers essais d'usinage ont été réalisés sur une pièce prototype en milieu universitaire. Par la suite, d'autres essais visant davantage la mise en application des tactiques de coupe spiralées, ont été effectués sur une pièce de production en milieu industriel.

Une validation expérimentale du suivi de la trajectoire est démontrée au chapitre 5, en effectuant des prises de mesures dimensionnelles consacrées à l'évaluation de l'erreur. Ce chapitre a pour objectif de faire une estimation rapide face au respect potentiel des tolérances dimensionnelles. À cet effet, des essais KGM en 2D ont été effectués dans le but de mesurer l'exactitude du suivi de la trajectoire. Il est ainsi possible de connaître les limites du procédé si aucune passe de finition n'est utilisée, suite à une opération faisant appel aux tactiques spiralées.

La conclusion fait état des résultats obtenus relatif au gain de temps, suite à l'application de la tactique de coupe spiralée adaptative. Les points essentiels de cette recherche y sont dégagés ainsi que les recommandations pour la mise en application en milieu industriel. L'annexe est composée de matériel supplémentaire et comporte : le dessin de fabrication d'une pièce prototype, des résultats d'efforts de coupe et une partie de la programmation utilisée pour générer les parcours d'outil spiralés. On y retrouve également : les fichiers de données décrivant les contours de pochettes, une simulation FAO de la tactique spiralée, l'interface utilisateur avec la méthodologie à suivre dans CATIA® pour générer les parcours d'outil ainsi que des essais KGM pour estimer l'erreur du suivi de trajectoires.

La méthodologie employée a permis de mener à bien ce projet de recherche et ainsi, de produire un logiciel capable de générer des trajectoires de coupe mieux adaptées à l'usinage haute vitesse.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

L'implantation récente des nouvelles technologies d'usinage à haute vitesse (UHV) a permis d'accroître rapidement et de manière significative les capacités d'usinage. Cependant, l'exploitation de l'UHV et des machines associées est ralentie par les logiciels de conception et de fabrication assistées par ordinateur (CFAO). En effet, ces programmes permettent de générer seulement des trajectoires de coupe ne tenant pas compte du plein potentiel de l'UHV. Les vitesses d'avance de ces machines sont très élevées et, par conséquent, il en résulte de fortes accélérations et décélérations pour démarrer ou arrêter les déplacements de l'outil. Ces accélérations et décélérations engendrent des déviations dimensionnelles lors de la fabrication de pièce et ont aussi pour effet d'augmenter le temps d'usinage, lors de changements brusques de direction.

Pour remédier à cette problématique, des équipes de chercheurs travaillent sur de nouvelles méthodes pour élaborer des parcours d'outil comprenant des changements de trajectoire plus doux, afin de minimiser les effets causés par les méthodes d'usinage conventionnelles comprenant des changements de direction brusques. Ce chapitre permettra de faire un bref survol concernant les progrès et les récentes percées technologiques dans le domaine des trajectoires de coupe adaptées à l'usinage haute vitesse.

1.2 Avantages de l'usinage haute vitesse (UHV)

L'usinage à haute performance se caractérise par des vitesses de rotation de broche élevées, de l'ordre de 15 000 tr/min et plus, ainsi que par de grandes vitesses d'avance. Par conséquent, l'outillage (outils de coupe et porte-outil) doit d'être balancé dynamiquement pour minimiser les vibrations.

La récente utilisation de centres d'usinage à haute vitesse permet d'obtenir des gains significatifs comparativement à l'usinage conventionnel. Mentionnons quelques avantages de cette nouvelle technologie :

- Une productivité accrue et un taux d'enlèvement de matière élevé
- Un meilleur fini de surface
- Une réduction des efforts de coupe
- Une possibilité d'usiner des pièces à parois minces avec précision
- Une réduction du temps d'usinage

L'UHV consiste à prendre des profondeurs de coupe plus légères et des avances par dent plus faibles, en comparaison à l'usinage conventionnel. Ces paramètres permettent d'augmenter la vitesse d'avance de l'outil. Par conséquent, il en résulte une forte baisse des efforts de coupe et il est ainsi possible d'obtenir un taux d'enlèvement de matière plus élevé. De plus, les pièces sont d'une meilleure précision car la déflexion de l'outil est négligeable.

Tel que mentionné par Hascoet, Dugas et Lee [2], les limites des machines et du contrôleur font qu'en UHV, la vitesse d'avance réelle est souvent très inférieure à la vitesse d'avance programmée. À cet effet, ils ont concentré leurs efforts pour développer un algorithme de simulation de vitesse, capable de modifier l'avance de l'outil en fonction du déplacement à venir et en tenant compte des paramètres de la machine. Ainsi, lorsqu'il y a de fortes courbures ou de brusques changements de

direction, l'accélération centripète exigée peut être supérieure à l'accélération que la machine peut offrir pour suivre exactement la trajectoire programmée. Grâce au développement de leur programme, l'erreur engendrée pendant l'usinage est par conséquent fortement réduite.

1.3 Stratégies de coupe conventionnelles

Antérieurement à l'UHV, les techniques d'usinage pour créer une poche formée de murs minces, consistaient à décaler le contour de la géométrie (offset) formant la cavité. Cette méthode de génération du parcours d'outil peut être faite de deux façons : par un usinage conventionnel débutant du centre vers l'extérieur ou inversement en débutant du mur vers le centre de la cavité. Ces manières d'usiner sont encore très répandues même avec des centres d'usinage à haute vitesse.

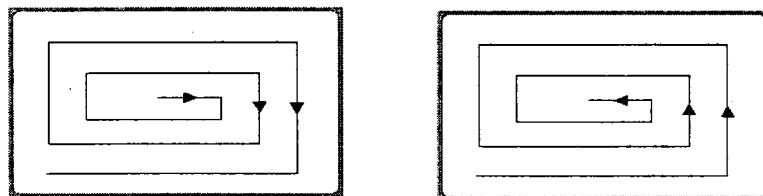


Figure 2 Usinage conventionnel vers l'extérieur (gauche) et l'intérieur (droite)

Une autre méthode d'usinage moins utilisée pour dégrossir une cavité est un mouvement de zigzag, tel qu'illustré à la figure 3.

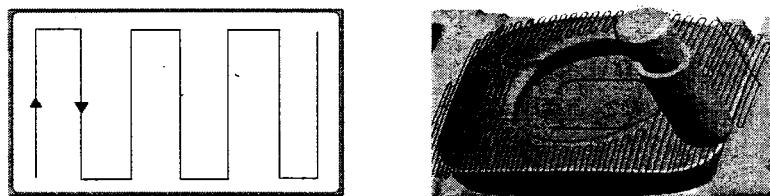


Figure 3 Mouvement de zigzag

Une trajectoire en zigzag a pour désavantage de faire travailler l'outil tantôt de manière conventionnelle tantôt en avalant.



Figure 4 Usinage conventionnel (gauche) et en avalant (droite) [3]

Ces types de trajectoire sont faciles à générer et sont les plus communément utilisées dans les logiciels de FAO tels que CATIA® et Pro/ENGINEER® [3]. Un des principaux désavantages de ces trajectoires est la forte accélération et décélération des axes de la machine, lors de changements brusques de direction. Non seulement ces variations peuvent engendrer des déviations dimensionnelles mais elles peuvent également augmenter le temps d'usinage de la pièce.

Les stratégies de coupe en contour parallèle et en zigzag (figure 5), ainsi que les méthodes pour définir de telles trajectoires, ont été très bien documentées par Held, Lukacs et Andor [4].

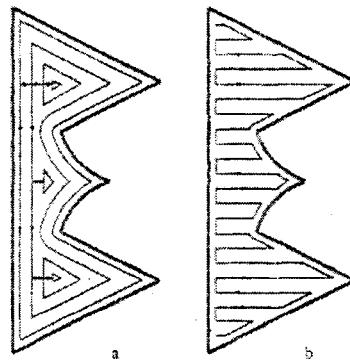


Figure 5 Parallèle ‘offset’ [4]

La première méthode, expliquée par l'auteur, consiste à effectuer un simple décalage de la géométrie de la pochette. Suite au décalage des entités formant le contour, il doit y

avoir une étape consistant à couper ou allonger les éléments (figure 6), afin de créer la trajectoire.

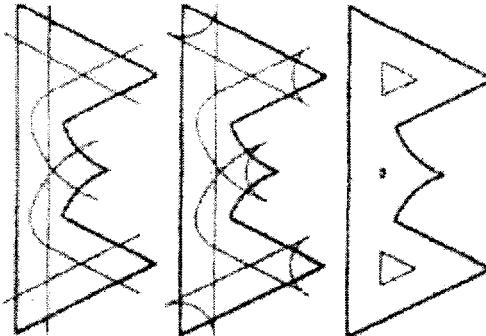


Figure 6 Décalage et relimitation [4]

La seconde façon de faire est basée sur le principe des diagrammes de Voronoi. Cette méthode trace les bissectrices des éléments décrivant le contour de la pochette. Par la suite, ces bissectrices sont reliées ensemble et forment des zones de proximité (figure 7) à l'aide desquelles sont générées les trajectoires de coupe.

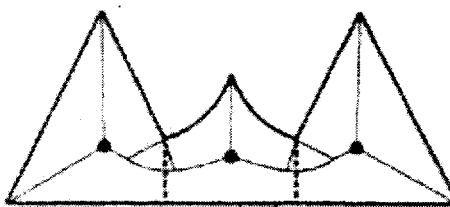


Figure 7 Méthode du diagramme de Voronoi [4]

Indépendamment de la méthode choisie, les coins vifs dans une trajectoire de coupe ont pour conséquence d'augmenter la quantité de matériau à enlever et par conséquent d'accroître localement les efforts de coupe que doit subir l'outil. Les recherches de Bae, Ko et Kim [5], indiquent que les forces de coupe dépendent principalement de l'engagement du couteau dans le matériau combiné à l'avance de l'outil. Le programme qu'ils ont développé prend en considération ces deux paramètres de coupe

lors de l'usinage et permet de régulariser l'effort de coupe. En procédant ainsi, ils sont parvenus à réduire de 16.3% le temps d'usinage d'une cavité à murs minces.

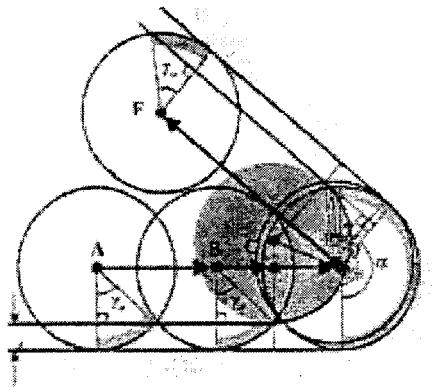


Figure 8 Augmentation de matériau dans les coins vifs [5]

Il est clair que les machines outils à commandes numériques (MOCN) traditionnelles ne peuvent utiliser leurs outils de coupe à pleine capacité, due à la limitation de la vitesse de la broche. D'après Rodriguez et Monreal [6], l'avance de l'outil en UHV diminue lors de l'approche des coins vifs afin de maintenir une erreur de trajectoire sous contrôle.

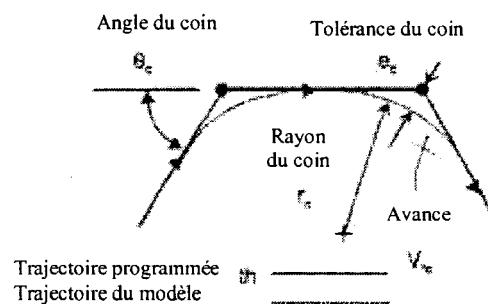


Figure 9 Mouvement circulaire [6]

Les courtes variations brusques de direction empêchent également l'outil d'atteindre sa vitesse d'avance maximale, telle que programmée.

1.4 Stratégies de coupe non conventionnelles

Les trajectoires de coupe ont une influence significative sur le temps d'usinage. Cette observation est due à la combinaison de courtes trajectoires d'outil et d'un grand nombre de changements brusques de direction. De tels trajets sont très exigeants sur la machine en terme d'accélération pour atteindre la vitesse d'avance recherchée.

En UHV, un des principaux objectifs est d'éliminer tout changement brusque dans la génération des trajectoires d'outil, afin d'abolir de vives accélérations et de réduire le temps d'usinage.

Une des solutions fréquemment utilisées a pour objectif de modifier la trajectoire en programmant des changements de direction plus doux, par l'ajout de mouvements circulaires tangents au trajet de l'outil. Tel que montré à la figure 10, l'ajout de coins ronds sur le parcours permet de maintenir une vitesse d'avance soutenue.

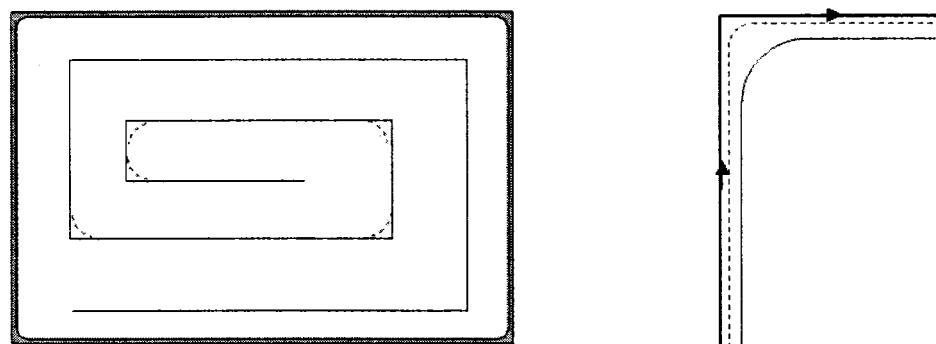


Figure 10 Trajectoire arrondie dans les coins

D'autres méthodes sont également applicables. Comme on peut le constater à la figure 11, des trajectoires d'outil avec sortie circulaire permettent de réduire les effets d'accélération des axes et d'accroître la précision des pièces usinées. Cependant,

l'ajout d'une trajectoire circulaire dans les coins augmente la longueur du parcours d'outil et, par conséquent, le temps de coupe pour usiner la pièce se voit augmenté.

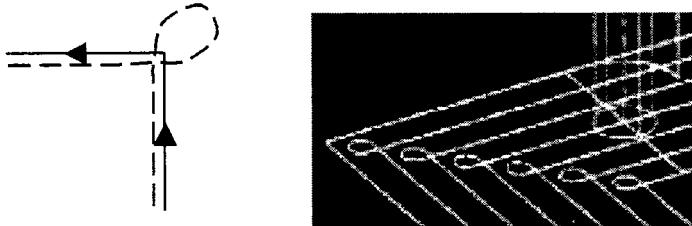


Figure 11 Trajectoire avec sortie circulaire

De récentes recherches concernant la génération de parcours d'outil spiralés capables de s'adapter à la géométrie d'une pochette a fait son apparition en 2003 grâce à Bieterman et Sandstrom [7]. La figure 12, représente l'idée mise de l'avant.

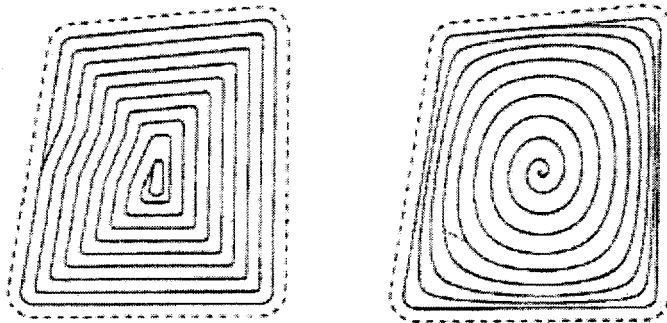


Figure 12 Trajectoire spiralée dans une cavité [7]

Au lieu de créer une trajectoire générée par des décalages parallèles, la nouvelle technique est basée sur une spirale capable de s'adapter au contour, par l'entremise d'équations elliptiques aux dérivées partielles du deuxième ordre. Cette fonction mathématique qui a été développée en utilisant les méthodes d'éléments finis dans MATLAB®, permet une transition de trajectoire plus douce. Comme l'épaisseur de coupe radiale peut varier durant l'évolution de la trajectoire, cette nouvelle technique fait aussi intervenir une variation de la vitesse d'avance, tel que mentionné par Bae, Ko et Kim [5]. Les essais expérimentaux menés par Bieterman, ont démontré qu'il était

possible de réduire le temps d'usinage de l'ordre de 15 à 30%, dépendamment de la géométrie de la pochette. Dans le même domaine de recherche, Lee [8] a développé un programme permettant de maintenir un fini de surface constant durant les opérations d'usinage en finition. Sa méthode se base sur la technique du contournage parallèle (figure 13). Son algorithme trace une trajectoire spiralée adaptative permettant de réduire les efforts de coupe.

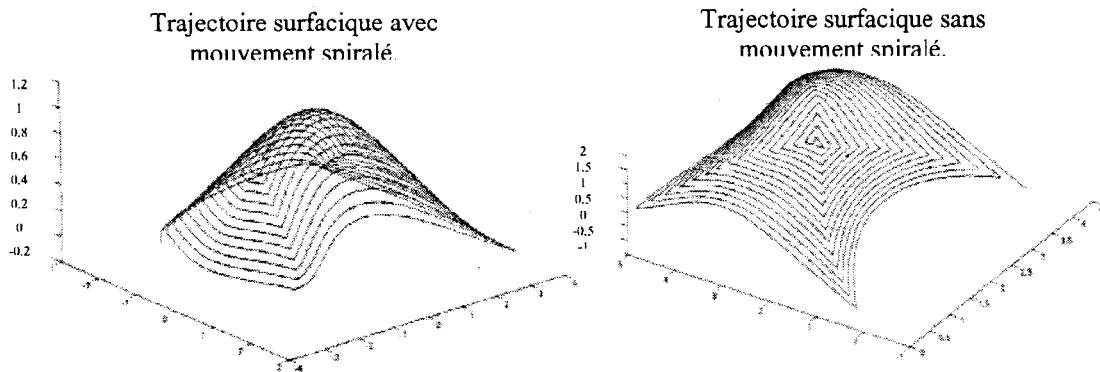


Figure 13 Trajectoire surfacique avec et sans mouvement spiralé [8]

Le parcours d'outil qui est ainsi créé permet une meilleure connection entre les passes d'usinage. À des avances rapides, il en résulte une réduction des interruptions de coupe, suite aux changements de direction de l'outil.

Pour leur part, Lee et Yang [9] ont travaillé sur un algorithme capable de produire une trajectoire de coupe qui ne fait pas intervenir de conversion de coordonnées basée sur le système cartésien vers le système paramétrique. Les auteurs font également état des méthodes couramment utilisées pour créer les parcours d'outil. Parmi ces méthodes, il y a :

- a) La méthode iso-paramétrique
- b) La méthode des surfaces parallèles (iso-offset)
- c) La méthode des plans parallèles (iso-plan)
- d) La technique utilisant des hauteurs de crête constante (iso-scallop)

Ces quatre méthodes sont illustrées à la figure 14.

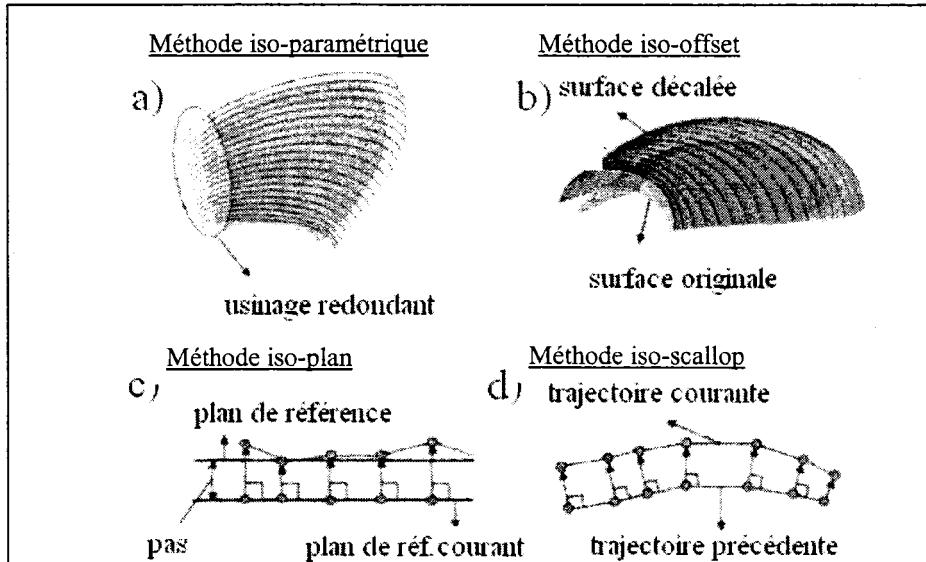


Figure 14 Méthodes pour générer les trajectoires [9]

La dernière technique est celle qui a été utilisée par Lee et Yang pour concevoir son algorithme. La figure qui suit, représente le parcours d'outil générée sur une surface par la méthode iso-scallop.

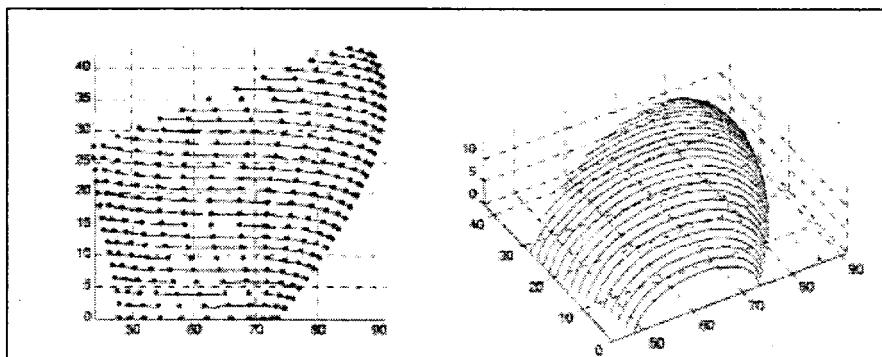


Figure 15 Trajectoire générée par la méthode iso-scallop [9]

Cette méthode est davantage applicable à l'usinage de finition sur des surfaces comprenant des géométries relativement complexes. En plus de réduire le temps de fabrication, cette nouvelle technique mise de l'avant, permet de réduire l'erreur crête à

crête, lors de l'utilisation d'une fraise en bout rond. Yan, Shuilai et Shuguang [10] ont travaillé sur le problème du surplus de matière qui est laissé entre chaque passe d'usinage, lorsqu'un parcours d'outil est conçu à partir de la méthode des contours parallèles (trajectoire conventionnelle). La figure 16 représente bien ce phénomène.

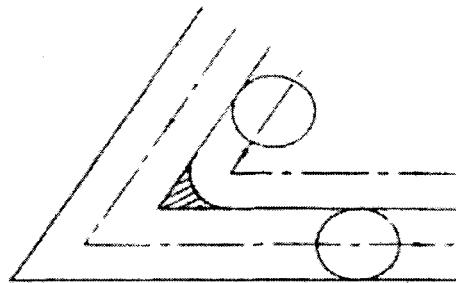


Figure 16 Surplus de matière [10]

L'algorithme qu'ils ont développé augmente le chevauchement entre les passes de l'outil. Ceci a pour effet d'avoir une profondeur de coupe radiale plus élevée et de réduire la longueur totale de la trajectoire, tout en ne laissant pas de surplus de matière entre chaque passe.

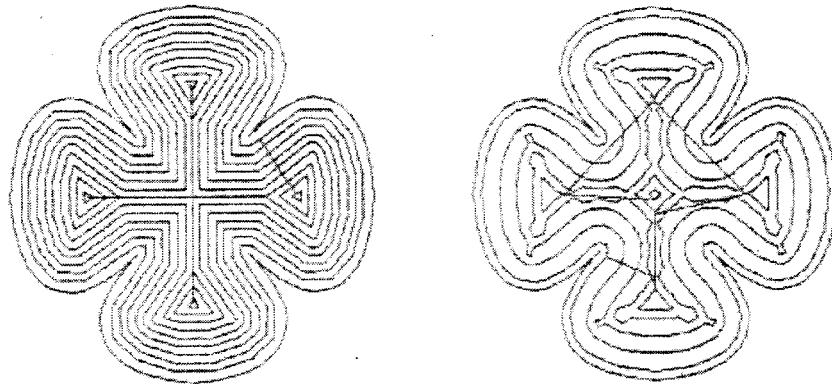


Figure 17 Trajectoire usuelle vs nouvelle méthode [10]

Dans le même ordre d'idée, Choy et Chan [11] ont mis au point une application dans le logiciel Unigraphics (UG) version 17.0. Cette application consiste à ajouter des boucles dans la trajectoire, lors de l'approche des coins d'une pochette. Tel que

mentionné par Yan, Shuilai et Shuguang, les coins provoquent un surplus de matériel à enlever durant l'usinage. L'ajout de boucles dans la trajectoire (SLS : Single Loop Strategy et DLS : Double Loop Strategy) à la figure 18, permet de diminuer significativement les efforts de coupe. Les forces peuvent être ainsi réduites de l'ordre de 19 à 35%.

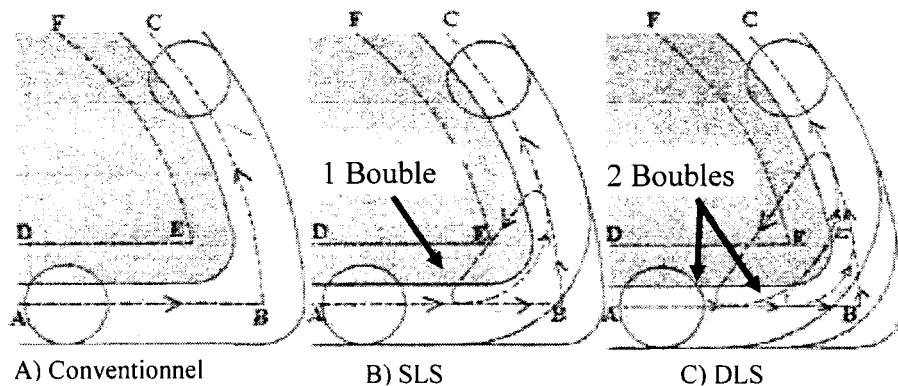


Figure 18 Stratégies de coupe dans les coins [11]

Par conséquent, il en résulte que l'outil a une meilleure durée de vie. De plus, le copeau est mieux évacué et il y a ainsi une réduction de broutage. L'application de cette nouvelle technique est démontrée à la figure 19. Cependant, l'ajout de mouvements de boucles dans la trajectoire augmente la longueur du parcours d'outil et le temps d'usinage en est affecté.

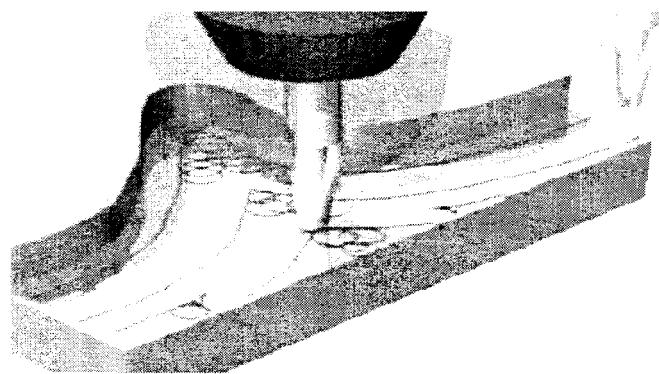


Figure 19 Application dans un logiciel de CFAO

L’application développée par Choy et Chan révèle tout son avantage pour les angles aigus, comme le montre la figure ci-dessous. En ajoutant une ou deux boucles dans les coins, l’outil travaille de façon plus adéquate.

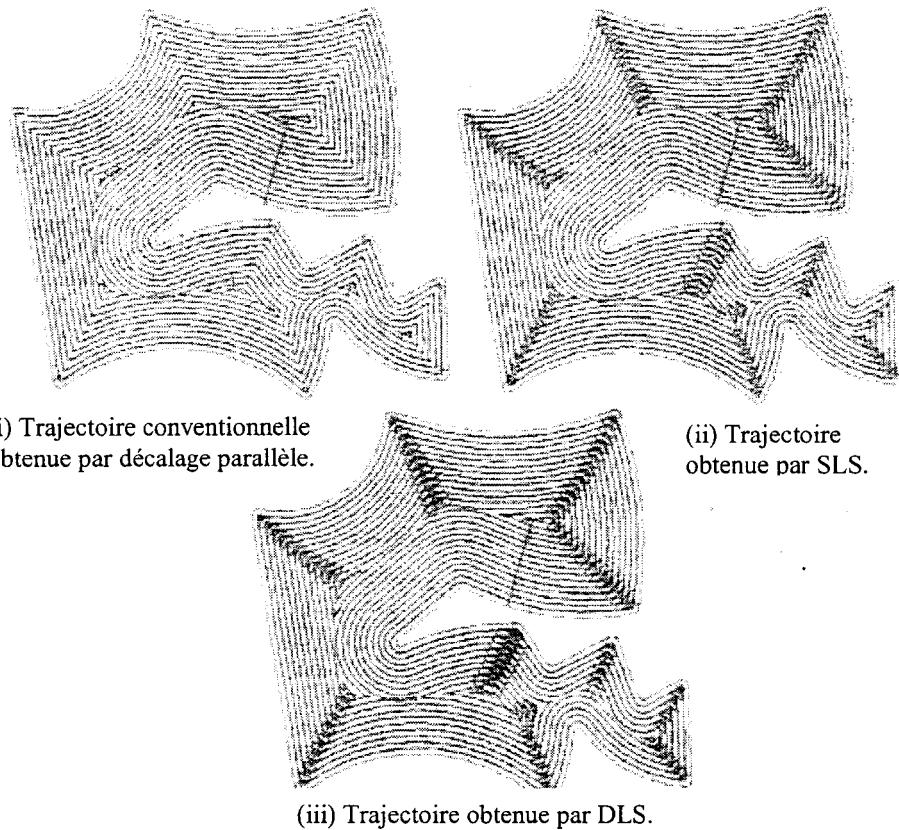


Figure 20 Méthode SLS (1 boucle) et DLS (2 boucles) [11]

Une autre méthode mise de l’avant par Wang, Jang et Stori [12], consiste à générer un parcours d’outil en faisant intervenir un processus itératif. Dans leur recherche, la trajectoire de base est créée à partir de la technique conventionnelle des contours parallèles. Par la suite, avec cette information, une fonction décrivant cette trajectoire est générée par leur algorithme. Celui-ci répartit des points de contrôle par lesquels le parcours d’outil doit passer. Ensuite, le processus itératif est lancé pour optimiser la répartition et le positionnement de ces points de contrôle. Cette optimisation permet de minimiser l’engagement de l’outil. Il est ainsi possible de réduire les effets

d'accélération lors des changements abrupts de la trajectoire et d'avoir des conditions de coupe plus stables. Le processus itératif repositionne les points de contrôle pour obtenir la trajectoire répondant aux caractéristiques précédentes. Cette trajectoire est créée par des segments de courbe de type Bezier. La figure 21, représente l'évolution du parcours de l'outil en fonction du nombre d'itérations pour une pochette composée d'un îlot.

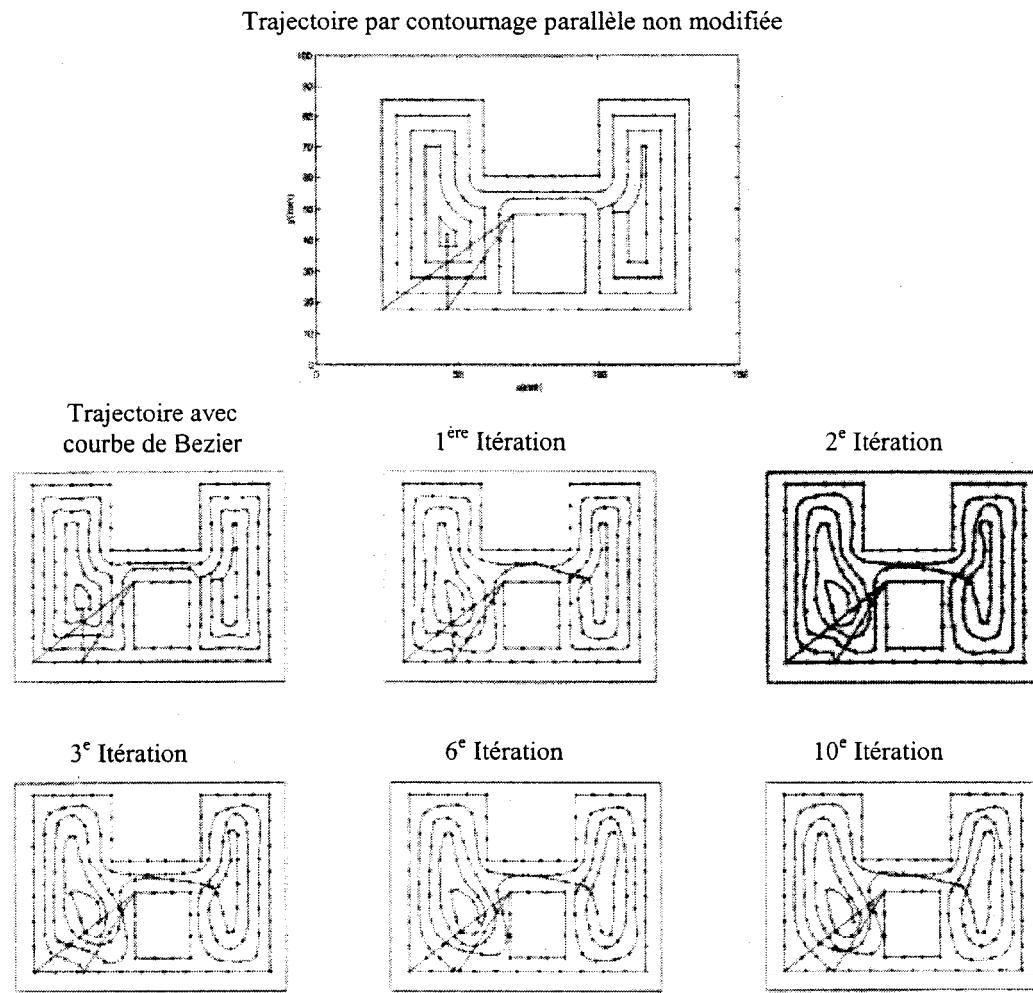


Figure 21 Génération des trajectoires par méthode itérative [12]

La méthode proposée par Wang, Jang et Stori permet d'accroître le gain de production et de maintenir des conditions de coupe stables.

1.5 Types de lignes utilisées pour générer une trajectoire

De plus en plus, les algorithmes permettant de produire des trajectoires de coupe font appel à des courbes paramétriques, autres que des lignes et des arcs de cercle. Cette section permettra donc de faire un bref survol, et de mieux comprendre la façon de faire pour arriver à générer de tels types de courbes servant à décrire le parcours de l'outil.

Pour représenter des lignes courbées, les logiciels de CAO utilisent diverses méthodes. Ce type de ligne peut être classé en deux catégories. La première définit une courbe en utilisant des équations paramétriques. Les paramètres, définissant l'équation, permettent de créer des points de coordonnée X, Y, et Z dans l'espace servant à générer la courbe. La seconde catégorie décrit une courbe grâce à des équations non paramétriques. La courbe est ainsi produite par des points provenant directement d'une fonction.

L'équation d'un cercle est un exemple permettant de représenter ces deux catégories :

$$\text{Équation non paramétrique: } x^2 + y^2 = R^2 \quad (1.1)$$

$$\text{Équation paramétrique: } x = R \cdot \cos(\theta); \quad y = R \cdot \sin(\theta) \quad \text{avec } (0 \leq \theta \leq 2\pi)$$

Les avantages offerts par les courbes paramétriques font qu'elles sont les plus utilisées par les logiciels de dessin et les contrôleurs de commande numérique. Cependant, les paramètres utilisés doivent être correctement choisis. À cet effet, en reprenant l'exemple du cercle paramétrique, une valeur de $\Delta\theta$ trop petite engendrera une courbe plus précise mais le temps de calcul augmentera inutilement pour une précision qui n'est pas nécessaire afin de définir la courbe. À l'opposé, si $\Delta\theta$ est trop grand, le cercle ressemblera à un polygone.

Les équations paramétriques utilisées pour créer des courbes peuvent être décrites de différentes méthodes. Celles-ci sont de type : Hermite, Bezier, B-Spline et NURBS.

Lee [13] a très bien résumé l'utilité ainsi que les techniques employées pour générer de tels types de courbes.

1.5.1 Les courbes Hermite

La majeure partie des équations utilisées pour représenter des courbes dans les logiciels de CFAO, correspondent à des courbes de type Hermite. Ces courbes de degré 3 garantissent l'obtention d'une continuité à la jonction des segments de droite, aux points de contact. Le changement de la courbure est bien anticipé. Les équations qui suivent décrivent cette méthode :

$$P(u) = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3, \quad (0 \leq u \leq 1)$$

$$\text{avec } P_0 = P(0) = a_0 \quad \text{et} \quad P_1 = P(1) = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 \\ P'_0 = P'(0) = a_1 \quad \quad \quad P'_1 = P'(1) = a_1 + 2a_2 + 3a_3 \quad (1.2)$$

Les deux points délimitant les extrémités de la courbe sont représentés par P_0 et P_1 . Les vecteurs tangents à ces points sont décrits par P'_0 et P'_1 . La figure qui suit, illustre l'effet de la variation du vecteur de tangence au point de départ et d'arrivée.

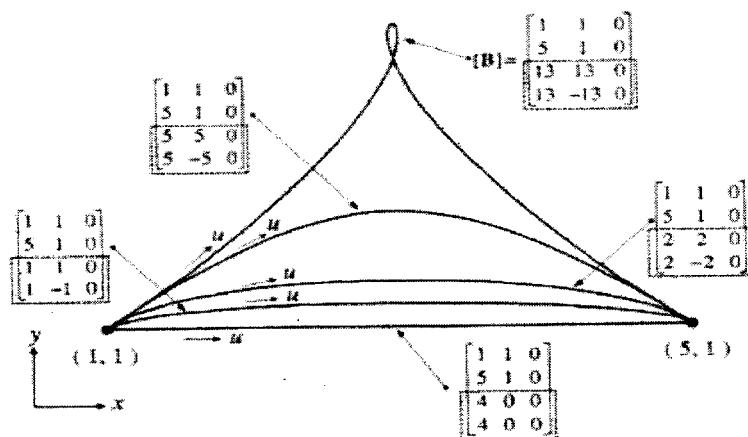


Figure 22 Courbes de type Hermite [13]

On remarque qu'entre deux points, un vecteur de tangence élevé augmente la courbure de la ligne à un tel point que la concavité de la courbe peut changer de direction.

1.5.2 Les courbes Bezier

Les courbes de Bezier ont initialement été créées par la compagnie Renault, sous la supervision de M. Bezier, pour répondre à un meilleur lissage des surfaces de carrosserie. Les courbes de Bezier sont basées sur la méthode des courbes Hermite utilisant les équations de Bernstein. Toutefois, un polygone de contrôle (défini par des points de passage) guide la courbure.

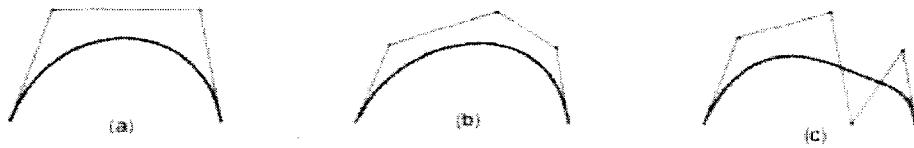


Figure 23 Courbes de Bezier [13]

1.5.3 Les courbes B-Spline

Tel que présenté précédemment, les courbes de Bezier comportent de nombreux points de contrôle. Ceux-ci affectent l'équation de la courbe qui sera à une puissance élevée si elle est décrite par plusieurs points de contrôle. Les courbes utilisant des polynômes de degré élevé sont sujettes à subir de nombreuses oscillations. De plus, il est difficile de modifier localement l'allure de la courbe de Bezier. Pour changer la courbure à un endroit précis sur la courbe, le déplacement d'un point de contrôle entraîne la modification complète de la courbe originale. Cette caractéristique non désirée constitue une modification globale des propriétés de la courbe. Pour solutionner cette difficulté, Cox et Boor (1972) ont suggéré un nouveau type de courbe; la B-Spline. La

figure qui suit illustre cette courbe. Le principe consiste à définir une courbe par un ensemble de petites courbes contenant un point de départ et un point d'arrivée avec un point de contrôle.

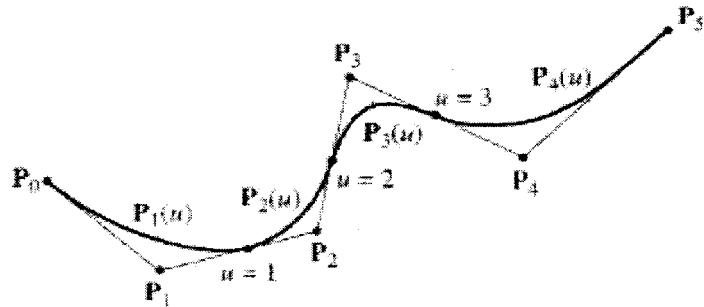


Figure 24 Courbe B-Spline [13]

1.5.4 Les courbes NURBS

Similaires aux courbes B-Spline, les courbes NURBS “Nonuniform rational B-Spline curve”, utilisent un paramètre de plus pour définir les coordonnées des points de contrôle. En effet, une courbe B-Spline définit la position des points de contrôle par les coordonnées (X_i, Y_i, Z_i) . L'idée d'une courbe NURBS consiste à ajouter un paramètre homogène h_i et de définir les points de contrôle en utilisant ce paramètre de la manière suivante : $(X_i * h_i, Y_i * h_i, Z_i * h_i)$. La courbe NURBS a pour avantage de garantir le passage par le point de départ et d'arrivée qui ont été spécifiés. La figure ci-dessous schématise ce type de courbe.

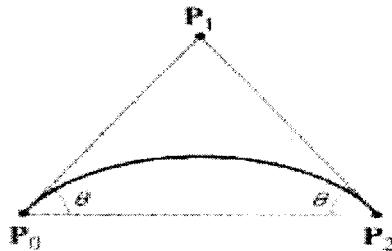


Figure 25 Courbe NURBS [13]

Le paramètre h permet à la courbe d'être plus versatile lorsque l'on veut modifier son allure. L'ensemble est moins affecté et la modification est davantage localisée. Une augmentation du paramètre "h" permet de concentrer une modification de la courbure vers un point de contrôle. Tout comme une B-Spline, la définition d'une courbe NURBS est constituée par un ensemble de petites courbes contenant un point de départ et d'arrivée avec un point de contrôle ne touchant pas la courbe.

Liu et Ahmad [14] ont, pour leur part, mis en application l'utilisation de courbes NURBS pour tracer les parcours d'outil lors de l'usinage. En plus de générer la trajectoire, l'algorithme qu'ils ont développé comporte un module qui regarde les déplacements à venir "look-ahead" et ajuste la vitesse d'avance en fonction de l'accélération et de la décélération que la machine peut offrir. Ainsi, en ajustant adéquatement l'avance, dépendamment de la trajectoire et des caractéristiques de la machine, il est possible de maintenir une vitesse constante la plupart du temps. Les courbes NURBS, appliquées pour des opérations d'usinage, réduisent le temps de coupe. De plus, ce type de courbe nécessite un temps de compilation raisonnable comparativement aux autres méthodes.

En se basant également sur des courbes NURBS, Jee et Koo [15] sont arrivés à définir efficacement les parcours d'outil en usinage surfacique. En plus de l'utilisation des courbes NURBS, leur algorithme est aussi fondé sur la minimisation du paramètre crête à crête. Ceci implique que, pour une opération faisant intervenir un outil en bout rond, le surplus de matériel laissé sera très faible et le fini de surface sera de bonne qualité.

Le programme conçu par Jee et Koo a été développé en langage C++, et fait intervenir la méthode iso-scallop. Les essais expérimentaux qu'ils ont menés indiquent le potentiel des courbes NURBS et minimisent le temps de production.

1.6 Limitation des machines

La venue de l'usinage haute vitesse a inévitablement impliqué la conception d'outils de coupe nécessitant un balancement très précis afin d'éviter l'apparition de vibrations, rendant l'usinage instable. La haute vitesse de rotation de la broche fait en sorte que l'outil peut passer à travers divers modes de résonance. De ce fait, les recherches de Yusuf Altintas [16, 17] ont permis d'assurer un usinage dans des conditions appropriées. La technique de l'analyse modale, mise de l'avant par Y. Altintas, consiste à déterminer la fonction de transfert de l'outil, en effectuant un test d'impact. La figure ci-dessous schématise la méthode utilisée pour procéder à ce test.

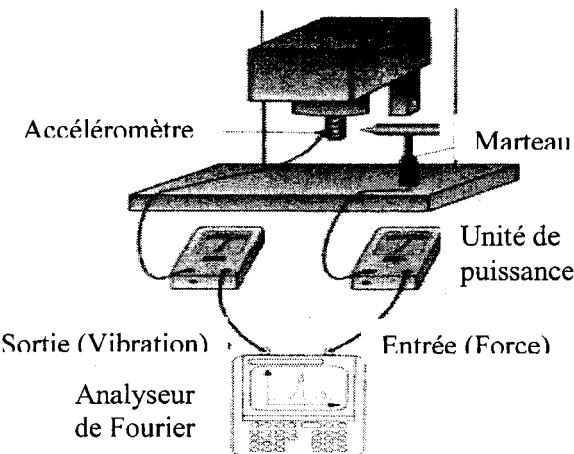


Figure 26 Montage pour déterminer les conditions optimales d'usinage [16]

Une fois l'essai complété, il est possible d'évaluer la fonction de transfert. L'analyse de la vibration de l'outil permet d'obtenir les paramètres modaux nécessaires pour déterminer les conditions de coupe idéales. Le graphique des lobes de stabilité est par la suite tracé et représente la profondeur de coupe atteignable en fonction de la vitesse de rotation de la broche. Boutin [18] a démontré que la géométrie de l'outil, le nombre de dents en contact, le coefficient d'effort de coupe, d'amortissement et de rigidité avaient un impact notable sur le graphique de stabilité.

Ainsi, l'analyse modale permet d'obtenir le comportement dynamique de l'outil. Il est donc possible d'éviter la vibration excessive, d'augmenter la durée de vie de l'outil et d'améliorer le fini de surface. Les lobes de stabilité permettent de visualiser les conditions de coupe optimales pour favoriser un taux d'enlèvement de matière maximal, sans apparition de vibration. L'épaisseur du copeau est maintenue constante durant le procédé (figure 27). L'analyse modale révèle toute son importance pour des composantes aéronautiques constituées de murs minces, Warnecke et Siems [19]. En minimisant la vibration pendant l'usinage, les pièces seront d'une grande précision [20] et satisferont au procédé de fabrication.

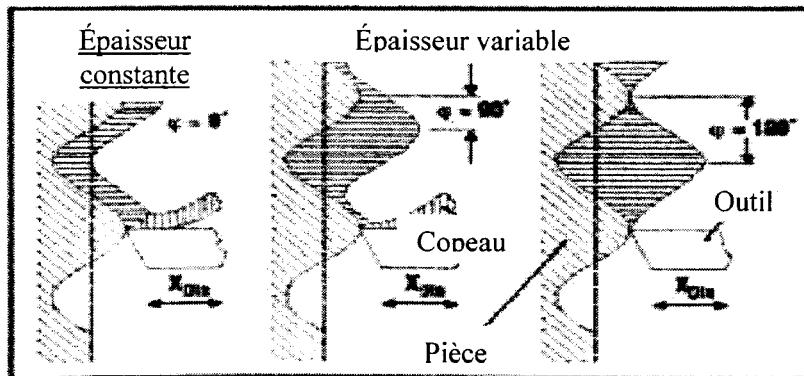


Figure 27 Copeau d'épaisseur variable [19]

Cette revue littéraire a permis de mettre en évidence les récents développements relatifs au domaine de l'usinage haute vitesse, ainsi que des avantages associés à cette nouvelle technologie. Entre autres, il a été question des stratégies de coupe les plus conventionnellement employées et des nouvelles trajectoires de coupe présentement en cours de développement, permettant de réduire significativement le temps d'usinage. Suite à cette section, une interprétation des types de courbe : Hermite, Bezier, B-Spline et NURBS, servant à la génération des parcours d'outil a été explorée. La dernière partie de cette revue littéraire a mis de l'avant les limitations de l'UHV. L'ensemble de ces connaissances sera d'une grande utilité pour développer un algorithme générant des trajectoires de coupe plus efficaces.

CHAPITRE 2

CHOIX ET DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE

2.1 Introduction

La présente section consiste premièrement à définir une pièce rencontrant les exigences et les caractéristiques spécifiques en industrie. Cette pièce servira à des essais d'usinage. Par la suite, ce chapitre fera état de nouvelles idées de stratégies de coupe dont le développement et l'expérimentation seront présents aux chapitres subséquents. La nouvelle tactique de coupe choisie, offrant le meilleur rendement, sera programmée (chapitre 3) à l'aide du logiciel CATIA®.

2.2 Design d'une pièce prototype

Les pièces illustrées à la figure 28 sont constituées de pochettes à murs minces typiquement produites dans l'industrie aéronautique.

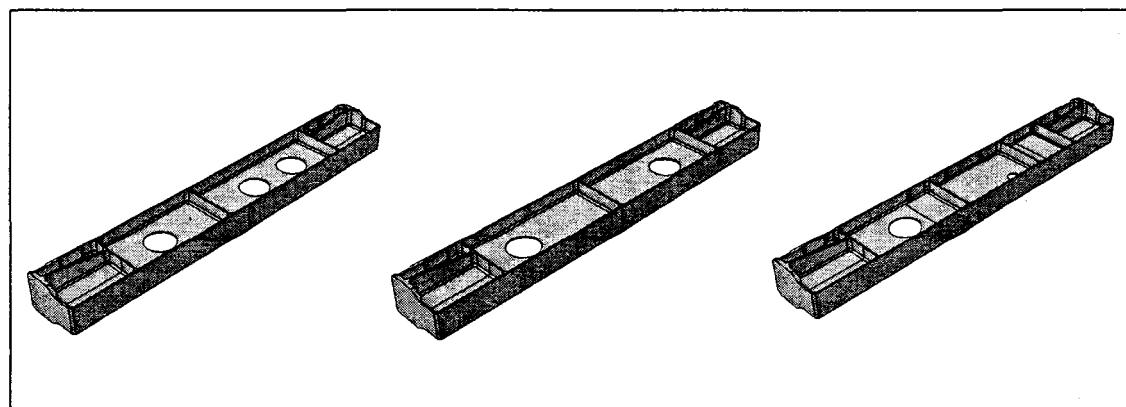


Figure 28 Exemples de pièces d'aéronefs

Afin de satisfaire aux exigences des industriels, la pièce prototype qui a été suggérée est également constituée de pochettes à murs minces. Pour faciliter les essais expérimentaux d'usinage, des cavités rectangulaires sont réparties sur une pièce de dimension : $12'' \times 8'' \times 2''$. Les pochettes sont respectivement d'une grandeur de $7'' \times 5''$, $6'' \times 3''$ et $3'' \times 1''$. On remarque aussi que le mode de maintien de la pièce est simplifié grâce à l'usinage de 4 trous lamés permettant de boulonner la pièce sur la table de la commande numérique. La figure ci-dessous, représente une pièce prototype. Le dessin de fabrication est joint à l'annexe 1 de ce rapport. Dépendamment de la dimension du matériel brut fourni, d'autres pièces avec des pochettes de géométries similaires ont également été usinées pour des essais expérimentaux en laboratoire.

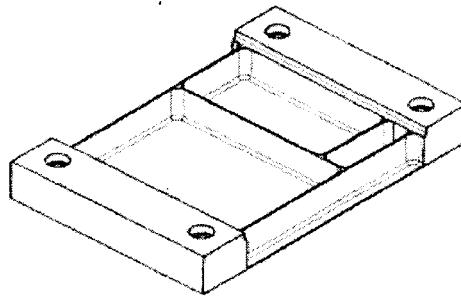


Figure 29 Pièce prototype

Le matériel choisi correspond à celui typiquement utilisé pour la fabrication des pièces de structure en aéronautique, soit l'aluminium 7475. Il sera ainsi possible de reproduire plus fidèlement les conditions de coupe des partenaires industriels participant au projet.

2.3 Élaboration de diverses stratégies de coupe

Tel qu'il en fut mention dans le chapitre précédent, les trajectoires de coupe spiralées sont d'un grand intérêt pour réduire le temps d'usinage. Dans un premier temps, l'objectif est d'arriver à générer de tels types de trajectoire sur la pièce prototype et de mesurer les gains de temps. Par la suite, si les gains sont significatifs, il serait

intéressant d'incorporer ce type de trajectoire à un logiciel de CFAO, tel que CATIA[®], et ainsi avoir accès à cette fonctionnalité prototype jusqu'à présent inexiste dans la plupart des logiciels commerciaux. Afin de valider cette nouvelle tactique de coupe, un algorithme a été développé dans MATLAB[®] (annexe 2) pour générer rapidement des trajectoires spiralées, adaptées à des pochettes rectangulaires. Grâce à ce programme, la figure 30 démontre diverses géométries pour lesquelles il est possible de générer une trajectoire spiralee.

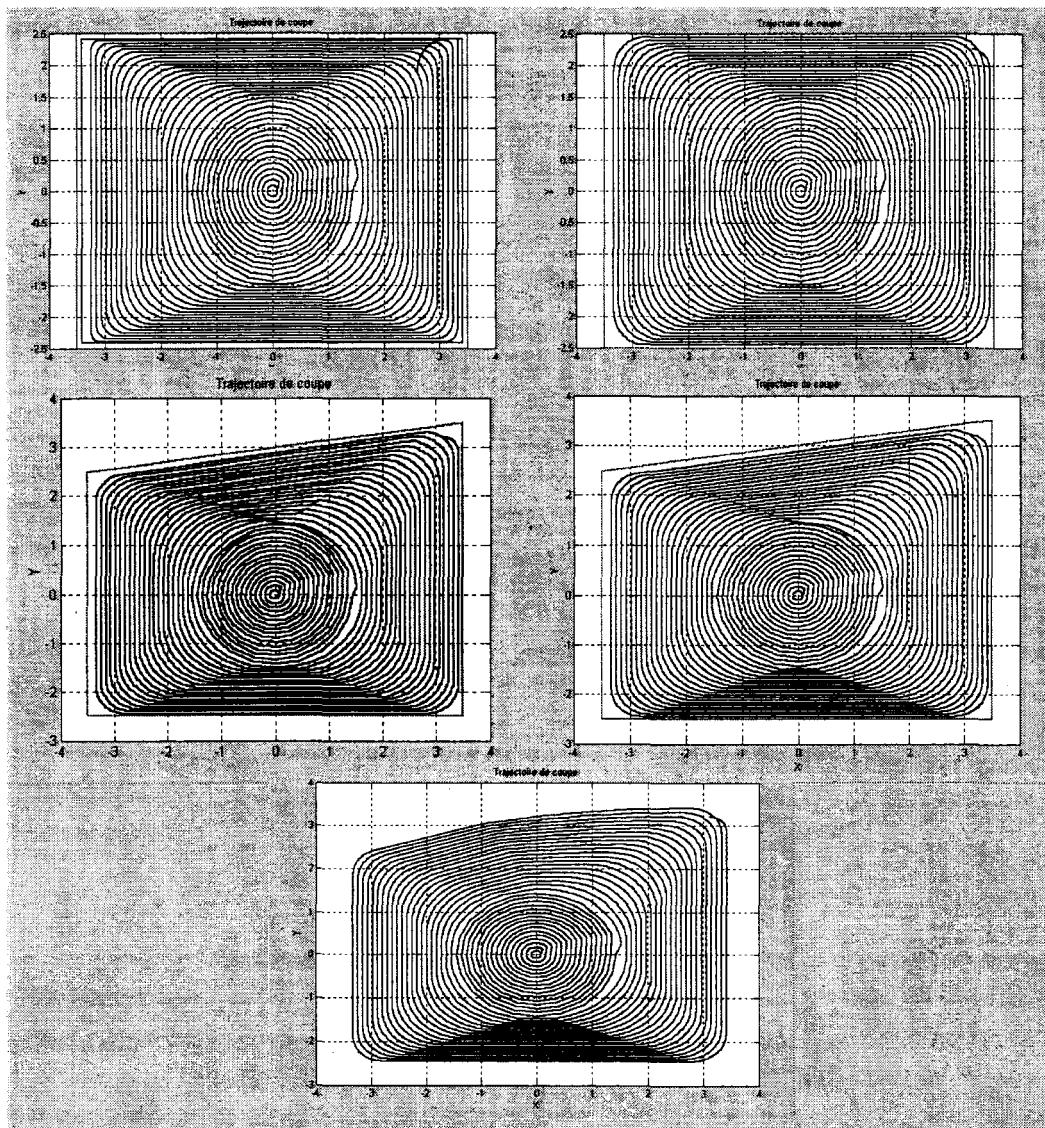


Figure 30 Trajectoires spiralées dans MATLAB[®]

La complexité des trajectoires de coupe est directement reliée à la géométrie des pièces à usiner. Pour les trajectoires spiralées, la difficulté vient du fait que le parcours d'outil doit s'adapter graduellement à la forme de la pochette. En effet, dans le programme MATLAB®, l'usinage débute au centre de la pochette par une évolution spiralée de géométrie circulaire et ne ressemble aucunement à la géométrie de la cavité. Graduellement, la trajectoire s'adapte à la géométrie du profil. Des points distribués sur des éléments linéaires et circulaires sont utilisés pour décrire le modèle (figure 31).

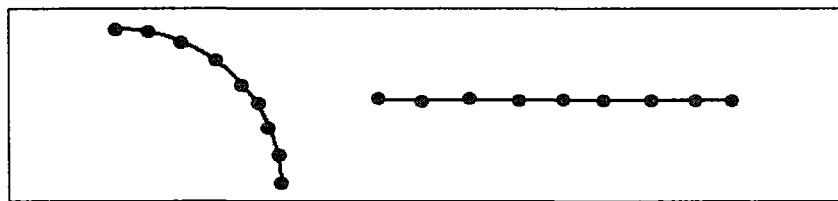


Figure 31 Points distribués le long d'éléments linéaires et curvilignes

Ces points décrivant la trajectoire sont employés par le contrôleur de la machine pour diriger l'outil. Le programme prototype permet donc de calculer les trajectoires spiralées et de les adapter à diverses géométries. Par cette méthode, des gains de temps peuvent être enregistrés. Dans les sections qui suivent, il sera question d'essais expérimentaux pour quantifier plus spécifiquement ce gain de temps.

Une autre tactique d'usinage, qui serait intéressante d'incorporer aux trajectoires spiralées, consiste à ajouter des boucles aux extrémités de la pochette. Ce nouvel ajout est représenté à la figure 32. Comme il en a déjà été mention, une trajectoire spiralée débute de façon circulaire pour s'adapter à la géométrie de la pochette. Or, les endroits où il y a davantage de matériel à enlever dans les dernières passes, se situent aux quatre coins. Par rapport à la trajectoire de départ (circulaire), les coins sont les endroits où le parcours doit davantage s'adapter. Cela implique que les dernières passes radiales sont plus profondes. L'ajout de boucles est particulièrement approprié car elles permettent d'enlever un excès de matériel avant de poursuivre l'usinage du contour. Il en résulte

que l'outil est moins engagé dans les coins et ainsi, la durée de vie de l'outil peut se prolonger. Bien que le parcours soit légèrement plus long, il est possible d'en tirer bénéfice en réduisant l'usure de l'outil.

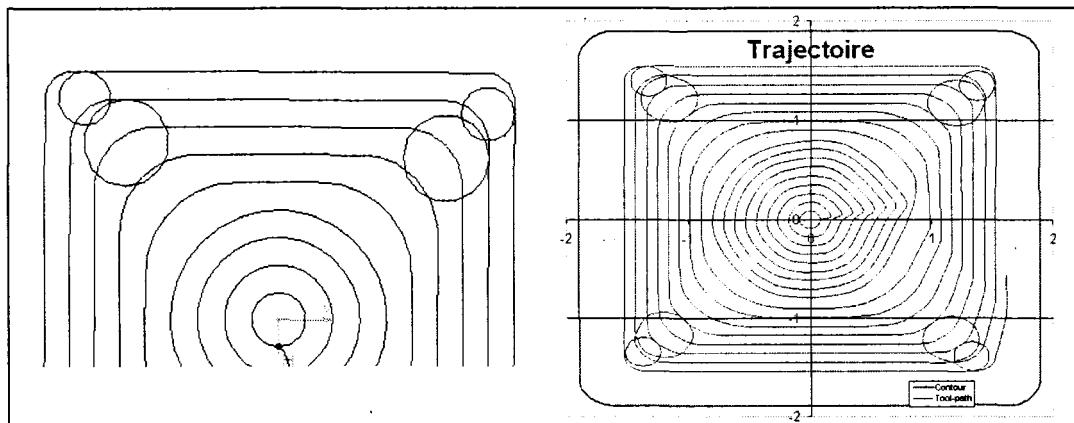


Figure 32 Trajectoire spiralee avec boucles dans les coins

Une autre tactique de coupe qui a été à l'essai, pour usiner des poches rectangulaires, consiste à développer une trajectoire elliptique. Tout comme pour les trajectoires spiralées, le but de cet essai vise la réduction du temps d'usinage due à la douceur de la trajectoire. La figure 33, représente cette idée. Entre autres, on remarque qu'il y a deux zones sur cette figure.

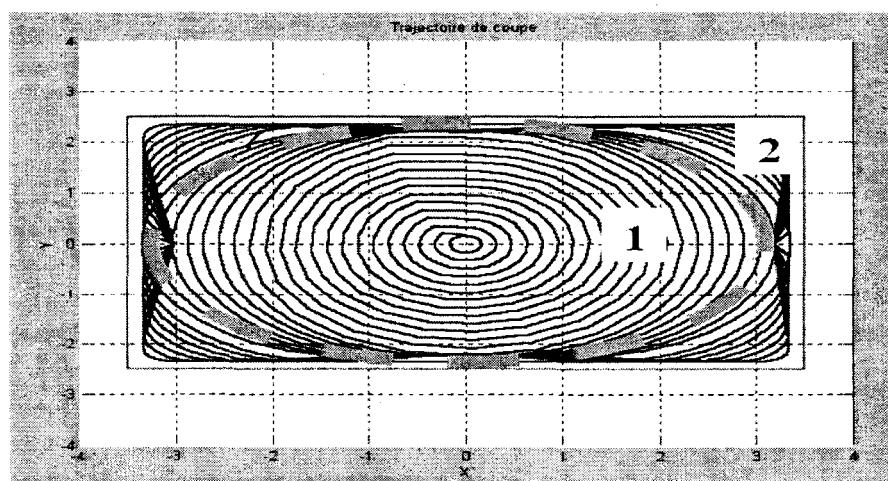


Figure 33 Trajectoire elliptique, coins usinés à la fin avec dégagement

La zone 1 représente un parcours elliptique sur toute la longueur de la pochette. Par la suite, la zone 2 consiste à usiner la matière restante aux quatre coins de la pochette. Cette trajectoire est particulière car, à chaque passe, l'outil se dégage légèrement de la paroi pour s'approcher en avance rapide au prochain coin à usiner.

Bien que cette méthode permet d'effectuer des gains de temps grâce à la partie elliptique, il n'en demeure pas moins que l'outil doit effectuer des déplacements supplémentaires dans le vide pour usiner les coins (zone 2) et il en résulte des pertes de temps. Une autre approche est envisageable pour usiner les coins de la zone 2. Une fois que la partie elliptique de la trajectoire est complétée (zone 1), il est possible d'usiner les 4 coins en plongeant de manière répétitive l'outil, comme un foret. La figure 34, démontre cette nouvelle façon de faire au coin supérieur droit.

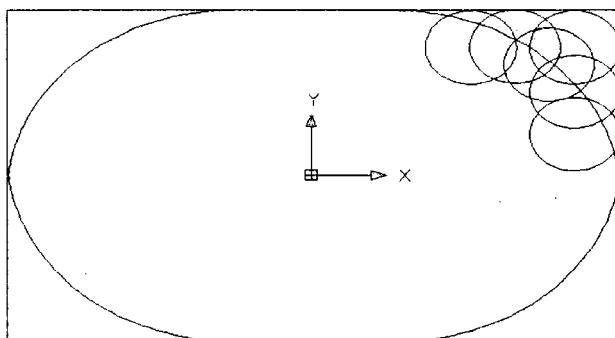


Figure 34 Plongée de l'outil pour usiner les coins

En plongeant l'outil, on constate qu'il restera un léger surplus de matière non usiné. Toutefois, comme cette méthode s'applique pour du dégrossissage, une opération de finition est nécessaire pour obtenir la géométrie finale de la pochette.

Des essais expérimentaux à vide ont permis de constater que cette méthode pouvait s'avérer bénéfique pour diminuer le temps d'usinage. En effet, en comparant le temps d'usinage d'une trajectoire traditionnelle avec la méthode elliptique suivie d'une

plongée de l'outil, il est possible d'obtenir des gains. Sur une pochette rectangulaire de 5 po. \times 7 po., la même vitesse d'avance a été utilisée. Cependant, pour la nouvelle méthode, comme l'outil travaille aussi en plongée, diverses vitesses d'avance ont été testées pour comparer le gain de temps. Les résultats figurent dans le tableau I.

Tableau I

Gain de temps par la méthode elliptique suivie d'une plongée

Avance en plongée (po/min)	Gain de temps (%)
25	7,9
50	13,4
75	15,3
100	16,2

En employant la méthode elliptique, et en utilisant la même vitesse d'avance que pour un parcours rectangulaire traditionnel sur la zone 1 (ellipse), le premier résultat affiché dans ce tableau indique un gain de temps d'environ 8% si la vitesse d'avance de la zone 2 en plongée est de 25 po/min. Cette méthode permet donc de réduire le temps d'usinage mais nécessite une passe de contournage en finition pour enlever les surplus de matériel restant, suite à l'opération en plongée.

Dans un autre ordre d'idée, les parcours d'outil générés dans les logiciels de CFAO sont traduits par une infinité de petits mouvements G01. Or, pour minimiser le temps, il est possible d'exploiter les fonctions d'interpolations que possède certains contrôleurs de machines MOCN. À cet effet, un contrôleur de marque Siemens 840D fut utilisé pour nos essais.



Figure 35 Exemple d'interpolation

En utilisant les fonctions d'interpolation, il est possible de faire passer par le même parcours une courbe polynomiale de divers degrés. Contrairement à des directions G01, la trajectoire est moins saccadée. Toujours pour une pochette rectangulaire, des essais à vide ont permis de quantifier le gain de temps d'une trajectoire spiralée, si on utilise une interpolation polynomiale contrairement à des G01. La trajectoire générée a premièrement été testée sur la machine en utilisant une interpolation linéaire exprimée par des codes G01. Par la suite, des interpolations polynomiales de degré 3, 5 et 7 ont été utilisées pour décrire le parcours. (À titre indicatif, une interpolation de degré 5 est couramment appelée une interpolation NURBS.) Les essais expérimentaux se regroupent dans le tableau II, ci-dessous.

Tableau II

Temps d'usinage en fonction du type d'interpolation utilisé

Type d'interpolation	Temps (sec.)
Code G	107,94
Polynôme degré 7	95,36
Polynôme degré 5	93,52
Polynôme degré 3	102,97

Le temps d'usinage le plus long est associé à l'interpolation linéaire (G01). Bien qu'un grand nombre de petites lignes décrivent la trajectoire, il n'en demeure pas moins que ce type d'interpolation est le plus saccadé. Une interpolation polynomiale de degré 3 permet de réduire le temps et de créer un parcours d'outil plus doux. Étonnamment, l'interpolation de degré 7 n'est pas la plus optimale. La fonction qui est utilisée dans la machine pour générer ce polynôme, requiert une lecture de plusieurs points en avant (look ahead) pour définir la courbe. Il s'en suit une augmentation du temps de compilation qui augmente le temps d'usinage. L'interpolation NURBS de degré 5 offre un temps d'usinage plus court et permet donc de réduire le temps de fabrication lors des opérations de dégrossissage sur des pochettes. En comparant cette méthode polynomiale de degré 5 à la traditionnelle méthode des G01, un gain de temps de 13,5%

est obtenu. L'influence des types d'interpolation utilisés pour définir le parcours d'outil dénote une meilleure efficacité pour ce qui est des polynômes de degré 5 (NURBS). Il est important de mentionner que les fonctions d'interpolation utilisées par les contrôleurs, agissent comme des compacteurs et compriment en quelque sorte l'information relative à la trajectoire. Au lieu de traiter de nombreux petits blocs, la CN traite un bloc de déplacement plus important. De plus, l'utilisation des fonctions de compactage est effectuée exclusivement pour les blocs d'interpolation linéaire G01.

Les deux prochaines stratégies qui suivent, favorisent davantage le respect des tolérances de fabrication. En effet, l'usinage d'une pochette nécessite plusieurs passes en plongée. Or, la quantité de matériel constituant la pièce brute est davantage présente au début de l'usinage. Cette caractéristique physique impose une meilleure rigidité durant les premières passes. Si la profondeur axiale est plus grande durant les premières passes, il est possible d'enlever plus de matériel et de maintenir une forte rigidité de la pièce. Tout au long de l'usinage, le matériel à enlever diminue. Comme la pièce devient moins rigide, une profondeur axiale moins prononcée permettrait de contrer la perte de rigidité et d'avoir une pièce respectant mieux les tolérances de fabrication. La figure 36, montre cette méthode de passes étagées à profondeur axiale décroissante.

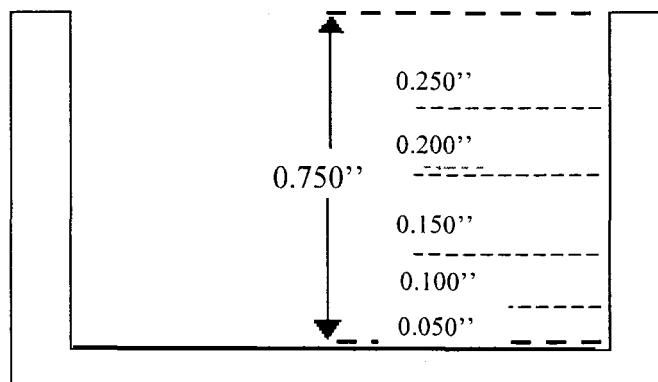


Figure 36 Passes étagées décroissantes

Pour des pièces composées de murs minces, la vibration des murs peut engendrer une coupe de matériel non désirée. Cette approche peut être bénéfique, contrairement aux logiciels de CFAO qui offrent uniquement une profondeur de coupe constante.

La seconde méthode s'appuie aussi sur des principes permettant de minimiser la vibration des pièces à murs minces. Cette nouvelle approche s'applique pour les pochettes rectangulaires de grandes dimensions et consiste à ajouter temporairement des murs de support (figure 37). Ces murs permettent temporairement d'augmenter la rigidité aux endroits les plus faibles. La vibration est également réduite et la précision d'usinage est maintenue. Une opération supplémentaire est requise pour enlever les murs et obtenir le produit final.

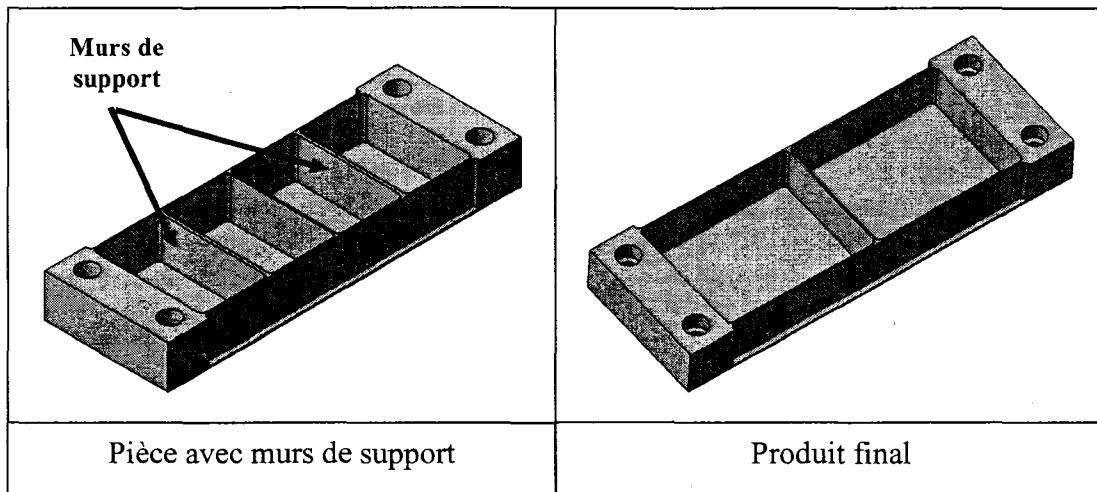


Figure 37 Éléments de support

La technique des passes étagées décroissantes et des éléments de support n'ont pas été testées lors des essais et représentent de nouvelles méthodes permettant de maintenir un usinage plus stable.

L'observation des tactiques de coupe sur des pièces actuellement usinées en industrie a permis de faire une constatation afin d'améliorer les trajectoires et d'augmenter la

quantité de matériel brut enlevée sur la pièce. Lorsque des pochettes à murs obliques sont usinées, le parcours d'outil est généré à partir de la géométrie du fond de la pochette (figure 38). L'opération de dégrossissage dans CATIA® ne permet pas d'enlever l'excès de matériel situé au-dessus du mur oblique. Il faut utiliser d'autres opérations.

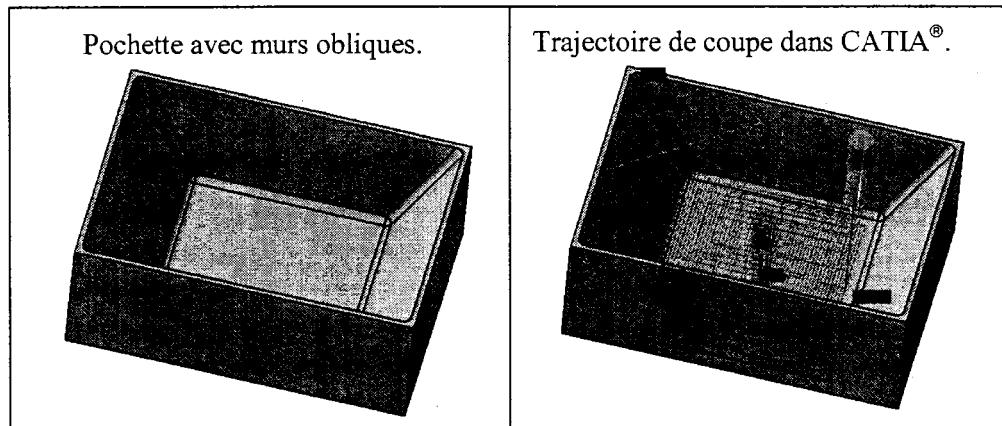


Figure 38 Trajectoire de coupe d'une pochette avec murs obliques

Une alternative suggérée pour créer l'algorithme des parcours d'outil devrait prendre en considération la présence de murs obliques et adapter une trajectoire permettant d'enlever l'excès de matériel. La figure 39 représente la façon dont la trajectoire devrait être générée si il y avait un mur oblique à gauche et à droite.

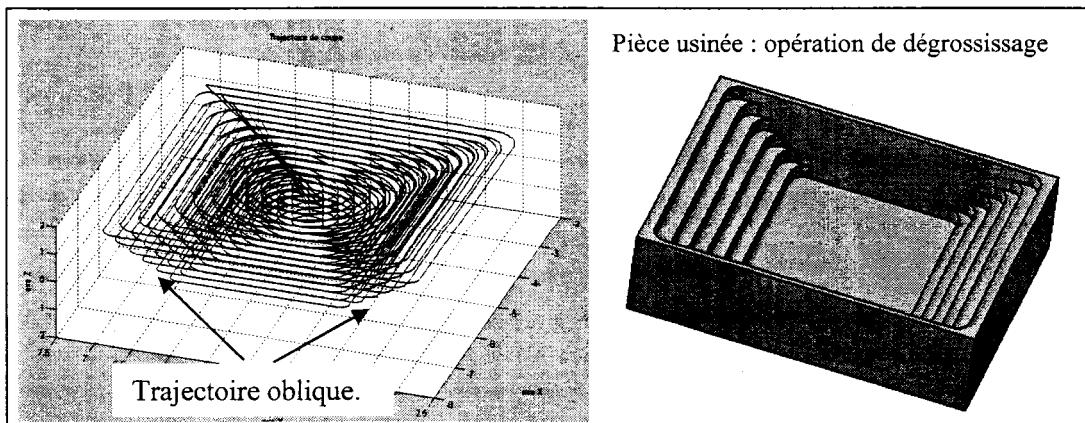


Figure 39 Amélioration de la trajectoire pour une pochette à murs obliques

Suite à tous ces essais expérimentaux, la stratégie de coupe offrant le plus de potentiel s'avère être la tactique de coupe spiralée adaptative. Cette nouvelle façon de faire est justifiée et sera choisie pour être programmée dans CATIA®, afin d'améliorer les opérations de dégrossissage. La section qui suit, fait état d'une étude plus poussée concernant le gain de temps relatif à l'utilisation de cette méthode.

2.4 Essais à vide et étude du gain de temps

Les essais d'usinage à vide, effectués sur une machine MOCN verticale de marque Huron avec contrôleur Siemens, font référence à la pièce prototype composée de pochettes à géométries simples. Cette pièce simule un exemple d'application pour des opérations de dégrossissage en aéronautique à laquelle sera appliquée une trajectoire spiralée. Afin de mieux comprendre le comportement du parcours d'outil, des pochettes de géométrie carrée et rectangulaire ont été utilisées, lors des essais de simulation.

Parmi les paramètres requis pour définir la trajectoire spiralée, notons l'endroit géométrique où la spirale débute sa transition pour s'adapter à la géométrie de la pochette. Cet endroit appelé " ϕ " constitue une proportion " P " appliquée à la largeur " l " de la pochette.

$$\phi = P \times l \quad (2.1)$$

avec :

ϕ : diamètre définissant la trajectoire spiralée

P : proportion de la largeur de la pochette (%)

l : largeur de la pochette

Tel qu'illustre à la figure 40, une proportion de 70% et 30% de la largeur de la pochette définit le début de transition de la spirale avec le contour. La figure 41 à la page suivante, représente l'évolution de la trajectoire qui sera expérimentée.

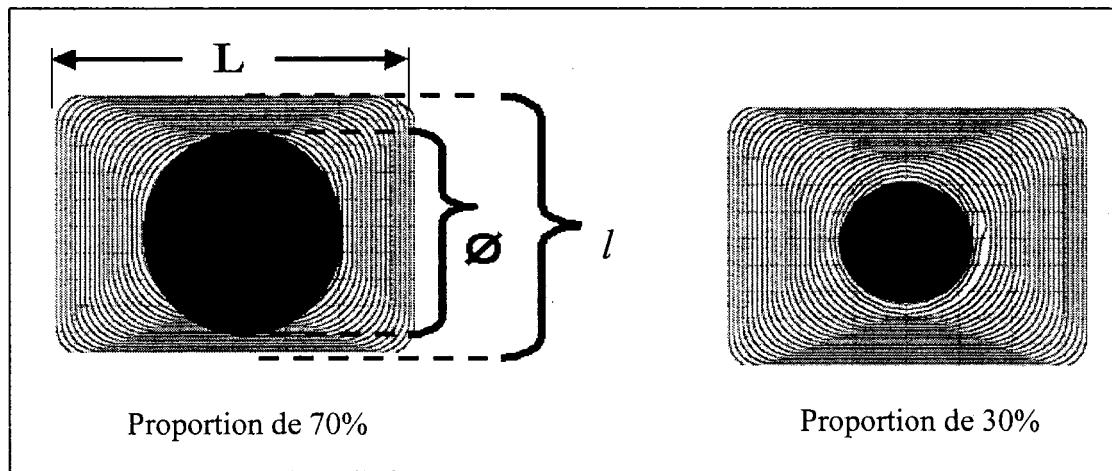


Figure 40 Paramètres pour la génération de la trajectoire

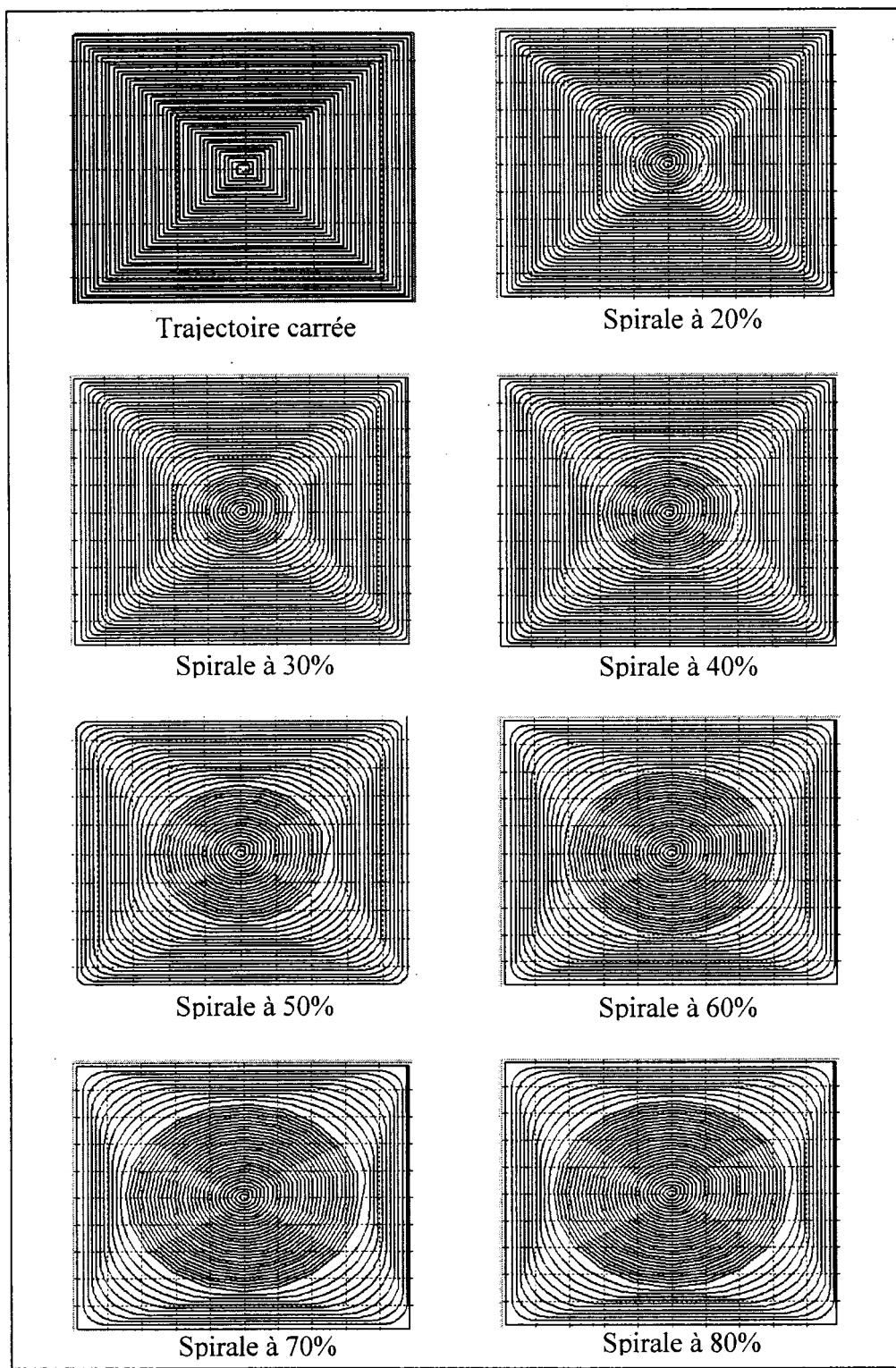


Figure 41 Évolution de la trajectoire spiralée

Les essais expérimentaux sur une cavité de géométrie carrée ont permis de recueillir des résultats sur le temps de l'usinage à vide. Dans un premier temps, les trajectoires spiralées possédant une transition de 20% à 70% ont été générées par le programme dans MATLAB[®] (annexe 2). Par la suite, ces trajectoires traduites en code G, furent transférées à la machine-outil et simulées à des vitesses d'avance variant de 200 à 600 po/min. Le tableau III contient les temps d'usinage obtenus.

Tableau III

Temps de coupe des essais à vide

Type	Temps (sec.)						
	Avance (po/min)						
	200	300	350	400	450	500	600
1-Spirale C20%	141,58	99,20	87,96	80,06	74,27	70,01	64,01
2-Spirale C30%	138,45	96,28	84,83	76,59	70,51	65,93	60,00
3-Spirale C40%	136,42	94,27	82,97	74,82	68,72	64,04	57,73
4-Spirale C50%	136,47	94,04	82,07	74,65	68,62	64,00	57,58
5-Spirale C60%	134,85	92,71	81,36	73,39	67,60	63,14	56,96
6-Spirale C70%	133,59	91,93	81,06	73,44	67,98	63,98	58,63

En comparant le temps nécessaire pour usiner de façon conventionnelle le même type de géométrie, c'est-à-dire par contournage parallèle, il a été possible d'évaluer le gain de temps d'usinage. Ces valeurs ont été compilées dans le tableau IV. Les vitesses d'avance utilisées pour effectuer les comparaisons sont les mêmes.

Tableau IV

Gain d'usinage (% temps)

Type	AVANCE (%)						
	200	300	350	400	450	500	600
1-Spirale C20%	9,1	10,4	10,8	10,9	10,6	10,0	9,1
2-Spirale C30%	11,4	12,9	13,4	13,9	14,1	14,0	13,2
3-Spirale C40%	13,4	15,2	15,6	15,8	16,0	16,0	15,7
4-Spirale C50%	19,5	21,5	21,8	21,7	21,4	21,1	20,4
5-Spirale C60%	18,2	20,1	20,5	20,2	19,6	18,7	17,3
6-Spirale C70%	19,8	21,5	21,5	21,0	20,1	18,7	15,9

Une analyse des résultats sur le gain de temps permet de constater qu'il est possible de réduire environ de 9 à 20% le temps de coupe. Cependant, il est à noter qu'un faible pourcentage d'adaptation spiralée génère une trajectoire ressemblant beaucoup à de l'usinage conventionnel. Il en résulte un gain de temps plus modeste.

$$\%Gain = \frac{t_{conv.} - t_{spirale}}{t_{conv.}} \times 100 \quad (2.2)$$

%Gain : % de gain en temps d'usinage

$t_{conv.}$: temps d'usinage conventionnel

$t_{spirale}$: temps d'usinage pour une trajectoire spiralée

Graphiquement, la figure 42 représente les temps d'usinage en fonction de la transition spiralée pour chaque vitesse d'avance. Il est ainsi possible d'illustrer le comportement des trajectoires. Tel que prévu, une augmentation de la vitesse d'avance a pour conséquence de réduire le temps d'usinage. Cependant, le gain de temps est considérable lorsque l'on change la vitesse d'avance de 200 po/min à 300 po/min.

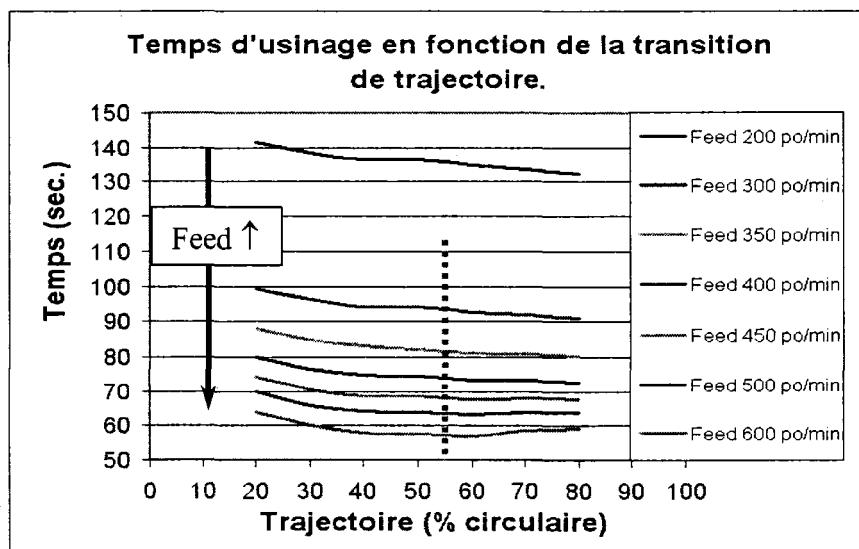


Figure 42 Temps d'usinage à des vitesses d'avance variables

L'étude concernant la variation de la transition spiralée (spirale circulaire 20% à 70%) permet de constater le phénomène suivant : plus la spirale circulaire est grande, plus le temps d'usinage tend à diminuer. Cette remarque s'explique principalement par la douceur de la trajectoire. Une petite spirale au centre implique que la transition entre les passes d'usinage sera plus abrupte dans les coins. Il y aura davantage de passes avec de petits rayons de courbure dans les 4 coins de la pochette. Le phénomène inverse explique pourquoi une spirale plus grande permet de réduire le temps d'usinage. Pour une vitesse d'avance élevée (600 po/min), un minimum est atteint. Une transition à 50% est optimale. Les graphiques qui suivent, révèlent de manière plus précise la variation du temps d'usinage en fonction de la transition des trajectoires pour une vitesse d'avance donnée. La figure 43 schématisé respectivement ces résultats pour une avance de 300, 400, 500 et 600 po/min.

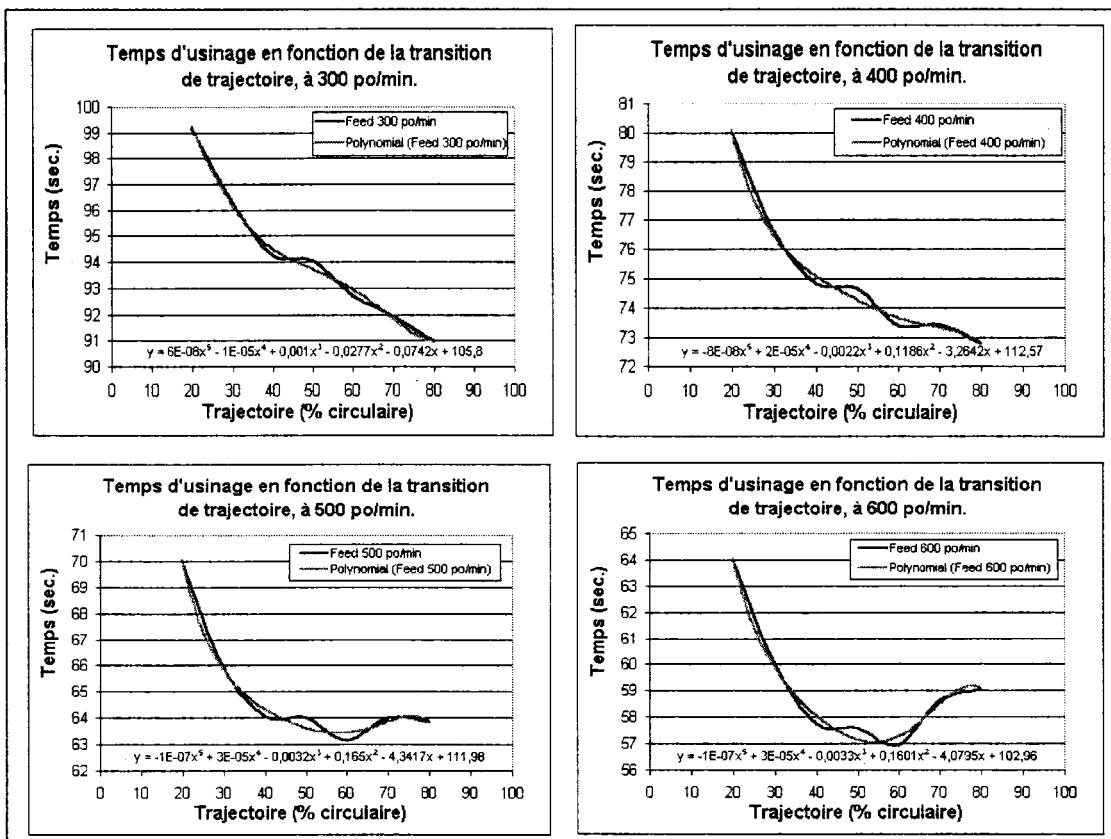


Figure 43 Temps d'usinage pour une transition de trajectoire à avance variable

À chacune des courbes expérimentales est lissé un polynôme qui permet d'estimer le gain de temps, dépendamment du niveau de transition de la trajectoire et de la vitesse d'avance spécifiée. Le comportement des trajectoires s'exprime par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} t_{300} &= 6 \cdot 10^{-8}x^5 - 1 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,001x^3 - 0,0277x^2 - 0,0742x + 105,8 \\ t_{400} &= -8 \cdot 10^{-8}x^5 + 2 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,0022x^3 + 0,1186x^2 - 3,2642x + 112,57 \\ t_{500} &= -1 \cdot 10^{-7}x^5 + 3 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,0032x^3 + 0,165x^2 - 4,3417x + 111,98 \\ t_{600} &= -1 \cdot 10^{-7}x^5 + 3 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,0033x^3 + 0,1601x^2 - 4,0795x + 102,96 \end{aligned} \quad (2.3)$$

avec :

t_{xxx} : temps d'usinage pour une vitesse d'avance spécifiée
 X : niveau de transition de la trajectoire (%)

Si nous fixons maintenant la valeur contrôlant la transition de la trajectoire et faisons varier la vitesse d'avance, il est possible de constater que le gain de temps croît rapidement si l'avance augmente. À cet effet, la figure 44 et 45 permettent aussi de démontrer la forte similitude des deux graphiques. La rapidité à laquelle le temps d'usinage diminue est la même; que l'on soit à un taux de transition de 40% ou de 70%.

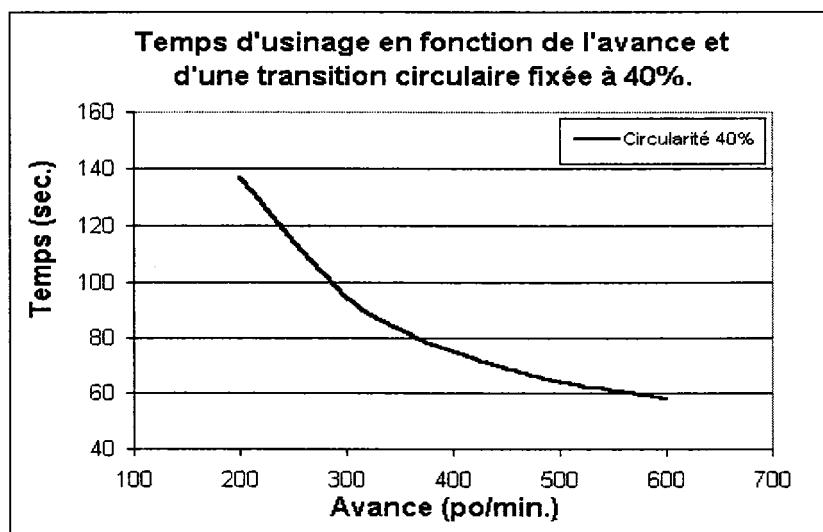


Figure 44 Temps d'usinage pour une transition à 40%

Des résultats similaires pour une transition fixée à 70% sont aussi représentés au graphique suivant. L'allure de la courbe reste la même. Les effets d'accélération et de décélération des axes peuvent maintenant être réduits par l'utilisation de trajectoires d'outil spiralées.

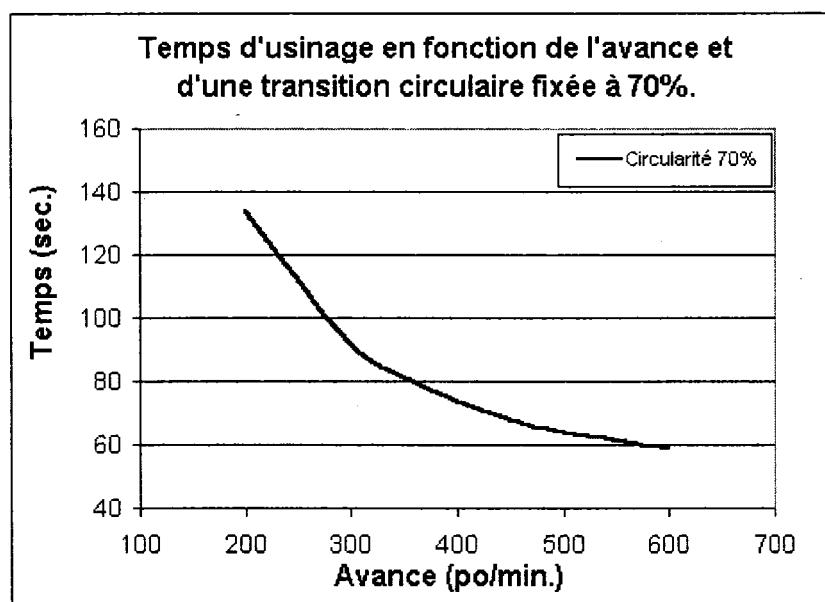


Figure 45 Temps d'usinage pour une transition à 70%

Cette étude a permis de démontrer que des gains de temps considérables peuvent être réalisés à des vitesses d'avance supérieures à 200 po/min (figure 42). De plus, le début de transition de la trajectoire spiralée doit s'effectuer à 50% de la largeur du profil pour les pochettes de forme rectangulaires ou carrées. Ainsi, le parcours d'outil est plus doux et constant.

Une telle approche permet de réduire le temps d'usinage au moins de 15%. Cette amélioration prend toute son importance pour des productions massives de composantes requérant le dégrossissage de pochettes. Les gains de production peuvent

alors être significatifs. L'utilisation de cette nouvelle méthode est fortement recommandée.

2.5 Comportement des trajectoires spiralées adaptatives

Suite aux essais à vide, une étude a été menée pour comprendre la dynamique du comportement engendré par les trajectoires spiralées. Cet essai consiste à mesurer le temps d'usinage d'une trajectoire carrée et d'une trajectoire circulaire de même longueur. Ainsi, comme le périmètre du parcours carré possède la même longueur que la circonférence de la trajectoire circulaire, il est possible de déterminer uniquement l'effet de l'accélération et de décélération des axes de la machine. Ensuite, nous pourrons déduire comment réagissent les trajectoires spiralées.

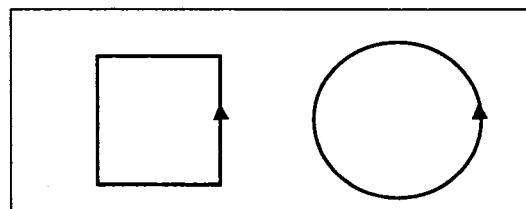


Figure 46 Trajectoire carrée et circulaire

Les tableaux V à IX contiennent les valeurs expérimentales du temps mesuré sur la commande numérique, pour effectuer un parcours carré et circulaire de même longueur à des vitesses d'avance variant de 200 à 400 po/min. Par exemple, le premier tableau indique que pour une trajectoire carrée possédant 4 côtés mesurant 0,5 po., il a fallu 0,82 seconde pour compléter le parcours à une vitesse d'avance de 200 po/min. Comparativement à une trajectoire circulaire de même longueur, il a fallu 0,79 seconde. En utilisant la trajectoire circulaire, le gain de temps est de 3,7%. Les effets d'accélération sont moins présents.

Les résultats expérimentaux se retrouvent dans les tableaux ci-dessous.

Tableau V

Durée d'un parcours carré de 0,5" de côté vs parcours circulaire

Vitesse d'avance (po/min)	Temps du parcours d'outil (sec)		% Gain de temps
	Carré (Longueur = 0,5 po.)	Cercle (Rayon = 0,318 po.)	
1) 200	0,82	0,79	3,7
2) 300	0,75	0,60	20,0
3) 400	0,74	0,52	29,7

Tableau VI

Durée d'un parcours carré de 1" de côté vs parcours circulaire

Vitesse d'avance (po/min)	Temps du parcours d'outil (sec)		% Gain de temps
	Carré (Longueur = 1 po.)	Cercle (Rayon = 0,636 po.)	
1) 200	1,44	1,41	2,1
2) 300	1,16	1	13,8
3) 400	1,08	0,81	25,0

Tableau VII

Durée d'un parcours carré de 2" de côté vs parcours circulaire

Vitesse d'avance (po/min)	Temps du parcours d'outil (sec)		% Gain de temps
	Carré (Longueur = 2 po.)	Cercle (Rayon = 1,273 po.)	
1) 200	2,62	2,59	1,1
2) 300	1,96	1,81	7,7
3) 400	1,63	1,41	13,5

Tableau VIII

Durée d'un parcours carré de 4" de côté vs parcours circulaire

Vitesse d'avance (po/min)	Temps du parcours d'outil (sec)		% Gain de temps
	Carré (Longueur = 4 po.)	Cercle (Rayon = 2,546 po.)	
1) 200	5,04	4,99	1,0
2) 300	3,55	3,41	3,9
3) 400	2,88	2,66	7,6

Tableau IX

Durée d'un parcours carré de 6" de côté vs parcours circulaire

Vitesse d'avance (po/min)	Temps du parcours d'outil (sec)		% Gain de temps
	Carré (Longueur = 6 po.)	Cercle (Rayon = 3,819 po.)	
1) 200	7,44	7,4	0,5
2) 300	5,15	5	2,9
3) 400	4,04	3,82	5,4

Graphiquement, la relation entre la géométrie de la trajectoire et le gain de temps peut rapidement être mise en évidence. La figure 47 illustre ce phénomène. On remarque que le gain de temps est très significatif si on compare les trajectoires carrées et circulaires de faibles dimensions. Bien que les longueurs de parcours soient les mêmes, on constate que plus les trajectoires carrées et circulaires grossissent, moins le gain de temps entre celles-ci est significatif.

En associant ces résultats à l'usinage d'une pochette faisant intervenir un parcours d'outil spiralé, on peut donc affirmer que les premières passes de dégrossissage sont de petites géométries et, par conséquent, c'est au début de cette opération que le gain de temps est le plus important. Par la suite, le parcours d'outil évolue du centre vers le contour de la pochette. Les passes d'usinage sont de plus grande dimension pour

finalement épouser le contour de la géométrie. Il en résulte un gain de temps moins significatif pour les dernières passes de dégrossissage. Le graphique ci-dessous explique ce comportement.

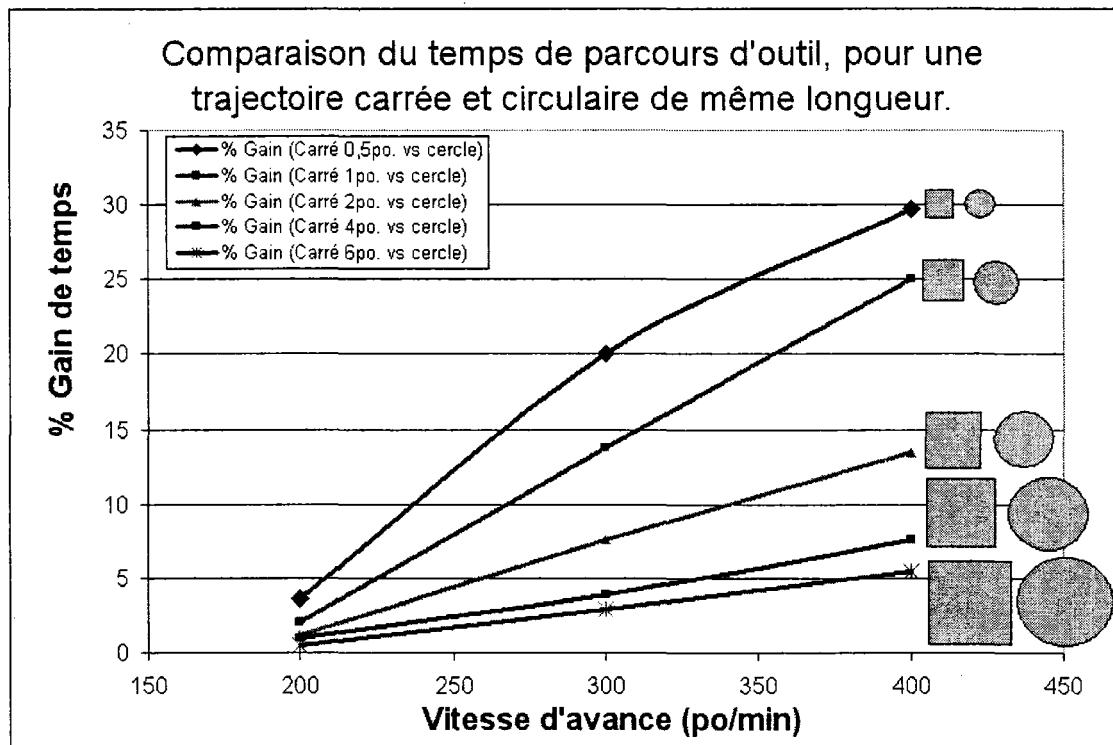


Figure 47 Comparaison de temps entre une trajectoire carrée et circulaire

On remarque également à la figure 48 un gain de temps plus prononcé à des vitesses d'usinage élevées.

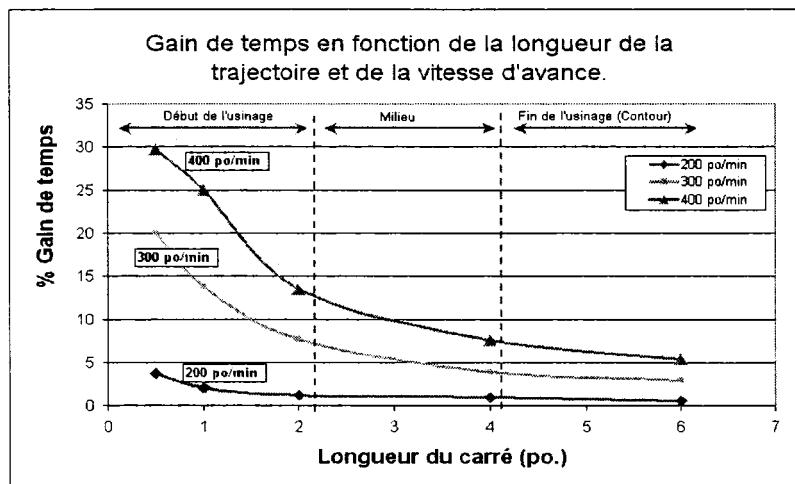


Figure 48 Effet de la vitesse d'avance

Beaucoup d'efforts doivent être fournis par la machine pour décélérer les axes lors de changement de direction (figure 49). À des vitesses élevées, les trajectoires plus douces permettent de tirer pleinement avantage de ce phénomène et de générer des gains de temps plus prononcés.

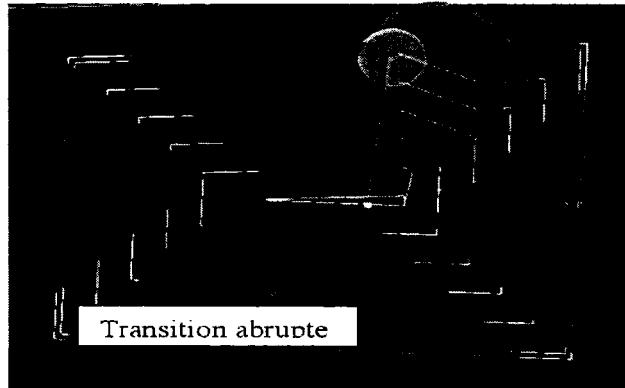


Figure 49 Transition entre les passes

Cette étude comparative a permis de démontrer que l'efficacité des parcours d'outil spiralés adaptatifs possède un rendement maximal au tout début de l'opération de dégrossissage. Il a ainsi été possible de faire la lumière sur le comportement dynamique de ces types de trajectoires.

2.6 Nouvelles tactiques de coupe en approche pour l'UGV

Cette section a pour objectif de tenter d'améliorer les tactiques de coupe en approche (Ramping), avant l'exécution de l'opération de dégrossissage spiralée. Actuellement, les tactiques présentes dans les logiciels de CFAO, sont limitées. Afin de tenter de démontrer la possibilité d'améliorer les trajectoires en approche, des essais de coupe ont été réalisés. Ces essais ont pour but de déterminer les efforts de coupe durant cette opération. La figure 50 illustre six méthodes d'approche qui ont été testées. Ces essais sont :

- Approche conventionnelle dans CATIA[®] (Outil normal à la pièce).
- Approche normale à la trajectoire de coupe.
- Approche conventionnelle plus profonde (Outil normal à la pièce).
- Approche conventionnelle (Outil normal à la pièce et pleinement engagé).
- Approche conventionnelle séparée en deux.
- Approche hélicoïdale.

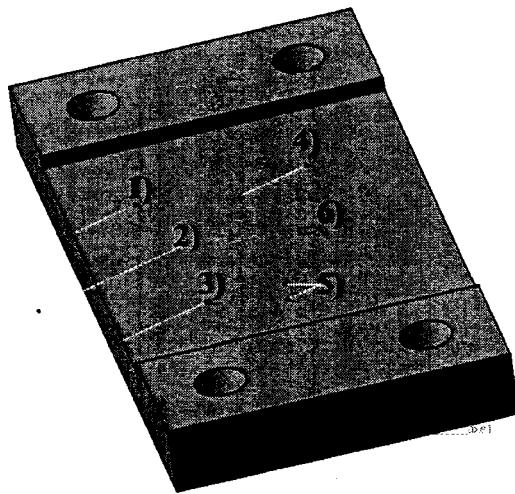


Figure 50 Schéma des 6 essais d'approche

La profondeur de coupe a été fixée à $\frac{1}{4}$ de po. et les essais de 1 à 3 sortent de la pièce. Pour les essais de 4 à 6, l'outil est pleinement engagé dans le matériel. Cette différence permet de comparer toutes variations d'effort lors de la sortie de l'outil.

Les simulations d'approche sont représentées à la figure ci-dessous. Ainsi, il est possible de mieux visualiser l'outil de coupe pour chacun des essais.

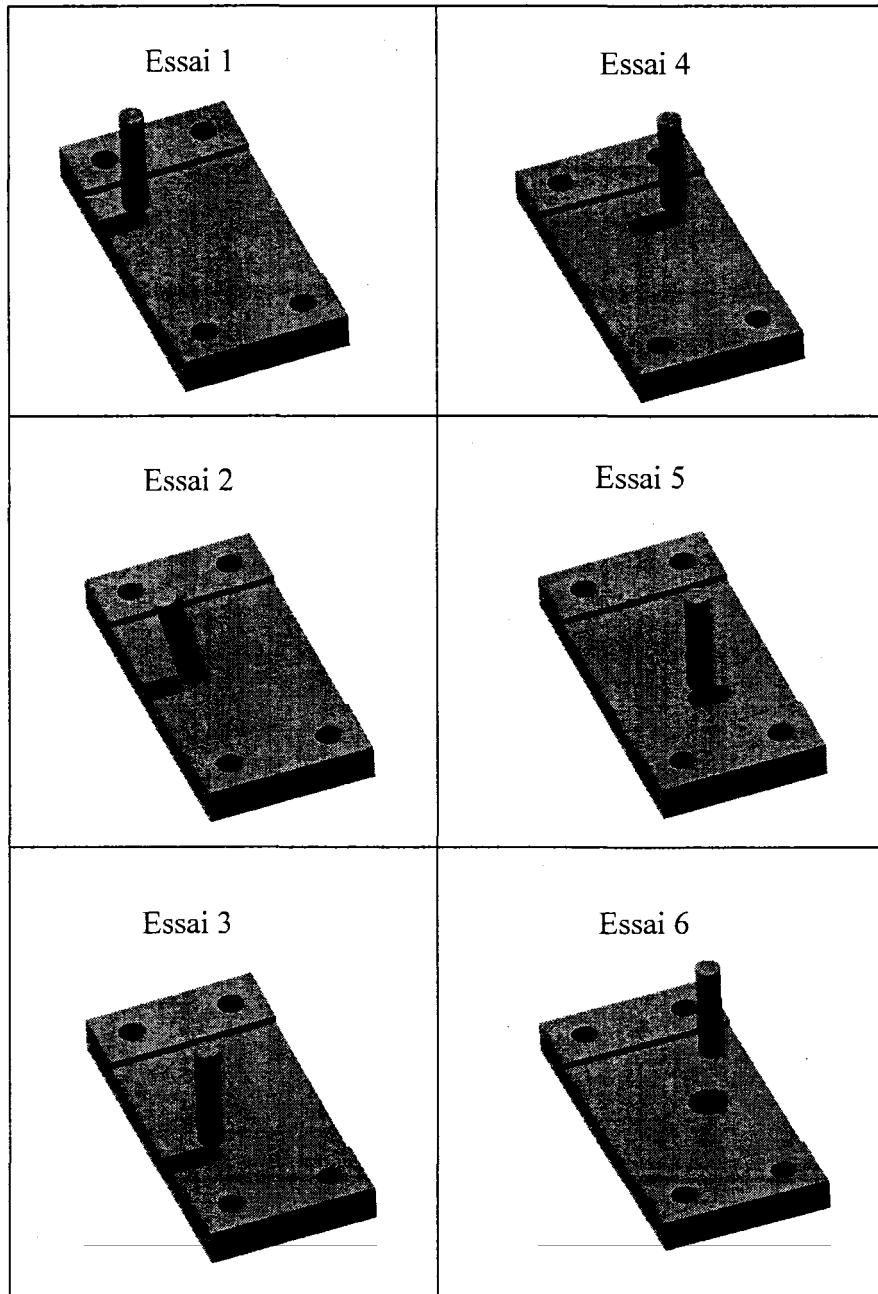


Figure 51 Essais d'approche simulés dans CATIA®

Une des nouveautés proposées par ces expérimentations consiste à exploiter au maximum l'utilisation de tous les axes de la machine. L'essai 2 (Approche normale à la trajectoire) en est un exemple. Quatre axes sont utilisés. La figure 52 montre cette nouvelle tactique d'approche où l'outil reste normal à la trajectoire.

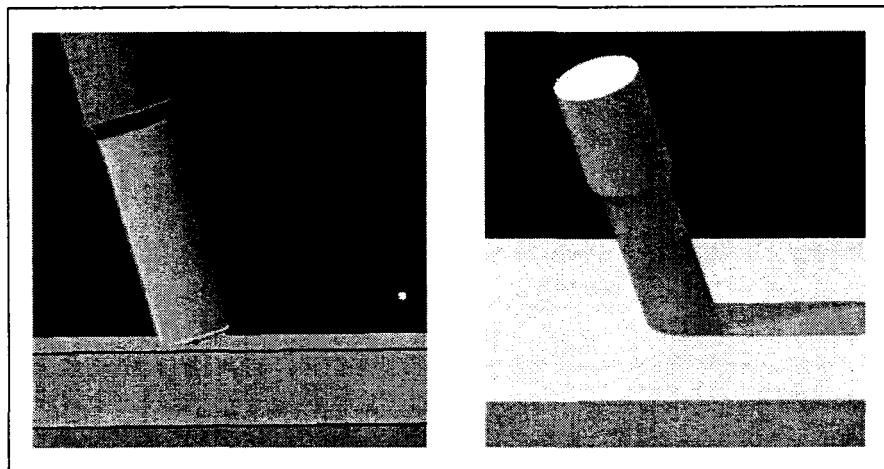


Figure 52 Approche normale à la trajectoire

Avant de procéder aux essais d'usinage sur la MOCN, une estimation des efforts de coupe a été réalisée sur le logiciel CUTPRO 7.0, afin d'éviter tout bris d'équipement. Dans ce logiciel, l'opération d'usinage permettant de faire la meilleure estimation est le rainurage.

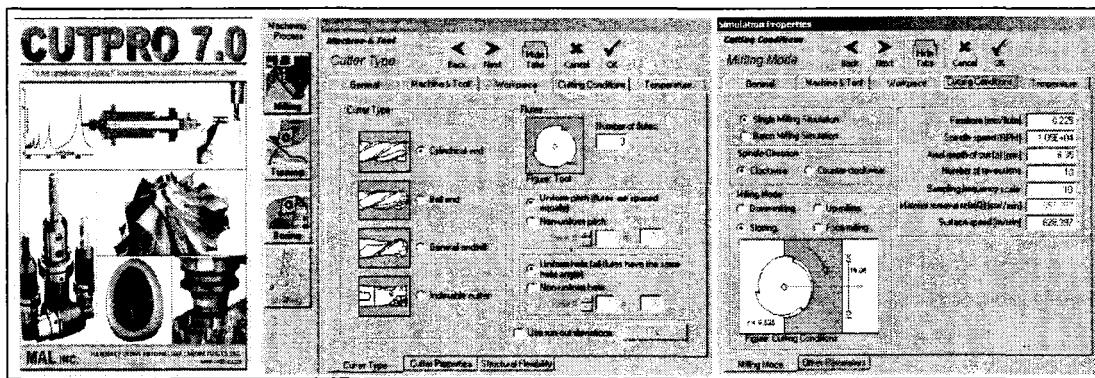


Figure 53 Logiciel CUTPRO 7.0

Une fois tous les paramètres de coupe entrés dans le logiciel, le graphique des efforts de coupe résultant est tracé (figure 54). On note que la force maximale qu'on peut rencontrer est d'environ 1300 N. Cette valeur est acceptable et n'excède pas la capacité de la table dynamométrique (instrument servant à mesurer les efforts de coupe).

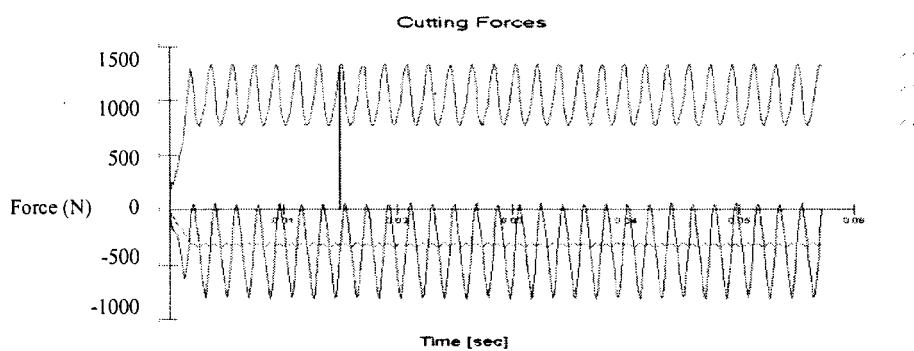


Figure 54 Estimation des efforts de coupe

L'étape qui suit, consiste à procéder à l'usinage des trajectoires d'approche. La figure 55 montre les 6 essais de coupe proposés précédemment.

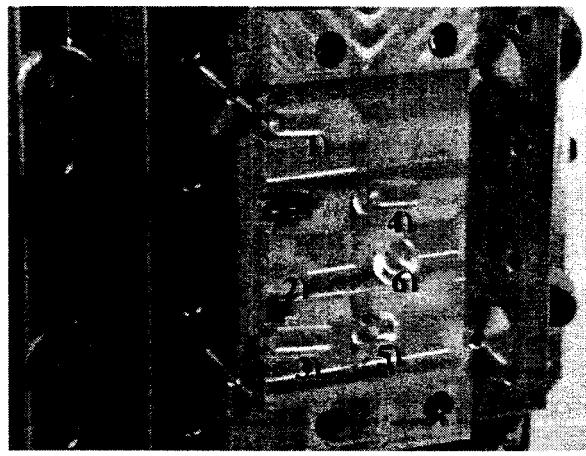


Figure 55 Usinage des essais d'approche

Pour acquérir les signaux d'efforts de coupe des diverses tactiques d'approche, le logiciel LabVIEW7.1 fut utilisé. Ce programme indique les forces d'usinage dans la

direction X, Y et Z. Pour obtenir la force résultante, il suffit d'effectuer une somme vectorielle. Avant d'utiliser la table dynamométrique pour mesurer les forces, il est essentiel d'en effectuer l'étalonnage. Tel qu'illustré sur le troisième graphique de la figure 56, l'ajout d'une masse estimée à 1 Kg sur la table implique l'apparition d'une force constante en Z de 9.81 N, d'où la présence d'un léger plateau.

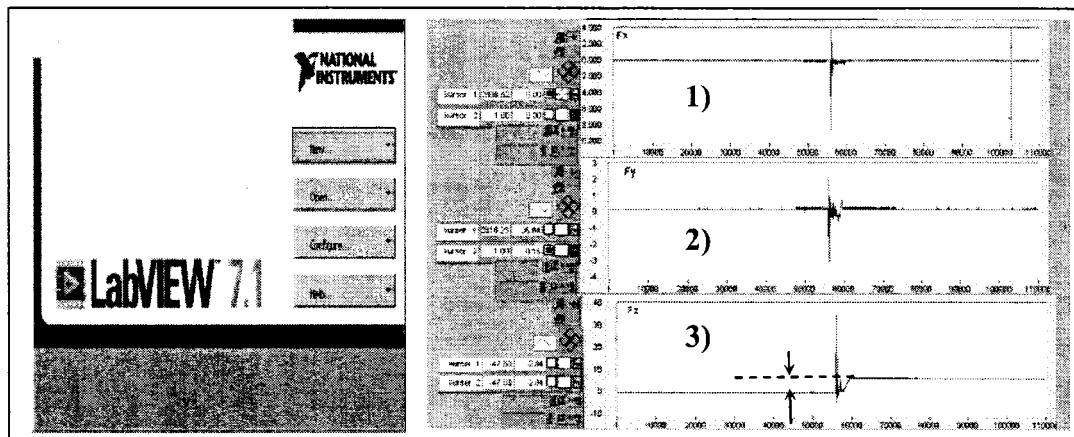


Figure 56 Logiciel LabVIEW 7.1 pour mesurer les efforts de coupe

Une fois la calibration complétée, les efforts de coupe ont été mesurés pour les 6 essais. Le graphique ci-dessous, indique le comportement de la force résultante pour l'essai 1. On remarque qu'il est possible d'obtenir une force maximale de 1118N. Les résultats graphiques des autres essais sont joints à l'annexe 3.

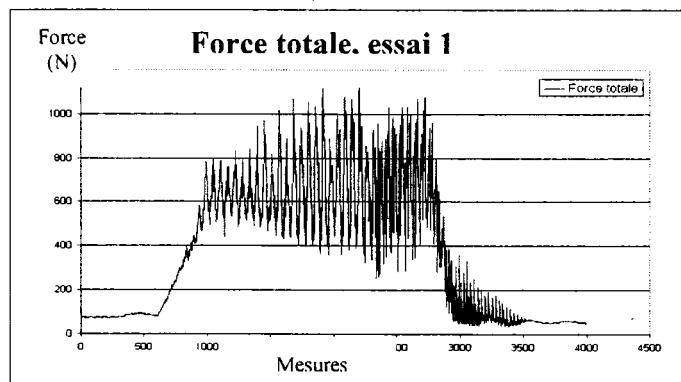


Figure 57 Graphique des efforts de coupe pour l'essai 1

Le tableau X contient les forces maximales enregistrées dans les 3 directions (X, Y et Z) ainsi que la force totale résultante. Ces résultats sont valables pour les 6 essais d'approche qui ont été expérimentés.

Tableau X

Résultats des efforts de coupe en approche

Valeur maximale des forces pour chaque essai				
Essai	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Force totale (N)
Essai 1	886,20	909,40	903,30	1118,86
Essai 2	832,50	1055,00	410,20	1153,66
Essai 3	870,40	1260,00	847,20	1311,81
Essai 4	765,40	1095,00	871,60	1193,29
Essai 5	784,90	1168,00	920,40	1220,17
Essai 6	892,30	985,10	822,80	1057,60

Les efforts de coupe du tableau précédent sont représentés graphiquement à la figure 58. Ce graphique permet d'expliquer le comportement des diverses trajectoires d'approche.

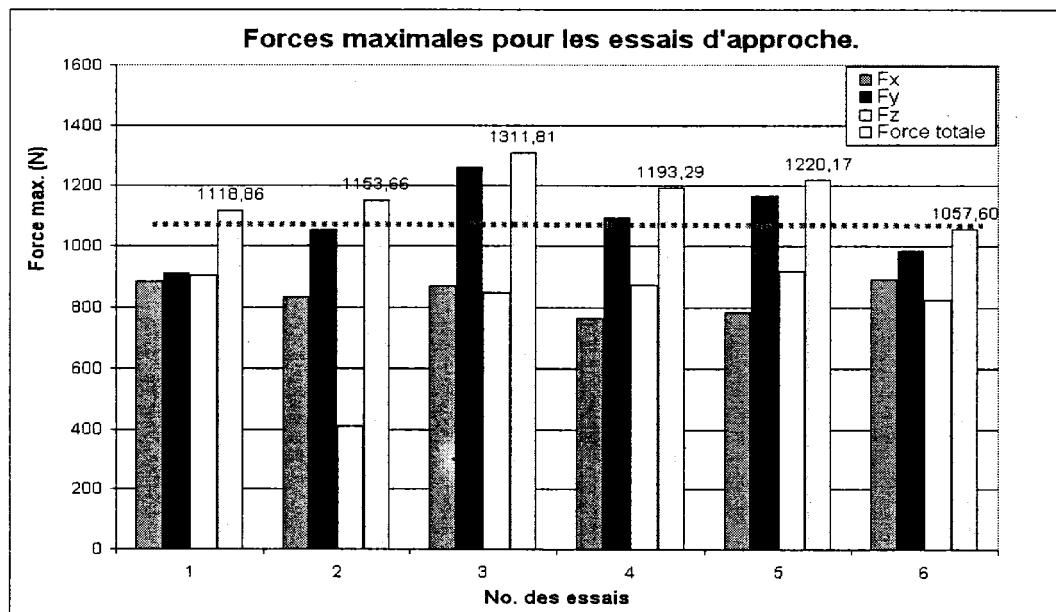


Figure 58 Graphique de comparaison des efforts de coupe

L'essai 1, qui est une approche conventionnelle dans CATIA®, crée une force maximale de 1118 N. L'outil est normal à la pièce. L'essai 3 a été créé pour effectuer une comparaison. L'outil effectue le même type d'approche mais, 0,100po. plus profond. Tel que prévu, l'effort généré sur l'outil est plus prononcé (1311 N), car l'outil s'enfonce plus profondément dans le matériel. En analysant la nouvelle tactique d'approche normale à la trajectoire (essai 2), on remarque sur le graphique que la force résultante maximale est du même ordre de grandeur que la tactique proposée dans CATIA® (essai 1). Cependant, on constate une forte réduction de l'effort de coupe pour l'axe Z. Cet avantage peut être bénéfique pour réduire l'usure à l'extrémité de l'outil (figure 59). En effet, une fraise est conçue pour couper le matériel sur le côté et non en plongée. Une approche normale à la trajectoire exploite le plein potentiel de coupe de ce type d'outil, et peut possiblement en prolonger la durée de vie tout en réduisant l'effort selon l'axe Z.

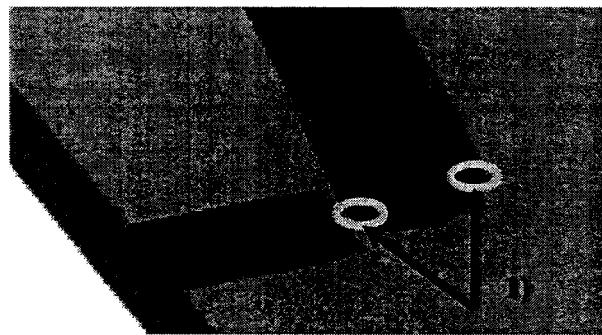


Figure 59 Réduction de l'usure à l'extrémité de l'outil

Contrairement aux essais 1,2 et 3 où l'outil sort de la pièce, les essais 4, 5 et 6 plongent entièrement dans le matériel. Nous comparerons ces trois essais ensemble. La trajectoire 4 est une approche conventionnelle. L'outil est normal à la pièce et pleinement engagé. L'effort qui en résulte est de 1193 (N). Si cette trajectoire est séparée en deux pour faire un zig-zag, cela ne change rien aux efforts de coupe. L'outil subit le même effort comme pour l'essai précédent (1220 N). À une même profondeur de coupe, le nouvel essai expérimental hélicoïdal révèle des résultats intéressants.

L'essai 6 plonge d'une manière plus douce dans le matériel. De plus, la trajectoire de coupe hélicoïdale est conçue de façon à permettre à l'outil de travailler sur 75% de son diamètre. Comme la fraise tourne en rond et plonge en même temps, l'outil est moins sollicité car, 25% de l'outil ne coupe pas. Les caractéristiques de cette trajectoire permettent de réduire l'effort de coupe de 12% et favorise un meilleur dégagement du copeau. En analysant les avantages des nouvelles tactiques d'approche essayées, on conclue donc que l'approche hélicoïdale est plus efficace.

CHAPITRE 3

IMPLANTATION DU PROGRAMME D'USINAGE

Les chapitres précédents ont permis de souligner le potentiel pouvant être offert par les trajectoires spiralées adaptatives. Le présent chapitre fait état de la méthode employée pour implanter cette nouvelle tactique de coupe. Un prototype d'application développé dans CATIA® est également présenté. Ce logiciel de conception et de fabrication, largement utilisé par les industriels, ne possède pas ces nouvelles stratégies de coupe. À cet effet, une macro programmée en langage Visual Basic (VB) permet de faire appel à cette nouvelle fonction et de générer automatiquement une trajectoire spiralee pour l'usinage de pochettes entrant dans la fabrication de composantes d'ailes d'avion.

La méthode de programmation utilisée pour générer une trajectoire spiralée adaptive est basée sur l'approche suivante :

- 1) Procéder au décalage du contour
- 2) Générer la trajectoire de coupe au centre de la pochette (spirale centrale)
- 3) Adapter le reste de la trajectoire de coupe au contour de la pochette
- 4) Calculer l'épaisseur de coupe radiale et la vitesse d'avance

3.1 Décalage du contour

La première étape du procesus de programmation consiste à procéder au décalage du contour. Ce décalage constitue la dernière passe d'usinage du parcours de l'outil. Les calculs nécessaires pour décaler la géométrie s'effectuent en fonction du diamètre de l'outil et de la surépaisseur s'il y a une passe de finition.

L'application du produit vectoriel est effectuée pour déterminer le vecteur directeur nécessaire au décalage de la géométrie.

$$\text{Produit vectoriel : } a \wedge b = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_i & a_j & a_k \\ b_i & b_j & b_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_j & a_k \\ b_j & b_k \end{vmatrix} \cdot i - \begin{vmatrix} a_i & a_k \\ b_i & b_k \end{vmatrix} \cdot j + \begin{vmatrix} a_i & a_j \\ b_i & b_j \end{vmatrix} \cdot k \quad (3.1)$$

avec : a_i : valeur scalaire du vecteur "a" selon l'axe X
 b_i : valeur scalaire du vecteur "b" selon l'axe X

Étant donné que tous les calculs s'effectuent dans le plan et qu'un des vecteurs est le vecteur normal au plan $b = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, il est possible de réduire le produit vectoriel pour déterminer le vecteur directeur afin de décaler la géométrie. Il en résulte que :

$$a \wedge b = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_i & a_j & a_k \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_j & a_k \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot i - \begin{vmatrix} a_i & a_k \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot j + \begin{vmatrix} a_i & a_j \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot k = a_j \cdot i - a_i \cdot j \quad (3.2)$$

Si une ligne est décalée vers l'intérieur (ligne P1-P2), telle qu'illustrée à la figure 60, le produit vectoriel entre le vecteur P1-P2 et l'axe Z permet de générer le vecteur directeur, et ainsi de décaler la géométrie pour créer la ligne P1'-P2'.

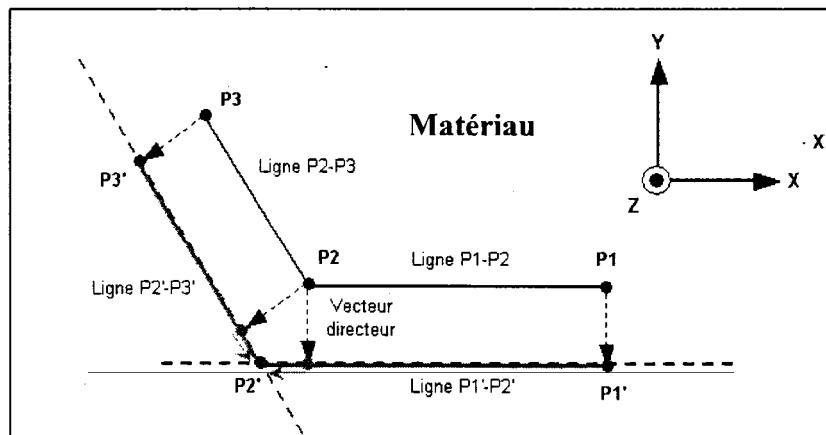


Figure 60 Décalage de 2 droites et calcul du nouveau point d'intersection

Par la suite, la ligne suivante est décalée de façon similaire et un nouveau point d'intersection (P_2') est calculé. Pour une géométrie constituée d'un arc de cercle, le vecteur directeur est représenté par le rayon de l'arc de cercle. Ainsi, les points délimitant cet élément sont décalés dans la même direction que le rayon. La figure 61 schématisé le décalage vers l'intérieur d'un arc de cercle.

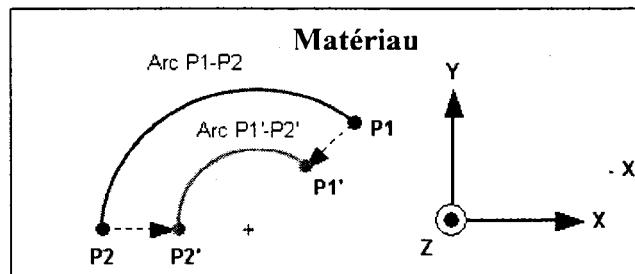


Figure 61 Décalage vers l'intérieur d'un arc de cercle

Le concept est le même pour le décalage vers l'extérieur d'un arc de cercle.

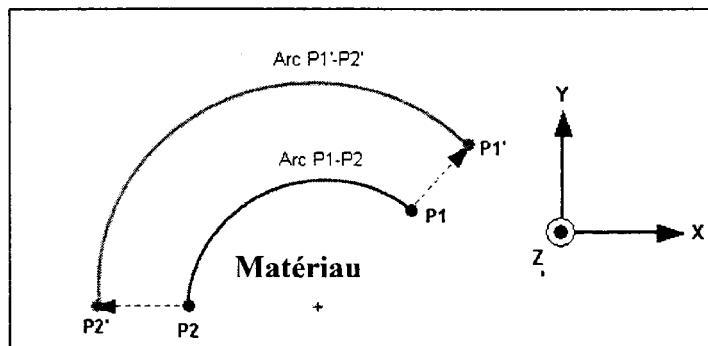


Figure 62 Décalage vers l'extérieur d'un arc de cercle

Certaines mesures doivent être prises en considération lors du décalage de la géométrie. Dépendamment du rayon de courbure dans les coins d'une pochette, si le décalage est plus petit que les rayons en coin, il n'y aura pas de chevauchement et par conséquent, il n'y aura pas de perte d'élément dans la dernière passe entrant dans la géométrie du parcours d'outil. En d'autres termes, si le diamètre de l'outil est plus petit que les rayons en coin, il y aura toujours une trajectoire représentant un petit arc de cercle dans

les coins. La figure 63 représente cette situation lorsque le diamètre de l'outil est plus petit que le rayon en coin. Il n'y a pas de perte d'élément et une trajectoire circulaire (Arc P_{2'}-P_{3'}) est toujours présente.

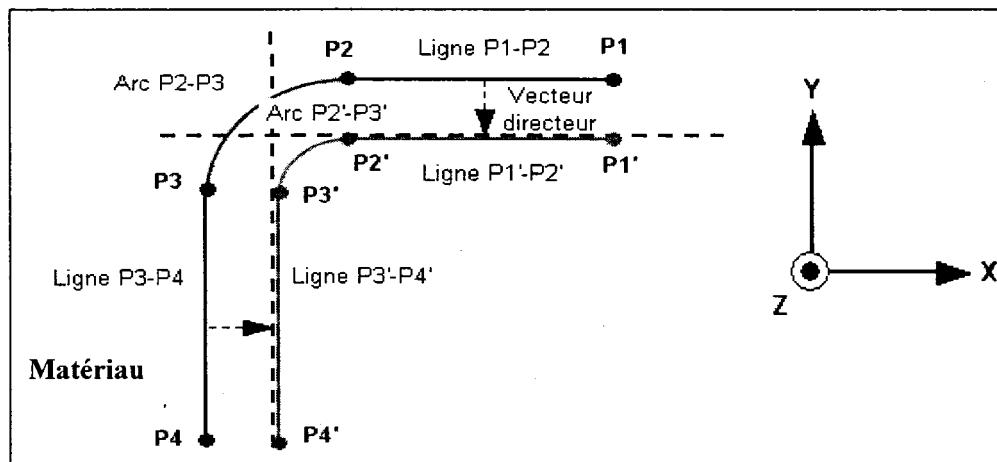


Figure 63 Décalage sans perte d'élément

La situation inverse peut se présenter. Lorsque le diamètre de l'outil, additionné à une surépaisseur de coupe pour effectuer une finition, est supérieur au rayon en coin, il en résulte l'élimination de l'arc de cercle et il doit y avoir un calcul d'intersection entre 2 droites, comme l'illustre la figure 64.

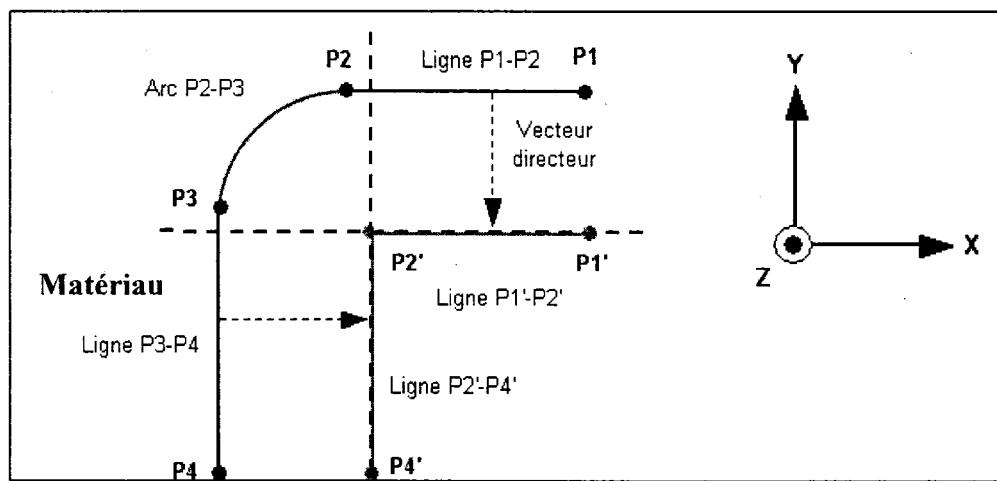


Figure 64 Élimination d'un arc de cercle et intersection de 2 droites

Le chevauchement de la ligne P1'-P2' et P2'-P4' a nécessité de recalculer un nouveau point d'intersection P2', relimitant le parcours d'outil et ainsi permettre d'éliminer l'arc de cercle P2-P3.

Lorsque le décalage est trop grand, le vecteur directeur est supérieur ou égal au rayon en coin et l'arc de cercle P1'-P2' ne peut être généré (figure 65). Il en résulte l'élimination de cet élément.

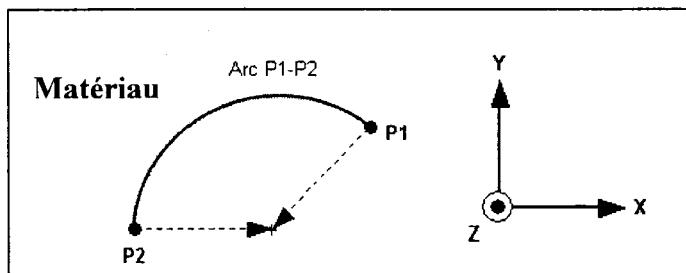


Figure 65 Décalage vers l'intérieur et élimination d'un arc de cercle

Le même comportement est représenté à la figure qui suit. Cette fois-ci, pour l'intersection d'un arc de cercle (P1'-P2') et d'une droite (P2'-P4').

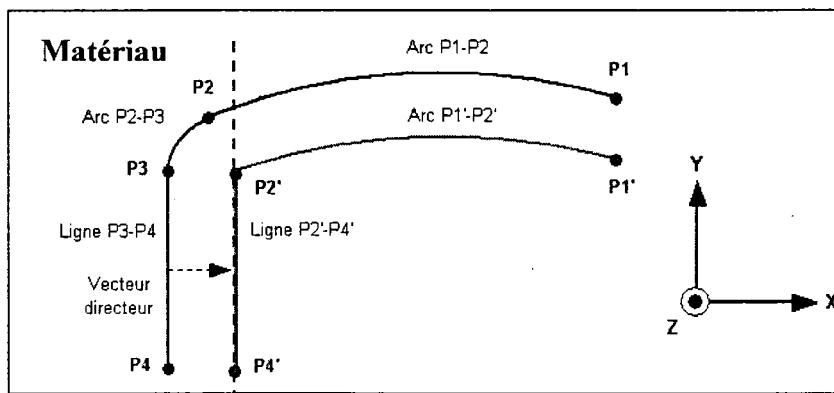


Figure 66 Élimination d'un arc de cercle et calcul d'intersection

Dépendamment de la géométrie de la pochette et de la valeur du décalage, le programme calcule et redéfinit les éléments géométriques entrant dans la génération du

parcours d'outil final définissant le contour. Ces calculs font référence aux équations bien connues des droites et des cercles. Celles-ci permettent de décrire adéquatement l'ensemble des géométries de pochettes rencontrées. Les équations, utilisées pour calculer les intersections d'éléments linéaires et circulaires, sont brièvement rappelées à titre indicatif aux paragraphes ci-dessous.

$$\text{Équation d'une droite : } y = m \cdot x + b \quad \text{où} \quad m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3.3)$$

m = Pente d'une droite

b = valeur de y lorsque $x = 0$

$$\text{Équation d'un élément circulaire : } (x - h)^2 + (y - k)^2 = R^2 \quad (3.4)$$

h = Centre de l'élément circulaire en X

k = Centre de l'élément circulaire en Y

Afin de valider si la première étape de programmation permet le bon fonctionnement du décalage de la géométrie, plusieurs contours de pochettes de formes variables ont subi 2 types de décalage : un décalage plus petit que la valeur du rayon en coin (rayon d'outil) et un décalage plus grand que le rayon en coin.

Cette simulation permet de comparer quand il est nécessaire d'éliminer des éléments géométriques pour générer la dernière passe d'usinage épousant le contour de la pochette. La page qui suit, fait état des résultats obtenus relatifs au décalage de plusieurs formes de pochettes. Les fichiers de données utilisés se retrouvent à l'annexe 4.

Exemple des résultats de décalage sur diverses géométries :

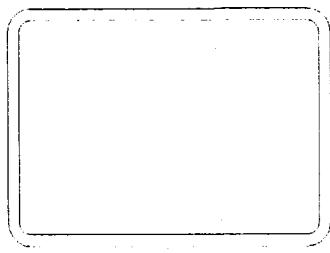
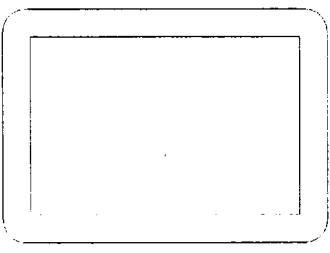
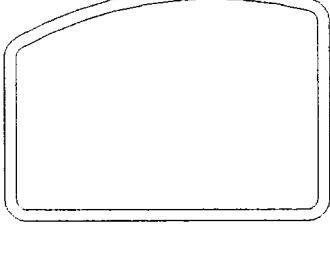
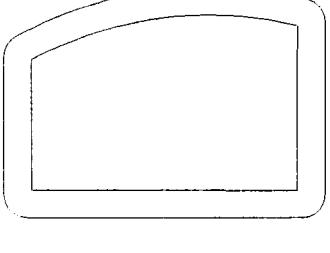
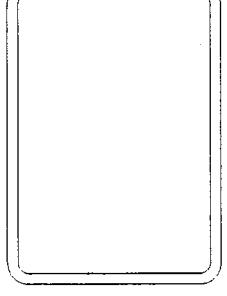
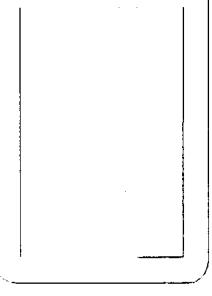
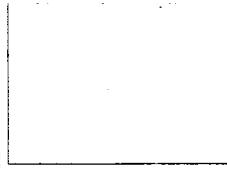
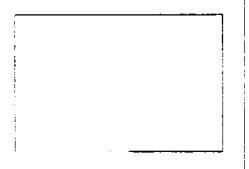
<p><u>A) Si le décalage est plus petit que les rayons en coin ou le rayon de l'outil :</u> (Pas de chevauchement en coin)</p>	<p><u>B) Si le décalage est plus grand que le rayon de l'outil :</u> (Élimination d'éléments géométriques)</p>
<p>Décalage : A1</p> 	<p>Décalage : B1</p> 
<p>Décalage : A2</p> 	<p>Décalage : B2</p> 
<p>Décalage : A3</p> 	<p>Décalage : B3</p> 
<p>Décalage : A4</p> 	<p>Décalage : B4</p> 

Figure 67 Exemple des résultats de décalage sur diverses géométries

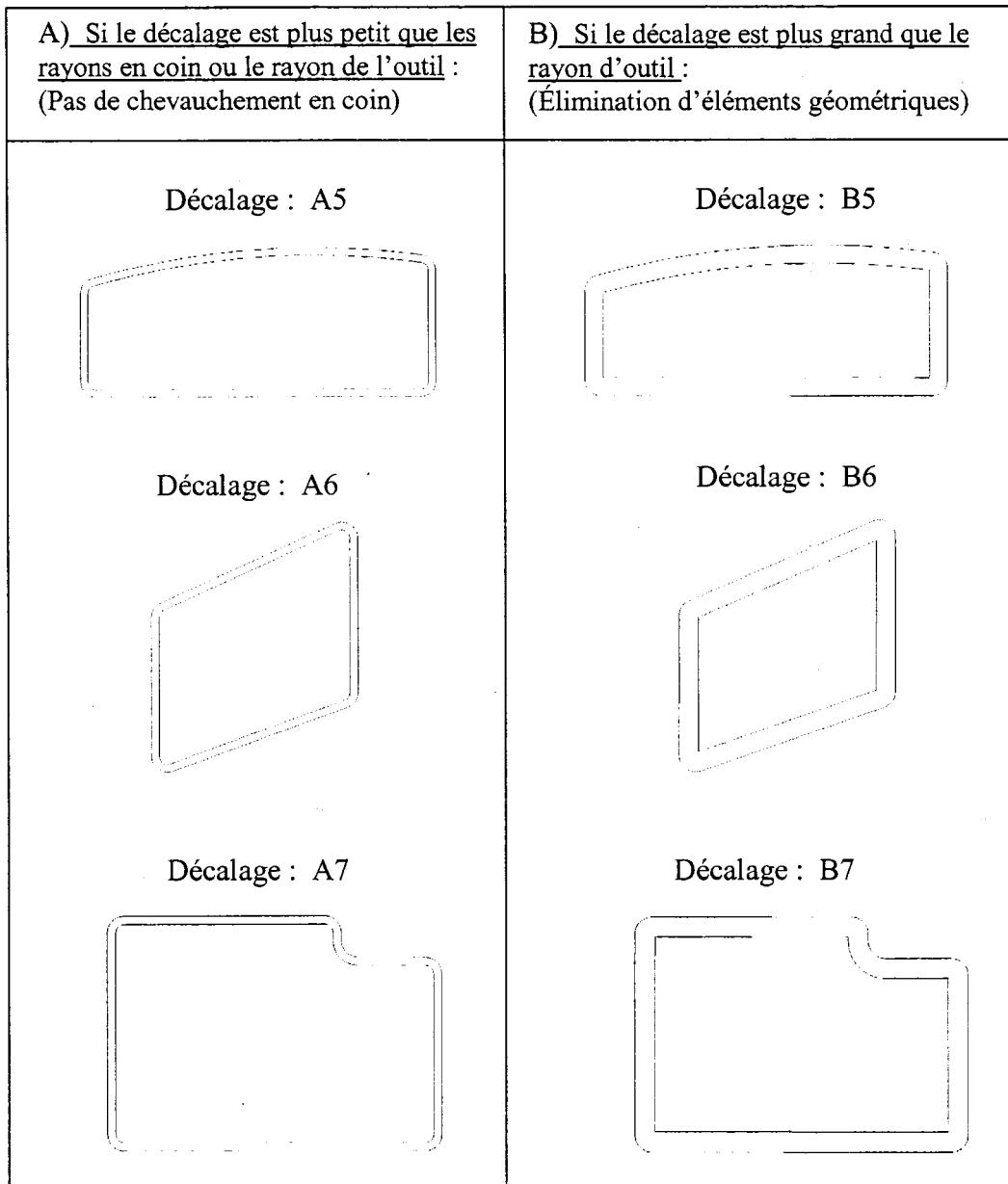


Figure 68 Autres exemples de décalage sur diverses géométries

Comme il est possible de remarquer aux figures 67 et 68, dépendamment du rayon en coin et de la valeur du décalage, la trajectoire finale peut nécessiter un calcul pour redéfinir la géométrie de la dernière passe d'usinage. Cette dernière passe est définie par une très grande quantité de points. Ceux-ci sont interprétés comme des points de

contrôle par lesquels passera une courbe polynomiale permettant de créer la trajectoire finale d'usinage. Quelques exemples de la répartition des points sont illustrés à la figure 69 et indiquent les points de contrôle du parcours de l'outil.

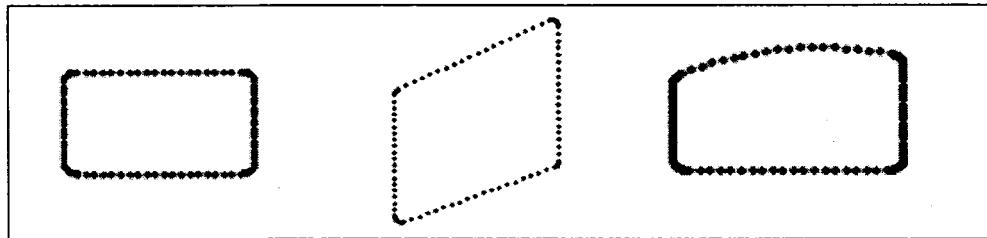


Figure 69 Dernière passe avec plus de points de contrôle

La section 3.1 a permis de définir la géométrie décalée grâce à laquelle l'outil de coupe pourra reproduire le contour de la pochette. Dans la section qui suit, il sera question de la génération du parcours d'outil spiralé au centre de la pochette.

3.2 Générer la trajectoire de coupe au centre de la pochette

La seconde étape, entrant dans la programmation de la routine VB, a pour objectif de créer le parcours d'outil spiralé du centre de la pochette. Le programme détermine les coordonnées du centre géométrique de la pochette et effectue une translation et une rotation si nécessaire, au centre (0,0) du système cartésien, dans le but de simplifier tous les calculs. Les transformations géométriques sont exprimées dans le plan (2 dimensions) et sont régies par les systèmes matriciels suivants :

$$\text{Translation : } T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Rotation : } R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Comme il n'est pas possible d'effectuer des calculs matriciels en VB, ceux-ci ont été répartis en système d'équations applicables à des manipulations dans le plan de travail.

Les calculs de translation s'effectuent selon la convention suivante :

$$\text{Translation : } \begin{bmatrix} P' \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ T_x \\ T_y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

P = Coordonnées du point P

P' = Coordonnées du point P translaté

T = Valeur de la translation en X et Y

Pour la rotation, en utilisant la matrice de rotation, la valeur de X' et Y' se calcule de la manière suivante lorsqu'on effectue un produit croisé :

$$\text{Rotation : } \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cdot \cos(\theta) - y \cdot \sin(\theta) \\ x \cdot \sin(\theta) + y \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

x' = Valeur en X d'un point ayant subi une rotation

y' = Valeur en Y d'un point ayant subi une rotation

θ = Angle de rotation

Une fois la géométrie positionnée au centre cartésien $(0,0)$, la spirale centrale est créée. Cette spirale centrale, représentant le début de la trajectoire, est caractérisée selon le paramètre “ ϕ ” tel que mentionné à la section 2.4. Ce paramètre régit l'envergure de la spirale centrale en fonction de la largeur de la pochette. En se basant sur les essais expérimentaux antérieurs, le programme utilise une transition spiralée fixée à 50%.

A cet effet, la programmation réalisée dans VB permet de générer un début de parcours d'usinage en forme circulaire, si la pochette est de géométrie carrée. Si elle est de géométrie rectangulaire, la programmation agit de façon similaire et étire le début circulaire pour lui donner une forme davantage ovale. La figure 70 représente cette façon de faire pour les pochettes s'apparentant à des géométries rectangulaires.

La figure 70 représente le début de l'usinage, dépendamment de divers paramètres de coupe tels que : le diamètre de l'outil et l'épaisseur de coupe radiale. Uniquement à titre indicatif, la transition circulaire a aussi été comparée.

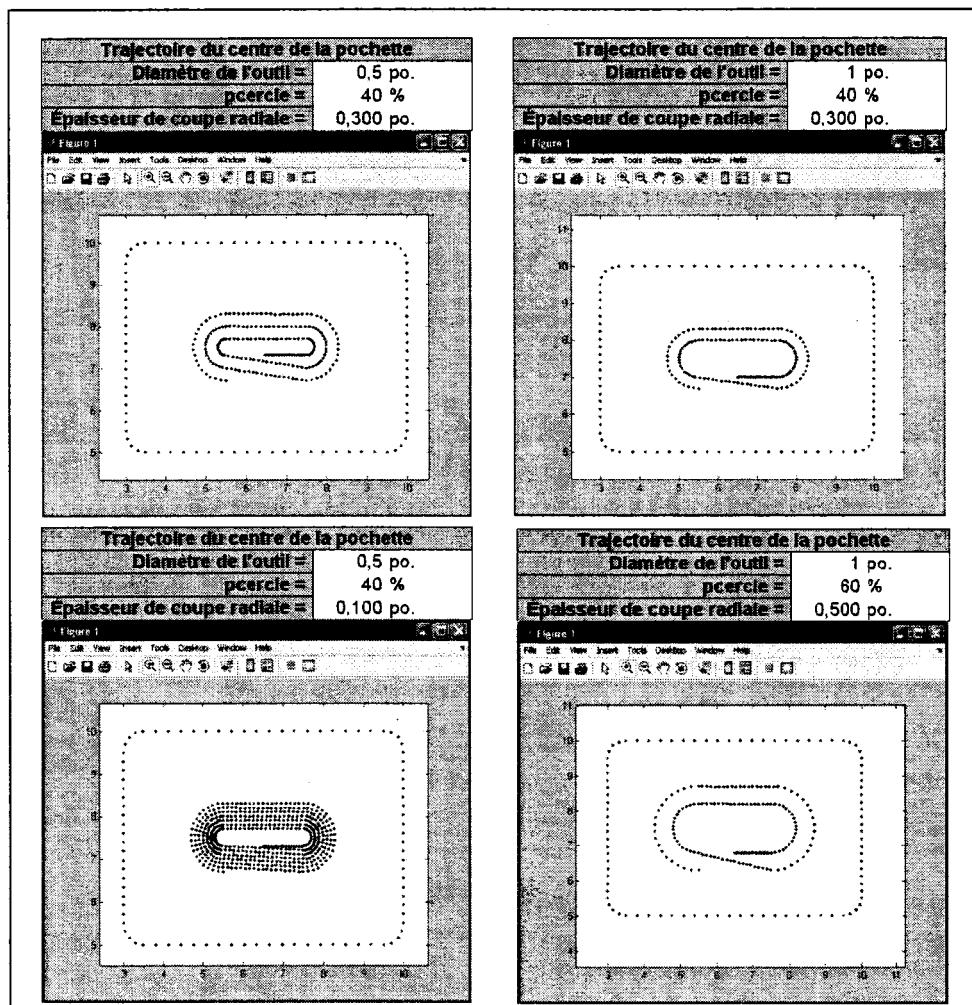


Figure 70 Trajettoire de coupe au centre de la pochette

Grâce à cette figure, il est possible de vérifier le fonctionnement adéquat du programme d'usinage. Pour un diamètre d'outil similaire, si l'épaisseur de coupe radiale diminue, le nombre de passes augmente proportionnellement et, lorsque l'outil est plus gros, le premier tour de la trajectoire est plus grand. D'autres exemples sont représentés à la

figure 71. La trajectoire de coupe au centre de la pochette y est générée pour des contours différents. La programmation fait intervenir les mêmes principes.

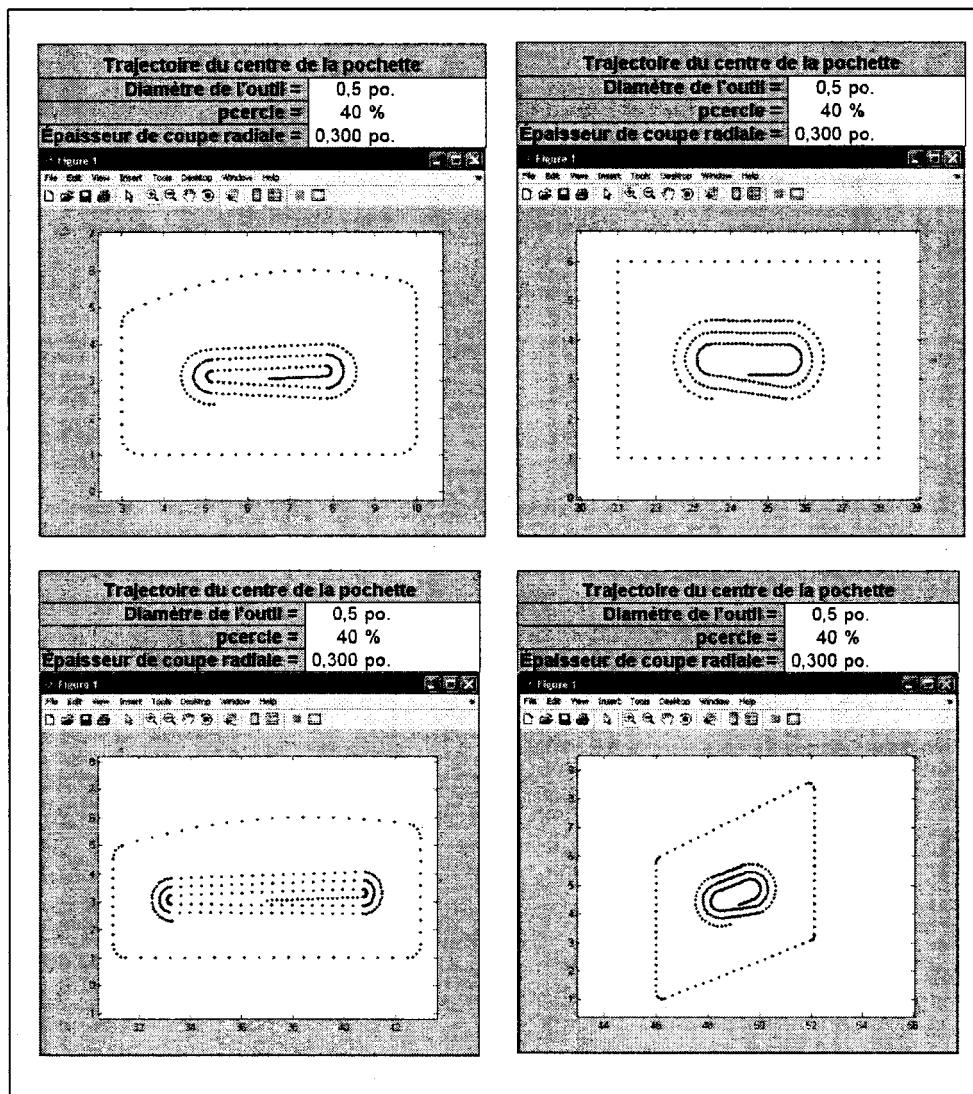


Figure 71 Trajectoire de coupe centrale pour d'autres pochettes

La section qui suit a pour but de générer le reste des points de contrôle en débutant de la spirale centrale vers le contour géométrique de la dernière passe d'usinage discuté à la section 3.1.

3.3 Adapter le reste de la trajectoire de coupe au contour de la pochette

Suite à la création de la spirale centrale, le reste de la trajectoire est générée grâce à une méthode d'inspection consistant à balayer sur 360° tout le contour de la géométrie constituant la passe finale (section 3.1). Étant donné que le centre de la pochette a initialement été translaté à la position $(0,0)$ du système de coordonnée, une ligne fictive partant de $(0,0)$ et reliant la dernière passe de la spirale centrale au contour de la passe finale permet de répartir des points de contrôle. Ainsi, pour tous les points décrivant le contour géométrique, il est possible de compléter le parcours d'outil. La figure 72 schématise cette méthode.

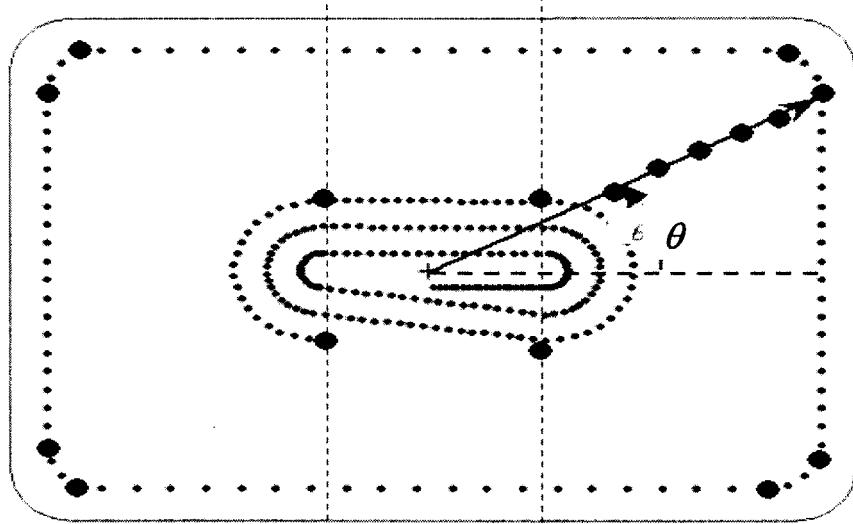


Figure 72 Inspecter le contour et répartir des points de contrôle

Une fois tous les points créés, le programme retire une certaine quantité de points répartis dans les coins. Cette façon de faire permet un meilleur lissage du polynôme passant par les points de contrôle pour décrire la trajectoire. Par conséquent, il est possible de réduire les changements de direction brusques dans les coins de la pochette.

Par la suite, l'étape finale a pour objectif de réordonner les points venant d'être créés et de les assembler correctement afin de décrire la trajectoire. La technique d'enlèvement

et de réorganisation des points de contrôle est représentée à la figure 73 qui suit. Sur cette figure deux cas de géométries sont illustrés : une pochette rectangulaire et une autre avec une géométrie courbée sur le dessus. Dans ces 2 exemples, il est possible de remarquer le retrait d'une certaine quantité de points de contrôle dans les coins, afin d'adoucir la trajectoire lorsque la courbe polynomiale servant à décrire la trajectoire sera générée.

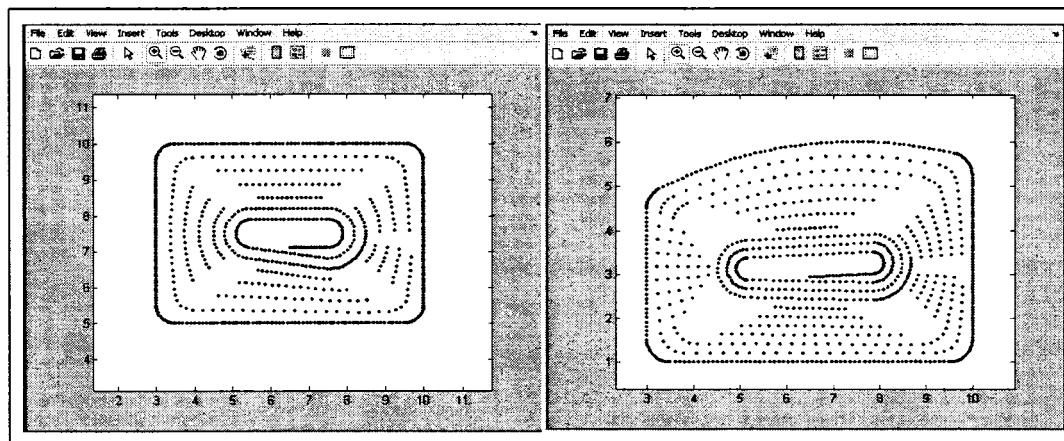


Figure 73 Enlèvement de points de contrôle dans les coins

La figure 74 compare le phénomène inverse lorsqu'il n'y a pas de points retirés dans les coins de la géométrie. À la droite de cette figure, il est possible de constater que le parcours d'outil est plus abrupt dans les coins de la pochette.

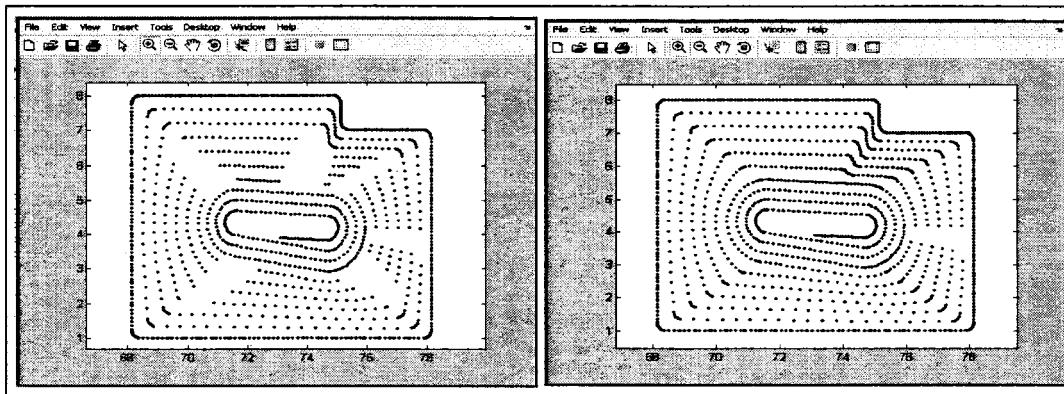


Figure 74 Comparaison sans enlèvement de points

L'enlèvement de points de contrôle dans les coins permet donc la création d'un parcours d'outil plus doux et favorise, par conséquent, une vitesse de coupe plus constante.

3.4 Calcul de l'épaisseur de coupe radiale et de la vitesse d'avance

Une fois la trajectoire générée, le programme calcule l'épaisseur de coupe radiale. Comme le parcours d'outil ressemble à une spirale adaptative, l'épaisseur de coupe ne peut pas être toujours constante. La méthode pour déterminer l'épaisseur consiste à mesurer la distance qui sépare un point de contrôle à un autre situé parallèlement sur la passe suivante de la trajectoire. En utilisant l'équation des triangles rectangles, l'épaisseur de coupe est calculée.

$$\text{Calcul de l'épaisseur :} \quad L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (3.8)$$

L = Épaisseur de coupe radiale

Δx = Variation dans la direction X

Δy = Variation dans la direction Y

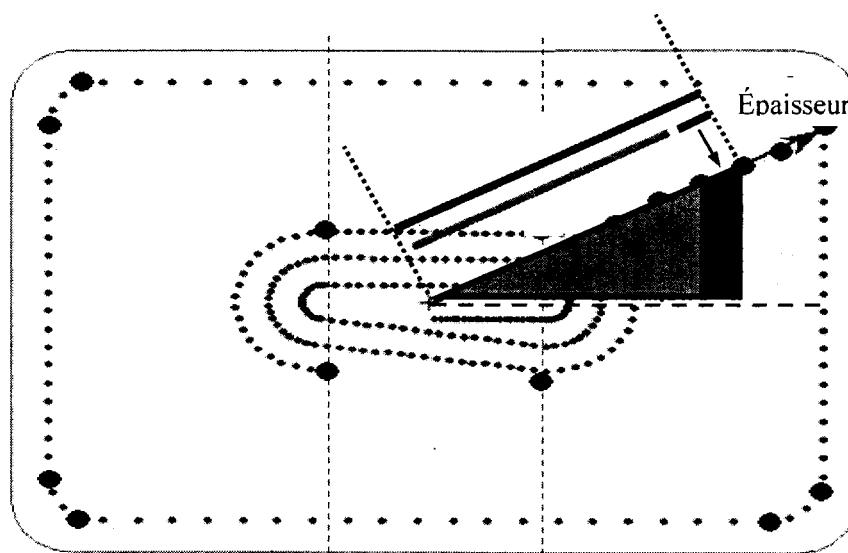


Figure 75 Mesure de l'épaisseur par la méthode des triangles rectangles

La plupart des programmes de fabrication, tel que CATIA[®], proposent de ralentir la vitesse d'avance dans les coins d'une pochette. Cette fonctionnalité est communément appelée le "slowdown". Celle-ci permet d'éviter le bourrage de l'outil lorsqu'il arrive dans les coins. Comme l'outil est presque entièrement engagé dans le matériel, la réduction de la vitesse d'avance favorise un meilleur dégagement du copeau et permet un usinage plus stable. Par conséquent, la routine VB peut prendre aussi en considération une modification de la vitesse d'avance durant l'usinage, étant donné que l'épaisseur de coupe peut varier.

Une fois l'épaisseur calculée pour l'ensemble de la trajectoire, le programme détermine la correction de la vitesse d'avance. En spécifiant la vitesse d'avance et la valeur du "slowdown", une équation linéaire permet de calculer la correction de l'avance. Pour l'épaisseur de coupe spécifiée, la vitesse d'avance est pleinement appliquée. Pour une épaisseur de coupe maximale, la valeur réduite de l'avance est active à cet endroit sur la trajectoire. Par conséquent, l'avance est calculée de façon linéaire pour les épaisseurs de coupe radiales comprises entre l'épaisseur spécifiée et l'épaisseur maximale (figure 76).

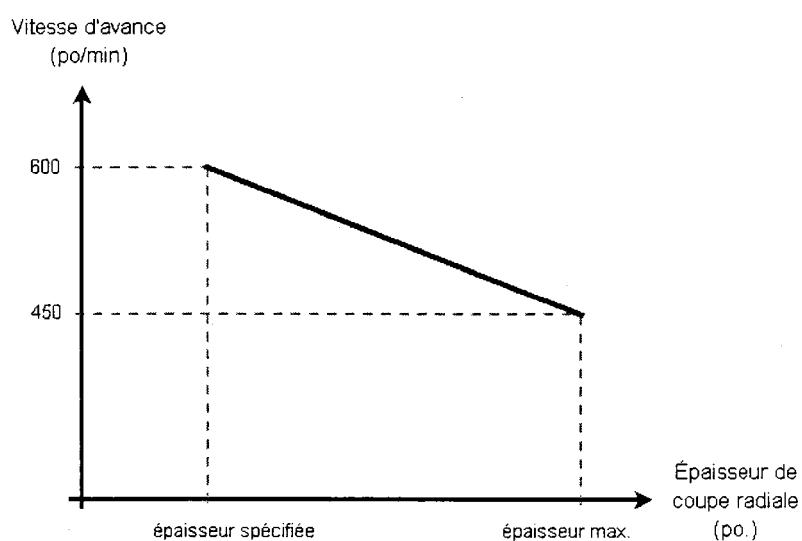


Figure 76 Calcul de la vitesse d'avance

La figure 77 représente la vitesse d'avance corrigée en fonction de l'épaisseur de coupe, pour une pochette rectangulaire dont l'avance est spécifiée à 600 po/min avec un "slowdown" de 75%.

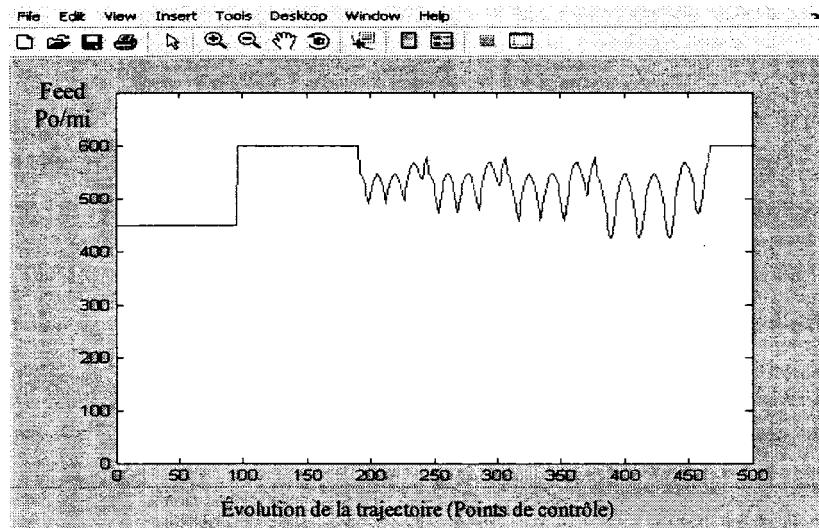


Figure 77 Variation de la vitesse d'avance

La première passe d'usinage (1^{er} tour) s'effectue à vitesse réduite de 450 po/min. L'outil débute en mode de rainurage. Il en résulte que le ralentissement est pleinement appliqué ($75\% * 600\text{po/min} = 450 \text{ po/min}$). Ensuite, la spirale centrale est régie par une épaisseur de coupe constante avec une vitesse d'avance de 600 po/min. Le restant de la trajectoire qui doit s'adapter au contour de la géométrie possède une épaisseur de coupe variable dont la vitesse changera en fonction de celle-ci. Géométriquement, une pochette rectangulaire possède quatre coins où l'épaisseur de coupe est maximale. La figure précédente en est affectée car, on peut remarquer la présence d'ondulation dans le tracé de la vitesse d'avance en fonction de la trajectoire.

La description de l'algorithme employée pour générer les trajectoires spiralées adaptatives est expliquée à la section qui suit. Cette section met davantage l'accent sur

les étapes suivies dans le programme Visual Basic pour procéder à la génération des trajets.

3.5 Description de l'algorithme pour générer les trajectoires

L'algorithme est basé sur la procédure décrite aux sections précédentes (3.1 à 3.4). Afin de générer les trajectoires, le programme effectue premièrement l'initialisation des variables et l'initialisation de la matrice des points de contrôle. La suite de la programmation comprend la définition d'une fenêtre V.B.. Cette interface utilisateur permet d'entrer les paramètres de coupe et la géométrie de la pochette.

L'algorithme sauvegarde les paramètres dans les variables précédemment définies. La prochaine étape consiste à calculer le nombre de passes axiales à effectuer pour usiner la pièce.

Une fois le début du programme exécuté, l'algorithme doit effectuer quatre modules. Le module 1 consiste à décaler la géométrie de la pochette. Celle-ci représente la dernière passe d'usinage définissant le contour de la pochette. Ce module appelle la fonction offset. Cette fonction calcule les vecteurs directeurs permettant de décaler le contour et de redéfinir la nouvelle géométrie de la cavité, en fonction de l'outil et de l'épaisseur à laisser pour la finition. Ce premier module génère la matrice des points définissant le contour final.

L'algorithme poursuit en effectuant le module 2 qui calcule les points de contrôle décrivant la trajectoire de coupe, c'est-à-dire la spirale centrale et le reste de la trajectoire s'adaptant au contour. Ce module appelle la fonction spirale dont le but est de trouver le centre de la pochette et de translater celle-ci au centre du système de coordonnée (0,0) pour faciliter les calculs. Une fois cette étape effectuée, la fonction

slotting est utilisée pour générer les points de contrôle décrivant la spirale centrale qui est définie en fonction du paramètre C% fixé à 50%, tel que déterminé par les essais expérimentaux. Les points de contrôle sont enregistrés dans une matrice à cet effet. Le module 2 se poursuit par l'appel de la fonction adapt dont le but est d'adapter le reste de la trajectoire au contour de la géométrie. Cette fonction sauvegarde les points de contrôle décrivant le reste de la trajectoire dans une autre matrice. Une fois cette fonction complétée, ce module assemble les points de contrôle de la matrice décrivant la spirale centrale et le reste de l'adaptation de la trajectoire. Une certaine quantité de points est enlevée dans les coins. Les points de contrôle sont remis correctement en ordre dans la matrice du parcours d'outil. Le module se termine par la translation des points de contrôle à l'endroit où se trouve la pochette. La correction de la vitesse d'avance est également calculée en fonction de l'épaisseur de coupe.

Le module 3 de l'algorithme génère la trajectoire de coupe dans Catia. Le programme crée un plan de travail et utilise la matrice des points de contrôle construite au module 2, pour tracer la trajectoire.

Le dernier module de l'algorithme (module 4) génère l'approche d'entrée dans la matière sélectionnée au départ par l'utilisateur. Dépendamment de celle-ci, la fonction rampe ou la fonction hélice sera utilisée par le programme V.B. pour tracer l'approche.

Le programme emploie cette procédure pour générer les trajectoires. Il est possible de visualiser le parcours d'outil dans le fichier Catia. Une représentation schématique de l'algorithme est illustrée à la page suivante.

Début du programme :

- Initialisation des variables et de la matrice [] des points de contrôle.
- Programmation d'une fenêtre V.B. pour entrer les paramètres de coupe et la géométrie.
- Sauvegarde des paramètres dans les variables assignées.
- Calcul du nombre de passes axiales en Z.

Module 1 : Décalage de la géométrie décrivant la pochette :

- Appel de la fonction offset. (Crée la dernière passe d'usinage)
- Redéfinir le contour en fonction de l'outil et du offset.
(Calcul du vecteur directeur)
- Génération de la matrice [] des points décrivant le contour.

Module 2 : Calcul des points de contrôle décrivant la trajectoire :

- Appel de la fonction spirale.
- Trouver le centre de la pochette.
- Translation au centre du système de coordonnée (0,0).
 - Appel de la fonction slotting.
 - Génère la spirale centrale en fonction du paramètre C% fixé à 50%.
 - La matrice [] des points de contrôle de la spirale centrale est créée.
 - Appel de la fonction adapt.
 - Les points de contrôle décrivant l'adaptation du reste de la trajectoire sont calculés et transcrits dans une matrice à cet effet [].
- Assemblage de la matrice des points décrivant la spirale centrale et de l'adaptation de la trajectoire.
- Enlèvement de points de contrôle dans les coins.
- Réordonner les points à l'aide d'un compteur.
- Translater les points à l'endroit où se trouve la pochette.
- Calcul de la correction sur la vitesse d'avance.

Module 3: Génération de la trajectoire dans Catia :

- Création d'un plan de travail dans Catia.
- Utilisation de la matrice des points de contrôle pour tracer la trajectoire.

Module 4: Création de l'approche dans le matériel :

- Appel d'une fonction pour ajouter une approche dans le matériel.
 - Fonction rampe.
 - Fonction hélice.
- -Tracé de la trajectoire d'approche.
- Fin du programme.

La section qui suit, présente des exemples d'application faisant appel à l'utilisation de la macro Visual Basic, relatif à la génération de trajectoires spiralées adaptatives pour diverses géométries de pochettes.

3.6 Exemple d'application de spirales adaptatives dans CATIA®

Le premier exemple permet de visualiser le bon fonctionnement du programme dans tous les cadres du système de coordonnée, pour une pochette rectangulaire. Peu importe la valeur positive ou négative des coordonnées, la pochette est positionnée au bon endroit sur la pièce.

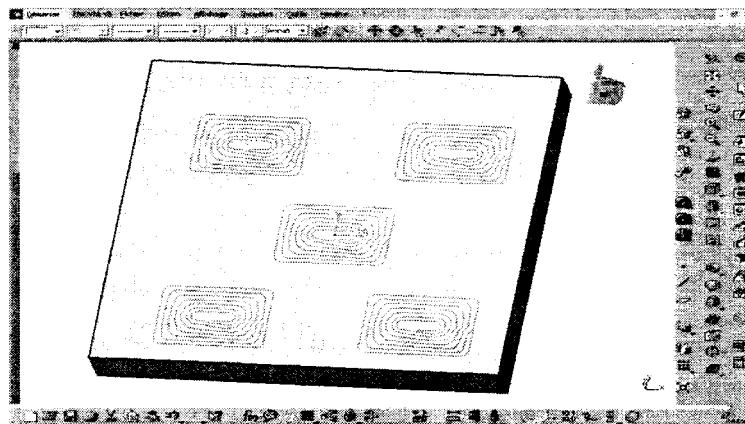


Figure 78 Trajectoires de coupe de pochettes rectangulaires dans CATIA®

La figure 79 affiche l'usinage virtuel. Pour la pochette centrale, on remarque que le début de l'usinage s'effectue selon une spirale adaptative.

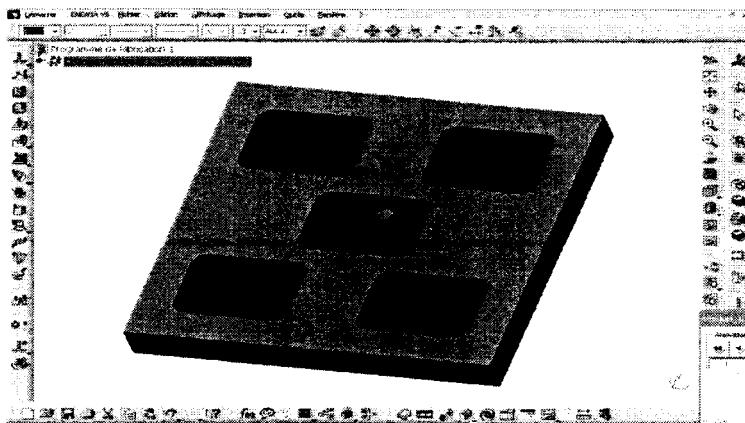


Figure 79 Simulation d'usinage des pochettes rectangulaires dans CATIA®

La routine d'usinage, programmée en VB, permet de générer un parcours d'outil spiralé adaptatif pour diverses géométries de pochettes (figure 80 et 81).

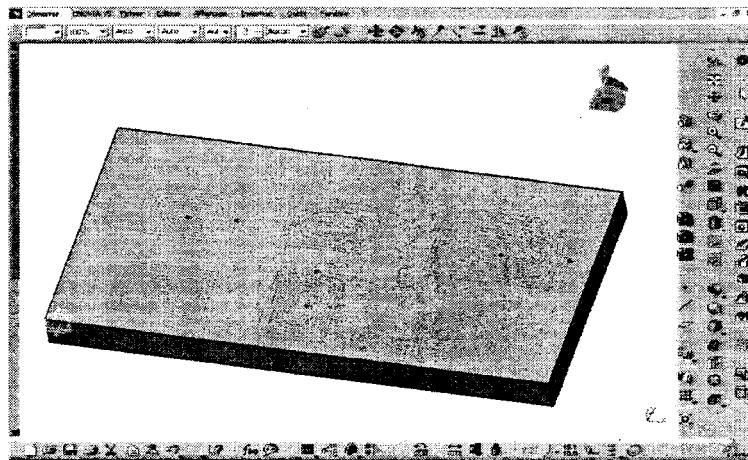


Figure 80 Trajectoires de coupe des géométries variables dans CATIA®

Tel que représenté à la figure suivante, une grande multitude de formes peuvent être usinées en appliquant cette nouvelle tactique de coupe. De plus, cette nouvelle fonctionnalité est directement applicable dans le logiciel CATIA®.

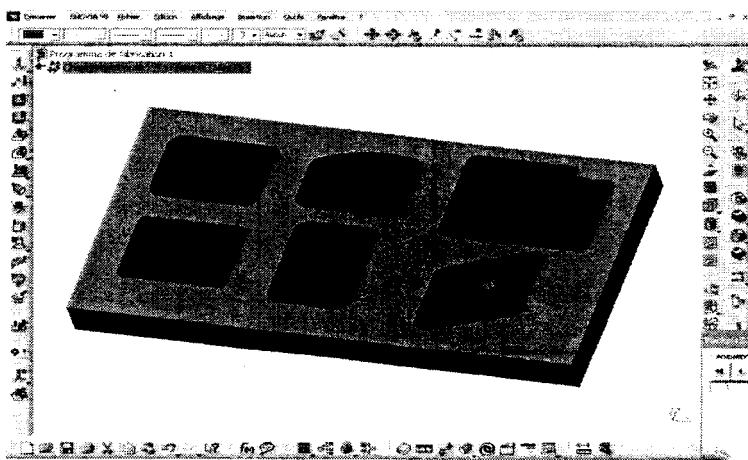


Figure 81 Simulation d'usinage pour des géométries variables dans CATIA®

3.6 Simulation d'usinage dans CATIA®

L'évolution de l'usinage dans CATIA® est schématisée selon les étapes ci-dessous.

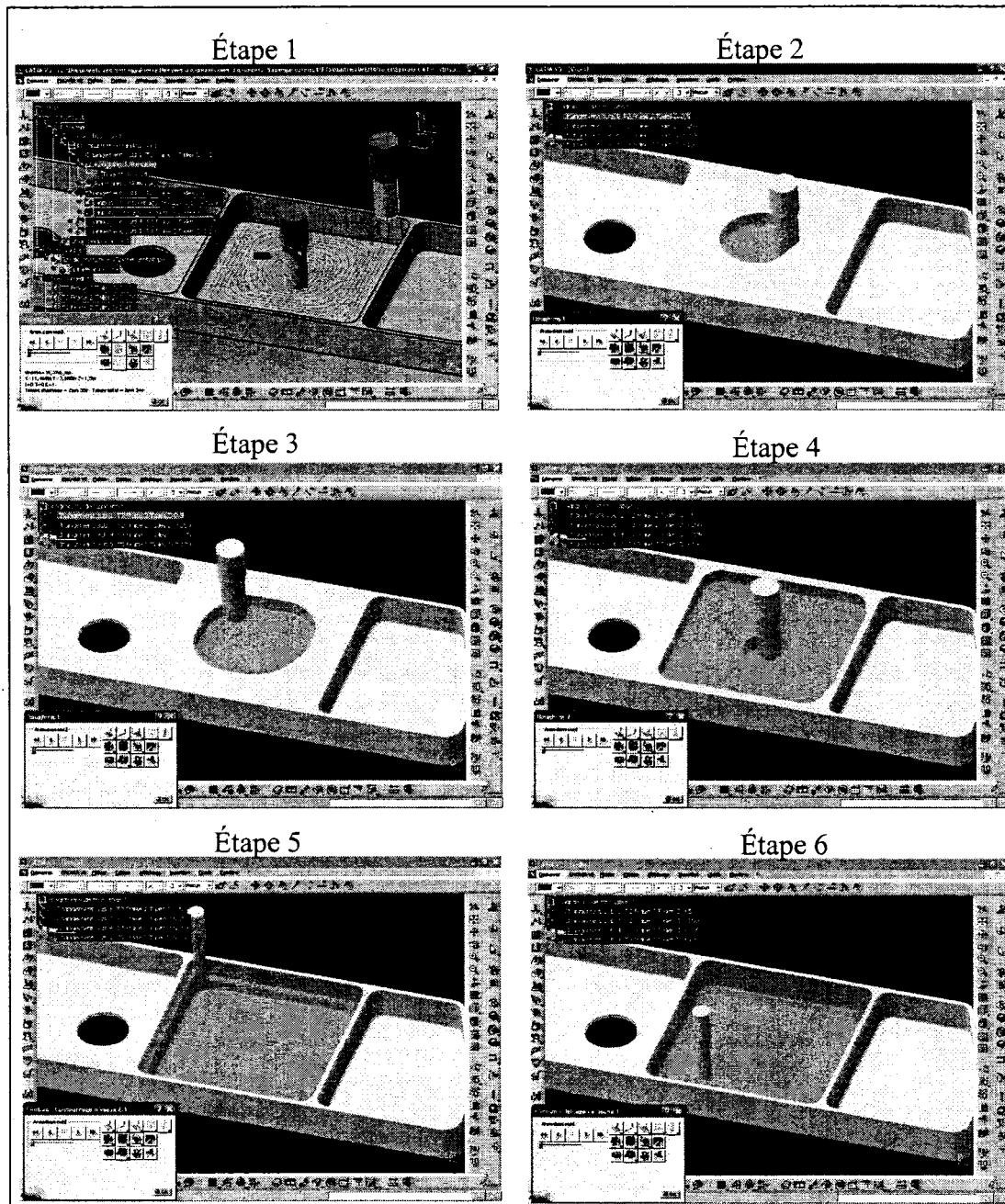


Figure 82 Étapes d'une simulation d'usinage dans CATIA®

- **Étape 1 :** La première étape représente l'outil s'approchant de la trajectoire de coupe, une fois que celle-ci est tracée avec la macro VB.
- **Étape 2 :** Le début de l'usinage s'effectue selon une trajectoire spiralée.
- **Étape 3 :** L'adaptation du reste de la trajectoire, par rapport au contour de la pochette, est par la suite usinée.
- **Étape 4 :** Le même parcours d'outil est répété en Z pour usiner jusqu'au fond de la pochette.
- **Étape 5 :** Dépendamment de la pièce fabriquée, une opération de finition peut être ajoutée pour compléter les murs.
- **Étape 6 :** Cette étape constitue également une opération de finition sur le plancher. Les deux dernières étapes représentent des opérations d'usinage couramment utilisées et font appel à des fonctionnalités déjà existantes dans CATIA®.

Les étapes 1 à 6 permettent de visualiser toutes les opérations requises pour procéder à l'usinage d'une pochette. Une autre simulation est également disponible à l'annexe 5. Celle-ci a été effectuée dans le logiciel Vericut. En plus d'usiner virtuellement la pièce, ce programme permet d'éviter toutes collisions entre l'outil et la pièce.

La procédure à suivre, pour générer automatiquement les trajectoires de coupe spiralées adaptatives, est expliquée en détail à l'annexe 6. Cette annexe montre comment interagir avec l'interface utilisateur dans CATIA®.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX D'USINAGE

4.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré exclusivement aux essais d'usinage en laboratoire. Cette section permettra de valider les trajectoires de coupe spiralées, générées par la macro Visual Basic applicables dans le logiciel CATIA®.

4.2 Caractéristiques de la machine-outil utilisée

En se basant sur les caractéristiques des machines disponibles, le choix de la MOCN HU40-T satisfait aux conditions de coupe à haute vitesse (figure 83).

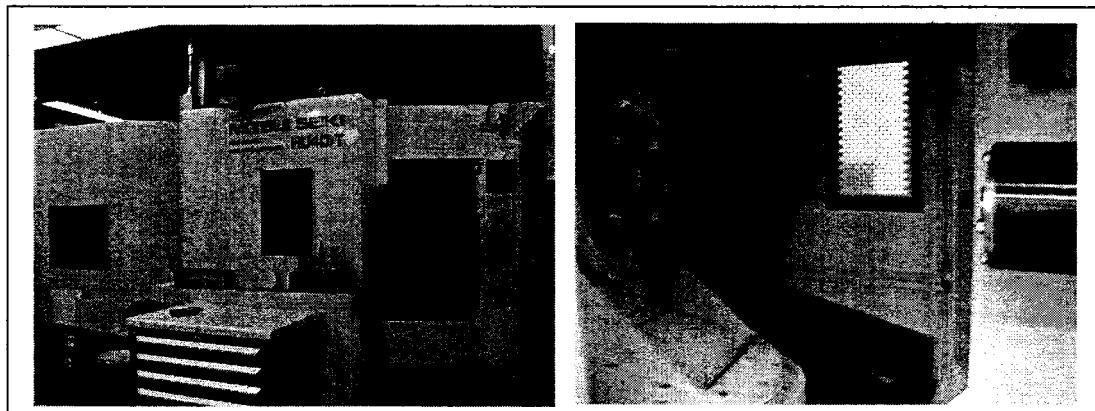


Figure 83 Centre d'usinage MITSUI SEIKI HU40-T

Caractéristiques de la commande numérique :

- | | |
|---|----------------------------------|
| - Machine : Mitsui Seiki HU40-T | - Glissière linéaire prismatique |
| - Électrobroche : 15000 RPM; 420 Nm | - Contrôleur : Fanuc 15iMA |
| - Axe linéaire : 20 m/min; (Vis à billes) | - Axe rotatif : 20 RPM |
| - Table : 400 mm × 400 mm; 100 Kg; 4 palettes | |

Le matériel de coupe est l'aluminium 7475 T7351. Il a la propriété d'être rigide et facile à usiner. En regardant les caractéristiques de la MOCN HU40-T, on constate que l'électrobroche peut supporter un couple élevé allant jusqu'à 420 Nm. Par conséquent, cette machine supportera adéquatement les efforts de coupe pour les opérations de dégrossissage qui seront effectuées.

4.3 Outil de coupe et conditions d'usinage

L'outillage utilisé pour procéder à l'usinage est une fraise 3 lèvres en carbure. Les dimensions de celle-ci se retrouvent à la figure 84. Notons que le diamètre de cet outil est de $\frac{3}{4}$ po. Ce fort diamètre requiert un couple élevé de la broche et justifie d'autant plus le choix de la machine HU40-T capable de supporter de grands efforts de coupe.

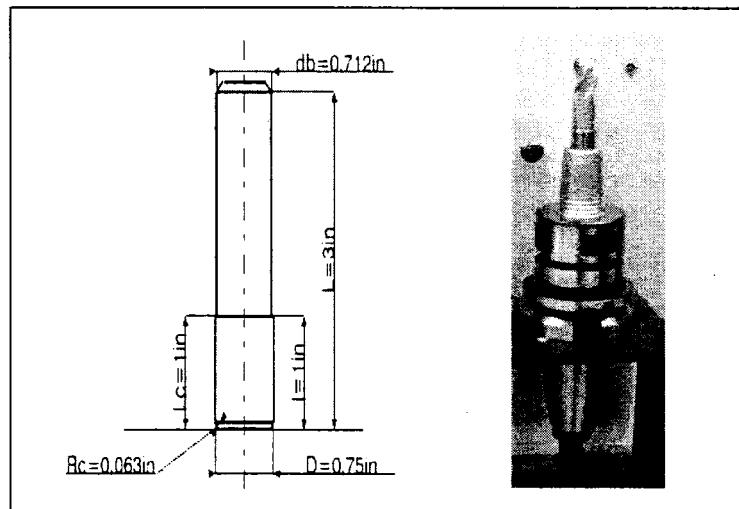


Figure 84 Outil de coupe

Les conditions de coupe ont été déterminées en se basant sur les méthodes de fabrications utilisées en industrie pour l'UHV. Ainsi, en fonction du type de fraise et du matériau à usiner, une avance par dent de 0,0087 po./dent et une vitesse de coupe de 1970 pi./min sont les paramètres les mieux adaptés pour les essais. Grâce à ces valeurs,

il fut possible d'évaluer la vitesse de rotation de la broche et la vitesse d'avance. Les deux équations ci-dessous permettent de calculer ces paramètres.

Vitesse de rotation de la broche :

$$\text{RPM} = \frac{4 \times VC}{D} \quad \text{ou} \quad \text{RPM} = \frac{12 \times VC}{\pi \times D} \quad (4.1)$$

avec : RPM : Vitesse de rotation de la broche (tour/min)
 VC : Vitesse de coupe (po./min)
 D : Diamètre de l'outil (po.)

Vitesse d'avance :

$$Avance = RPM \times nb.dents \times AV.dent \quad (4.2)$$

avec : Avance : Vitesse d'avance de la broche (po./min)
 nb.dents : nombre de dents
 AV.dent : Avance par dent (po./dent)

Ces deux calculs déterminent que la vitesse de rotation et d'avance doivent respectivement être fixées à 10500 RPM et 280 po./min.

4.4 Usinage des échantillons

Après avoir calculé adéquatement les paramètres de coupe, les trajectoires ont été générées dans CATIA®. La pièce usinée est composée de 4 pochettes (figure 85). Cette dernière se retrouve à la page suivante. Les deux pochettes centrales d'une dimension de 4,5 po. par 4,5 po., feront l'objet d'une étude plus particulière pour mesurer les gains de temps d'usinage entre une trajectoire spiralée, générée par la macro VB, et une trajectoire conventionnelle offerte dans CATIA®.

Pour les 2 pochettes centrales carrées, l'avance d'usinage est de 280 po./min. Cependant, comme la trajectoire spiralée est usinée pour la première fois, la vitesse

d'approche a été réduite à 200 po/min en guise de sécurité. Cette modification prise de façon préventive affecte légèrement le temps d'usinage. L'illustration ci-dessous montre la pièce une fois usinée.

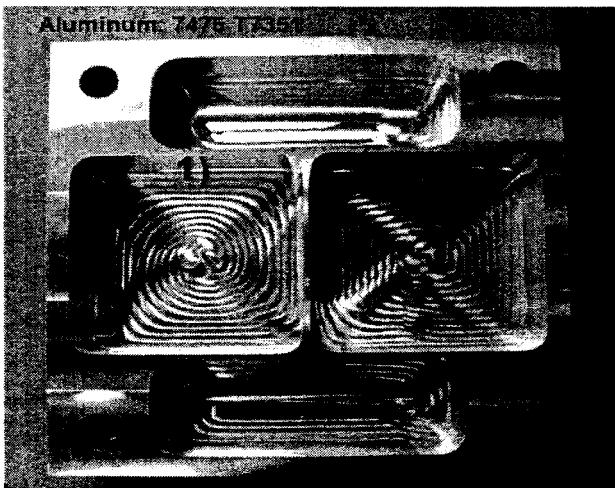


Figure 85 Essai d'usinage

La comparaison des trajectoires est illustrée à la figure 86. À gauche, on remarque la trajectoire spiralee s'adaptant à la géométrie de la pochette. À droite, la trajectoire de coupe représente un parcours d'outil créé par les fonctionnalités existantes dans CATIA®.

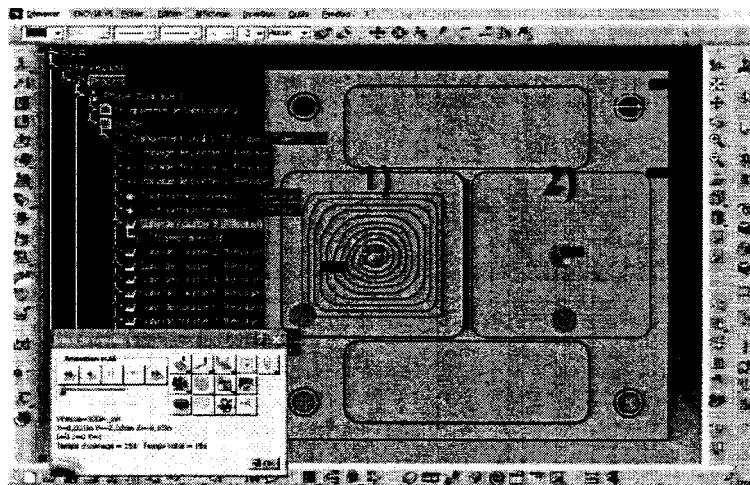


Figure 86 Pièce virtuelle

La nouvelle trajectoire spiralée, comparée à une trajectoire conventionnelle, offre un parcours plus doux et une vitesse d'avance plus constante. Le gain de temps, pour cette opération de dégrossissage a été réduit de 13%. Ce résultat aurait pu être davantage significatif si la vitesse d'avance avait été supérieure. Par exemple, pour un outil $\frac{1}{2}$ po., l'avance aurait atteint 360 po/min. Ainsi, les effets d'accélération et de décélération des axes auraient été encore moins marqués, ce qui aurait permis d'améliorer le gain de temps.

Avec cet essai, il est possible d'appliquer la nouvelle tactique de coupe à d'autres pièces, comme des composantes constituées de pochettes ouvertes (figure 87).

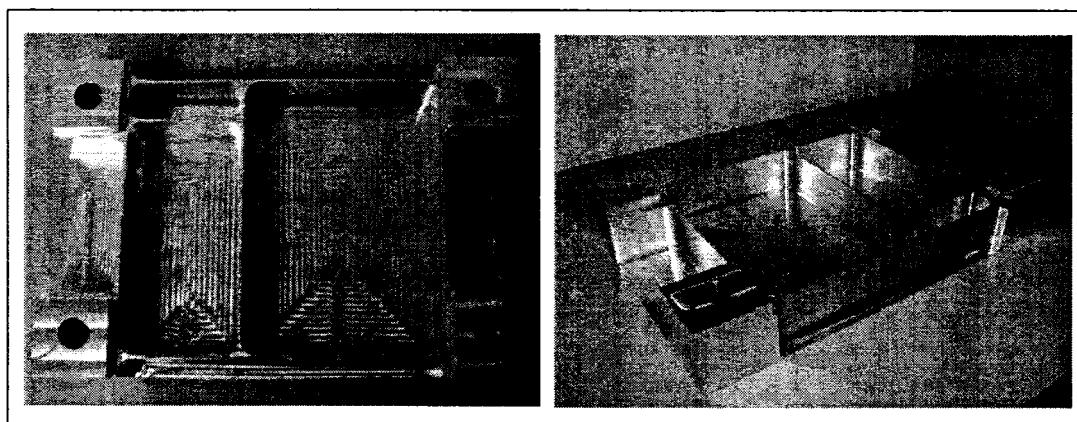


Figure 87 Pièce constituée de pochettes ouvertes

4.5 Application de la nouvelle tactique de coupe sur une pièce industrielle

Suite aux essais d'usinage concluants (nécessaire pour valider la viabilité de la nouvelle méthode de coupe), une pochette entrant dans la fabrication d'une pièce test de Bombardier a été usinée dans les laboratoires de l'université. Cette pièce constituée de 9 pochettes est représentée à la figure 88.

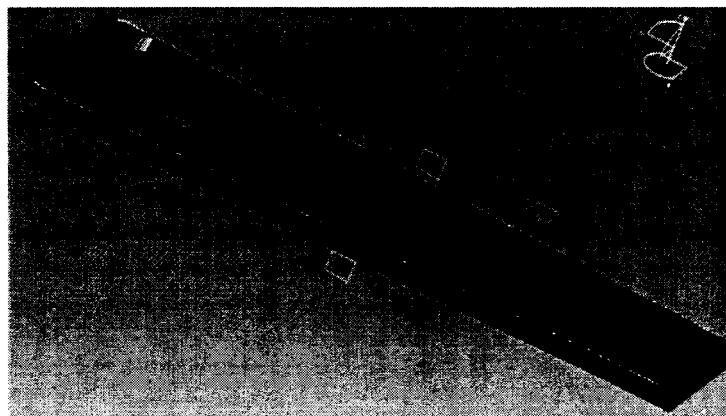


Figure 88 Pièce industrielle de Bombardier

Comme on peut le remarquer à la figure 89, les parcours d'outil conventionnels furent tous remplacés par une tactique de coupe spiralee appropriée.

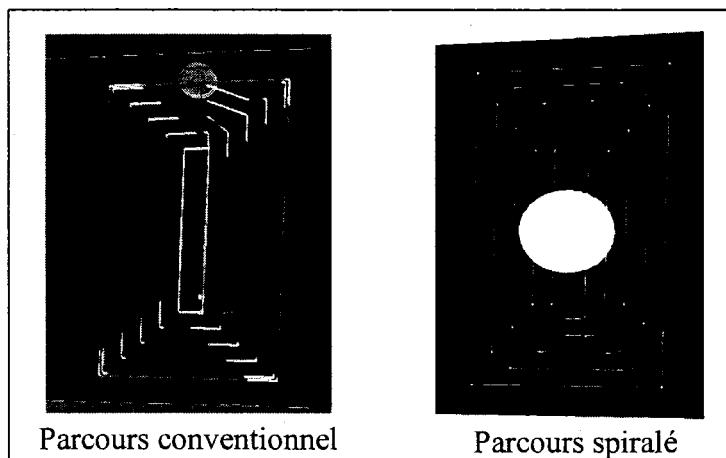


Figure 89 Parcours conventionnel vs parcours spirale

Pour cette pièce, la version CATIA® R16 fut utilisée. Mentionnons que seules les tactiques de coupe pour les opérations de dégrossissage ont été modifiées par la nouvelle méthode. Les opérations de finition et de semi-finition sont restées les mêmes. La figure 90 permet de visualiser le mouvement de l'outil de coupe usinant la pièce. Cette simulation dans CATIA® confirme l'exactitude de la trajectoire. Aucune erreur d'usinage n'est présente. La pièce est conçue correctement sans collision. Par cette figure, on remarque que le début de la trajectoire (1) est plus doux. L'évolution de cette trajectoire (2 à 3) s'effectue à une profondeur de coupe radiale de 50% du diamètre de l'outil, pour finalement s'adapter à la géométrie de la pochette (4).

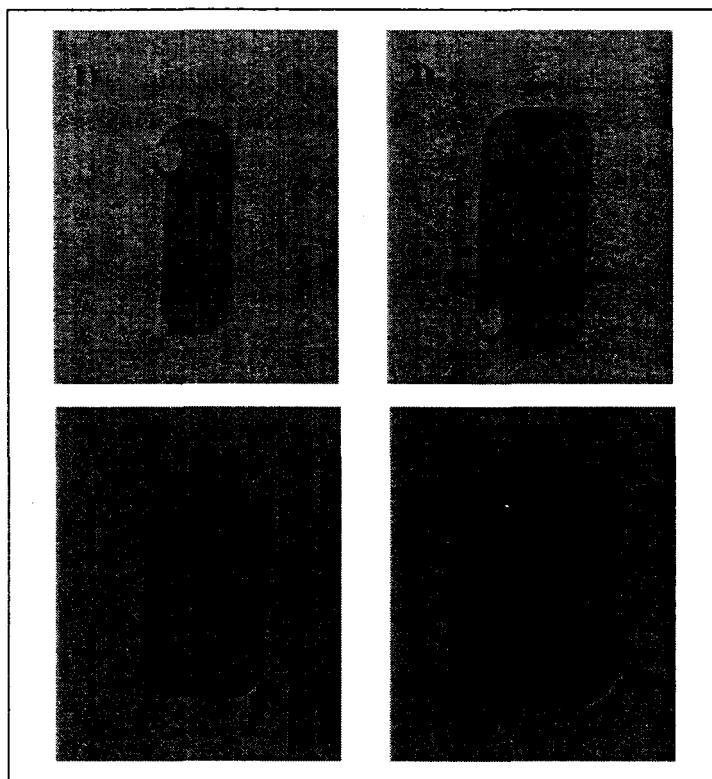


Figure 90 Simulation d'usinage dans CATIA®

Une fois que l'ensemble des trajectoires de coupe fut généré et validé dans CATIA®, un essai a été effectué sur la commande numérique HU40 de l'École Polytechnique. Cet essai a pour objectif de déterminer le gain de temps associé à l'application de la

nouvelle tactique de coupe. Pour ce faire, la plus grande pochette a été utilisée pour mesurer le gain de temps entre l'ancienne et la nouvelle trajectoire de coupe. Ainsi, il est possible d'avoir une bonne idée sur les gains de temps pour des conditions de coupe en milieu industriel.

Suite aux essais expérimentaux, les temps d'usinage ont été relevés et inscrits dans le tableau XI, dépendamment de la tactique de coupe. La méthode 1 fait intervenir les tactiques de coupe traditionnelles offertes dans CATIA® et employées par Bombardier. La méthode 2 du tableau représente le temps d'usinage requis pour usiner la même pochette avec une trajectoire spiralée.

Tableau XI

Gain de temps pour la plus grande pochette

Méthode d'usinage	Temps (sec.)	Gain (%)
1- Trajectoire générée dans CATIA	89,03	16,4%
2- Trajectoire spiralée	74,46	

Tel que prévu par des essais antérieurs, le gain de temps relatif à cette opération d'usinage a été réduit de 16,4 %. Ce résultat fut évalué pour une seule pochette. Cependant, les autres pochettes de la pièce de Bombardier sont de géométrie similaire. On peut estimer les gains de temps dans le même ordre de grandeur.

CHAPITRE 5

VALIDATION DU SUIVI DE LA TRAJECTOIRE

5.1 Introduction

Ce dernier chapitre a pour objectif de faire une estimation rapide de l'erreur face au suivi des trajectoires spiralées adaptatives et du respect des tolérances dimensionnelles. Par des prises de mesures du positionnement de l'outil dans la MOCN, il est possible de quantifier l'amélioration du suivi de la trajectoire due à la réduction des effets d'accélération et à la constance du parcours d'outil.

Premièrement, une légère description des principes de base relatifs à l'instrument KGM sera expliquée dans ce chapitre. Par la suite, des essais de suivi de trajectoires sur des parcours avec changements brusques à 90° seront expérimentés. L'erreur du suivi de la trajectoire dans les coins pourra donc être quantifiée lors de l'adaptation des tactiques de coupes spiralées. Finalement, d'autres essais sur des trajectoires circulaires permettront de mesurer l'erreur concernant le suivi du parcours au tout début de la trajectoire spiralée. Ainsi, suite à une opération d'usinage faisant appel aux tactiques spiralées adaptatives, il est possible de connaître les limites du procédé si aucune passe de finition n'est utilisée.

5.2 Évaluation de l'erreur maximale par la méthode KGM

La méthode KGM permet de mesurer la position réelle de la broche, suite à une trajectoire programmée dans le contrôleur de la commande numérique. Ainsi, en calculant la différence entre la position réelle et la position programmée, il est possible

de quantifier l'erreur dans le suivi d'une trajectoire. L'erreur qui en est déduite est propre à chaque machine. Dans le cadre de cette recherche, des essais KGM ont été effectués sur la commande numérique HU40-T de l'École Polytechnique de Montréal. La méthode implique l'utilisation de deux instruments : une règle 2D de 200 mm de diamètre agissant comme un miroir avec un maillage optique (figure 91A) et une tête de lecture (figure 91B) servant d'instrument de mesure pour le positionnement en X et Y.



Figure 91 Instruments pour les essais KGM

La tête de lecture est fixée dans la broche de la machine tout comme un outil traditionnel, grâce à un porte-outil. Tel qu'illustré à la figure 92, une fois la tête installée dans la broche, elle est approchée à 4 mm de la règle 2D. Par la suite, la tête de lecture est branchée à un ordinateur pour enregistrer le positionnement de l'instrument de mesure lors du suivi d'une trajectoire.

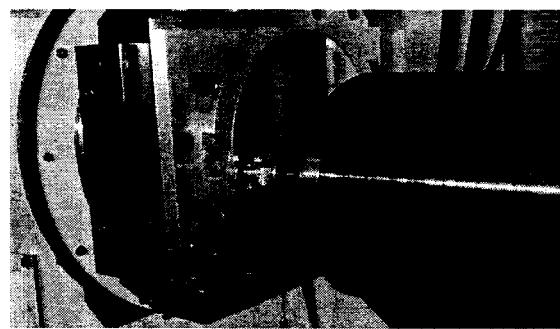


Figure 92 Méthode KGM: approche de la tête de lecture sur la règle 2D

Les erreurs les plus souvent rencontrées, reliées au suivi d'un parcours d'outil, sont représentées ci-dessous. Par exemple, à la figure 93 une trajectoire comprenant un changement brusque de direction à 90° peut créer 2 types d'erreur. L'outil peut dépasser la trajectoire programmée ou bien créer une légère courbure.

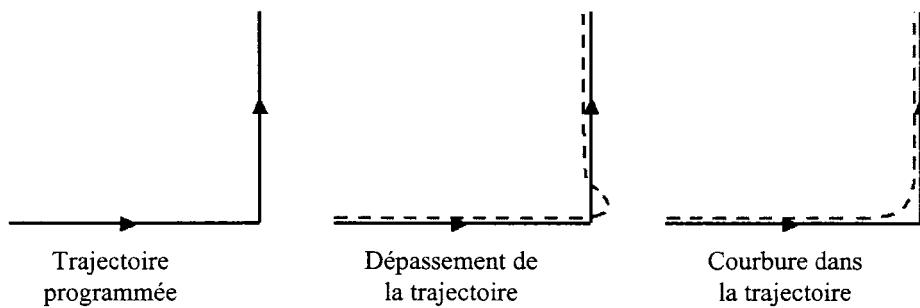


Figure 93 Types d'erreur sur la trajectoire

Il va sans dire que la vitesse d'avance de la broche est un paramètre directement relié à l'écart du suivi de la trajectoire. À cet effet, les essais réalisés en laboratoire consistent à déterminer l'erreur de positionnement d'un outil suite à une trajectoire donnée. Deux paramètres importants ont été étudiés afin de mesurer leur impact. Ces paramètres sont : la vitesse d'avance de l'outil et le rayon de courbure de la trajectoire (aspect géométrique). Les trajectoires programmées dans le contrôleur de la machine sont composées d'un arc de cercle. La figure 94 représente le parcours que l'outil devra suivre.

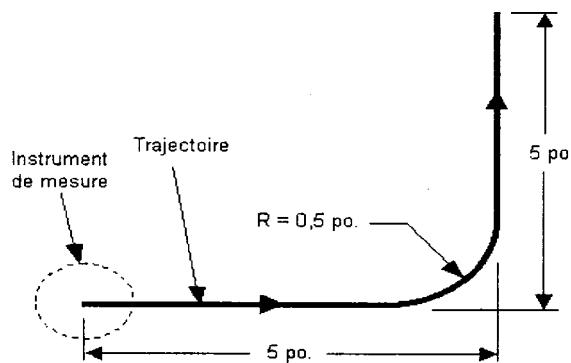


Figure 94 Trajectoire suivie par la méthode KGM

En mesurant le positionnement de la broche à différents rayons de courbure et à des vitesses d'avance variables, il a été possible de quantifier l'erreur maximale. Cette approche révèle toute son utilité pour l'algorithme des parcours d'outil spiralés. L'erreur associée aux trajectoires de coupe générées par cette nouvelle méthode peut ainsi être déterminée.

Les essais KGM nécessitent premièrement le calcul de la quantité des mesures que l'ordinateur devra effectuer pendant le suivi de la trajectoire. En se basant sur : la vitesse d'avance, la distance à parcourir et la fréquence d'échantillonnage de l'instrument; il faut faire un léger calcul de conversion pour déterminer la quantité de mesures à prendre. Ces calculs sont résumés dans les étapes ci-dessous.

$$\triangleright \text{Avance par seconde : Avance} \left(\frac{\text{po.}}{\text{min.}} \right) \times 1 \left(\frac{\text{min.}}{\text{sec.}} \right) = \left(\frac{\text{po.}}{\text{sec.}} \right) \quad (5.1)$$

$$\triangleright \text{Durée de l'essai : } \frac{\text{Distance de la trajectoire (po.)}}{\text{Avance par seconde} \left(\frac{\text{po.}}{\text{sec.}} \right)} = \text{Temps de l'essai (sec.)} \quad (5.2)$$

$$\triangleright \text{Quantité de mesures : } 5000 \left(\frac{\text{pts.}}{\text{sec.}} \right) \times \text{temps (sec.)} = \text{Points (pts.)} \quad (5.3)$$

Les résultats expérimentaux se retrouvent aux pages suivantes et sont structurés comme suit : cinq graphiques représentent les trajectoires différentes qui ont été suivies. La première trajectoire est un changement de direction à 90°. Les quatre autres graphiques possèdent un rayon de courbure de 0,5, 1, 1,5 et 2 po. Pour chaque graphique, le positionnement de l'outil est illustré à des vitesses d'avance variant entre 200 et 600 po/min. La figure qui suit, contient l'ensemble des résultats obtenus.

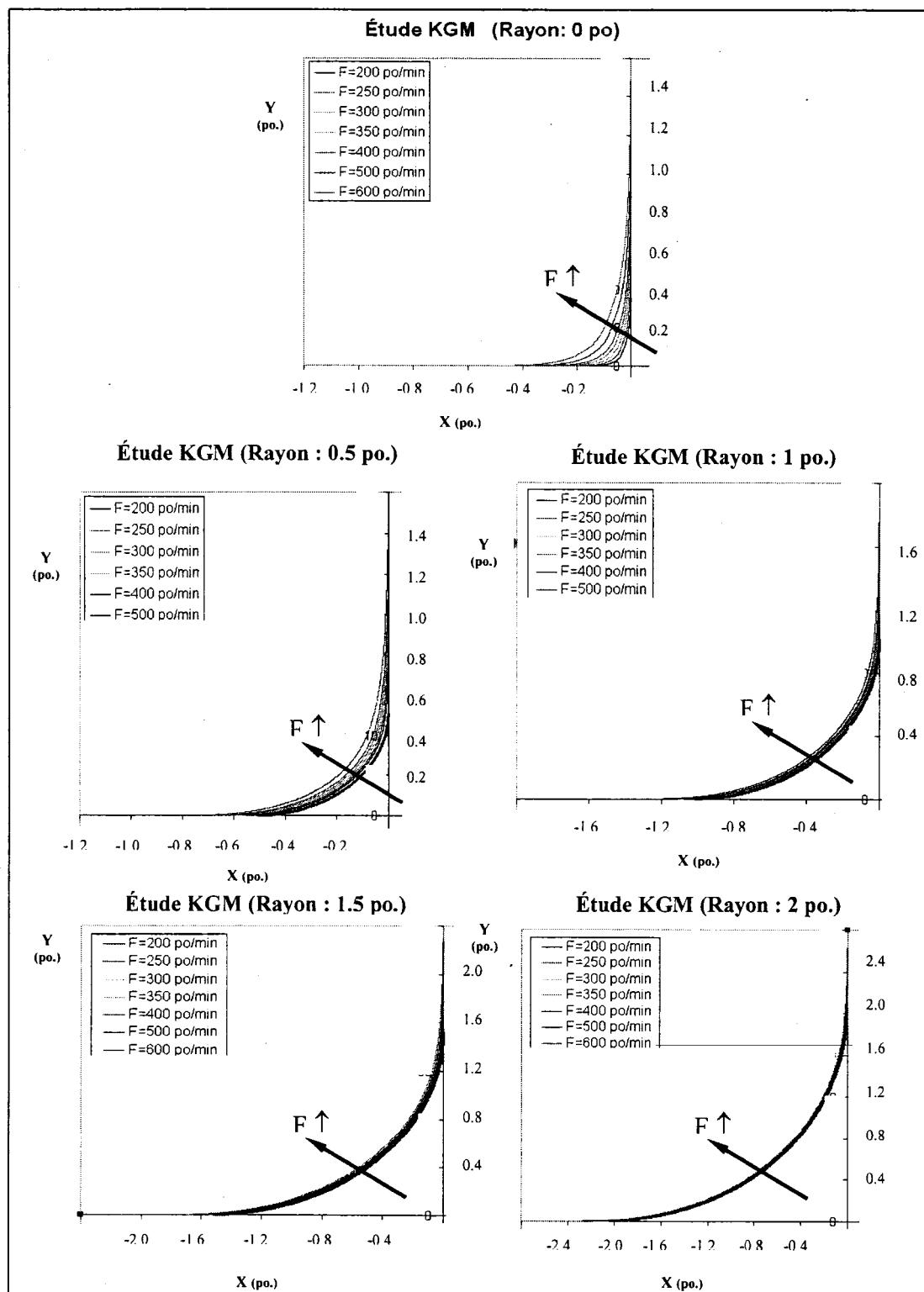


Figure 95 Trajectoire réelle pour un rayon de 0, 0,5, 1, 1,5 et 2 po.

Comme on peut le constater sur les graphiques de la page précédente, indépendamment du type de trajectoire, plus la vitesse d'avance augmente, plus l'erreur de positionnement de la broche est significative. Concernant la géométrie de la trajectoire, un rayon de courbure élevé réduit l'erreur. Par conséquent, une trajectoire plus douce avec des changements de direction moins brusques a un impact significatif sur la qualité de la pièce usinée. La figure qui suit, quantifie l'erreur tout le long du parcours à divers rayons de courbure.

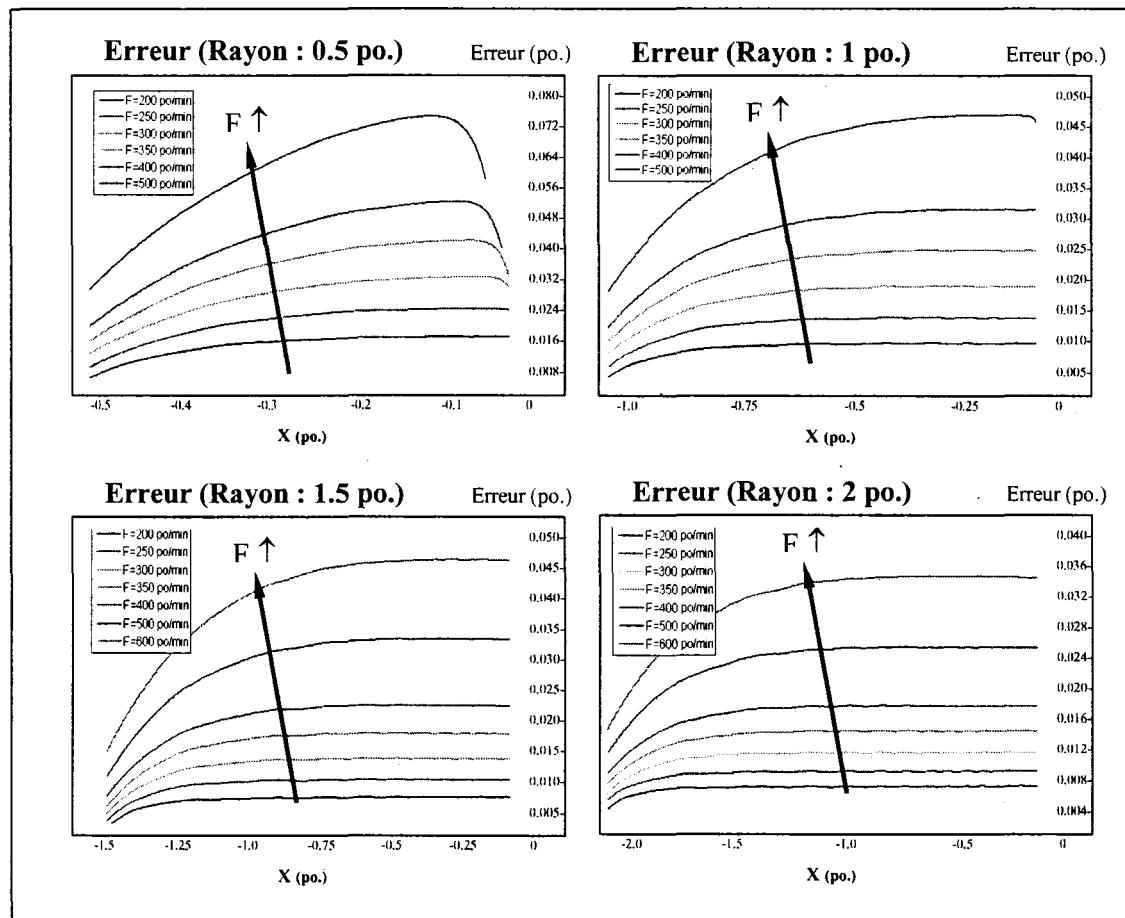


Figure 96 Erreur du parcours pour un rayons de : 0,5, 1, 1,5 et 2 po.

Grâce aux résultats précédents, il est possible de prendre l'erreur maximale à chaque vitesse d'avance pour une trajectoire en particulier et, de représenter graphiquement la

fonction estimant cette erreur maximale pour une courbure spécifique. Ainsi, la figure 97 représente bien cette idée et permet d'illustrer l'erreur maximale en fonction de l'avance et du rayon de courbure. Cette estimation quantitative prédit si un parcours d'outil respecte les tolérances dimensionnelles imposées par un procédé de fabrication.

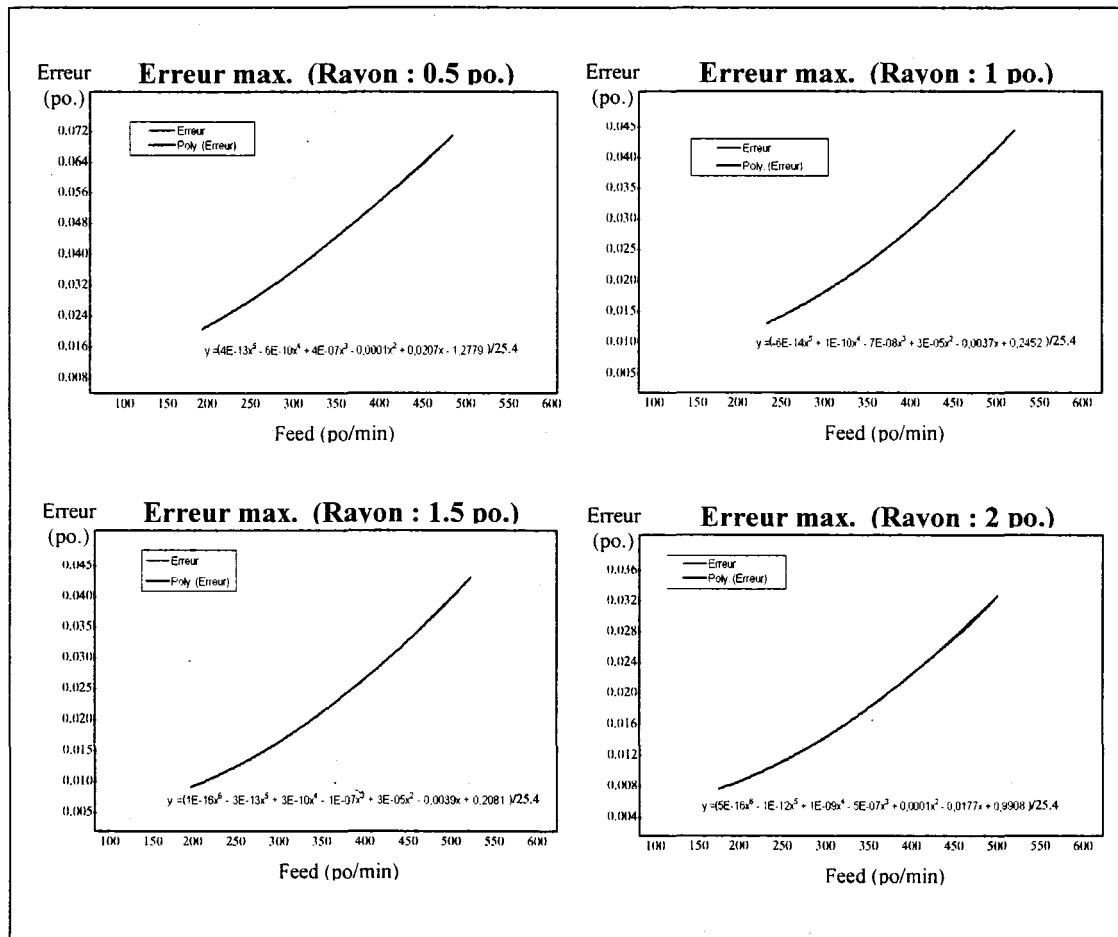


Figure 97 Erreur maximale pour des rayons de : 0,5, 1, 1,5 et 2 po.

À cet effet, dans le même ordre d'idée, le programme de génération de parcours d'outil spiralés qui a été développé nécessite, au début de l'usinage, une trajectoire spiralée s'apparentant à un cercle. Par conséquent, d'autres essais KGM ont été effectués sur des trajectoires circulaires afin de mesurer l'erreur. Ces essais ont été réalisés sur des cercles de dimensions variables. La figure 98A montre une première trajectoire

circulaire de 1 po. de rayon. À une avance de 200 po/min, l'instrument de mesure indique une erreur dans le positionnement réel de la broche (figure 98B). On note que l'erreur se concentre à tous les 90° du cercle.

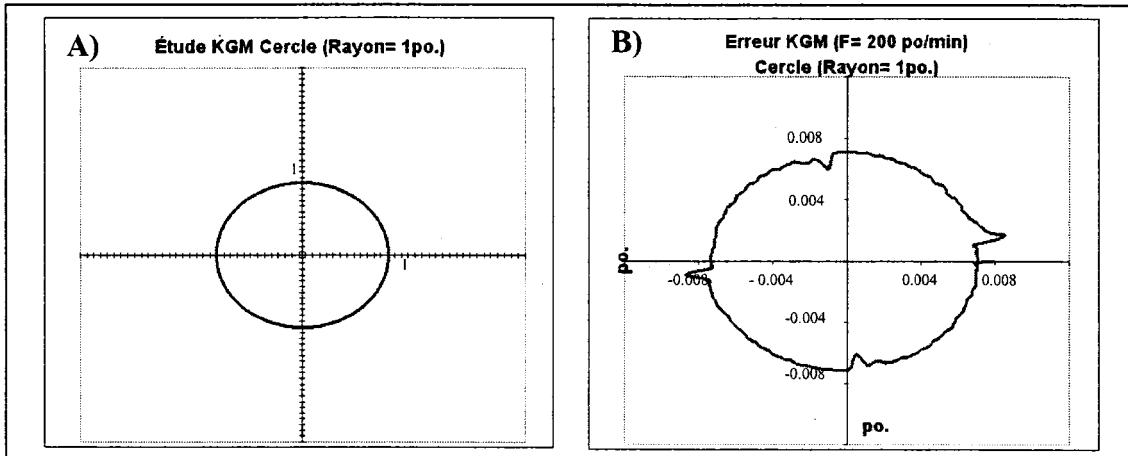


Figure 98 Trajectoire circulaire et répartition de l'erreur

Le phénomène expliquant cette déviation est relié à l'arrêt momentané d'un des axes de la machine lors du changement de direction. Ce type d'erreur se nomme des pics d'inversion et est fréquemment rencontré sur les commandes numériques. D'autres essais ont été effectués sur un cercle de même dimension à une vitesse d'avance de 400 po/min. On dénote le même type d'erreur (figure 99).

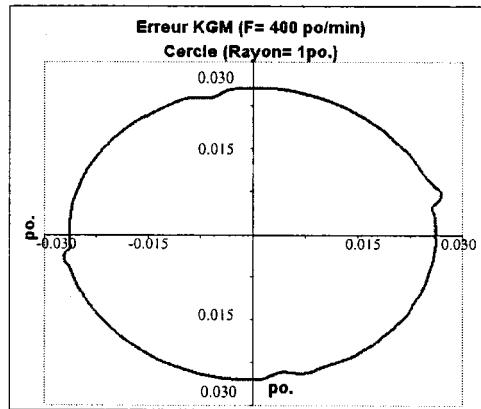


Figure 99 Répartition de l'erreur sur un rayon de 1 po à 400 po/min

Pour faciliter la compréhension de l'erreur sur la circonference du cercle de la figure 99, un graphique similaire a été tracé à la figure 100. Ce graphique illustre l'erreur en fonction du positionnement angulaire sur la circonference du cercle. Les quatre pics d'inversion y sont également présents.

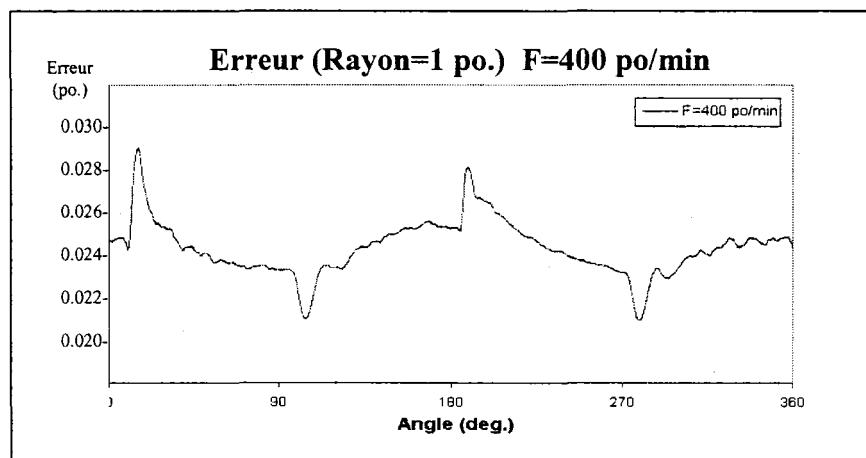


Figure 100 Valeur de l'erreur pour tous les angles

De façon similaire, l'erreur a été tracée à des vitesses variant de 200 à 600 po/min. sur la même trajectoire circulaire.

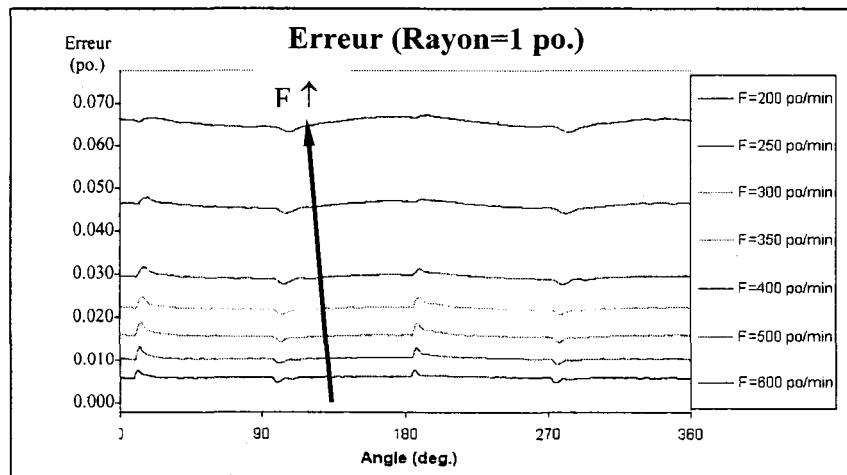


Figure 101 Erreur en fonction de l'angle pour diverses vitesses d'avance

On constate que l'erreur associée au suivi d'une trajectoire circulaire augmente plus rapidement lorsque l'avance programmée dépasse 400 po/min. Pour une même trajectoire, en utilisant l'erreur maximale associée à chaque vitesse d'avance, il est possible de représenter l'erreur maximale en fonction de la vitesse (figure 102), telle que présentée auparavant.

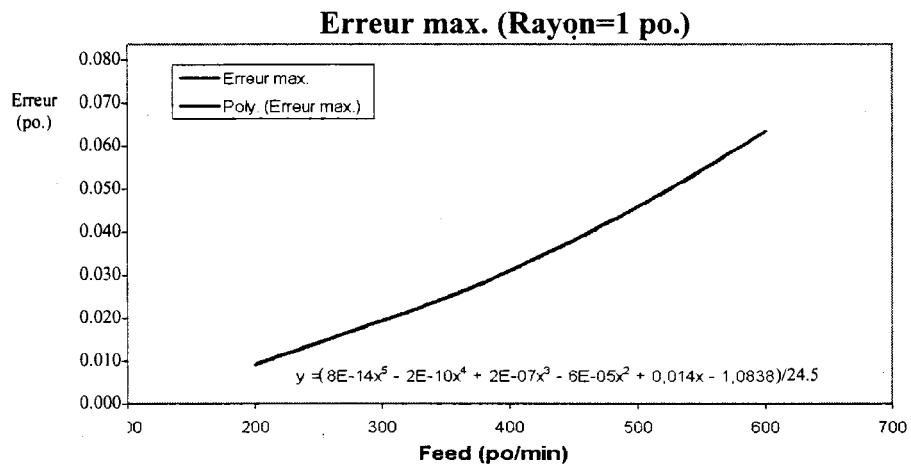


Figure 102 Erreur maximale en fonction de la vitesse d'avance

On remarque que l'erreur maximale varie presque linéairement et peut atteindre jusqu'à 0.065 po. si la vitesse est fixée à 600 po/min. Des essais semblables ont été effectués sur des trajectoires circulaires comprenant un rayon de 0,5 et 2 po. Les résultats de ces essais se retrouvent à l'annexe 7. En examinant les valeurs obtenues, une trajectoire circulaire avec un rayon de courbure plus grand dénote une erreur plus petite qu'un cercle de faible rayon. Tel qu'expliqué précédemment, les trajectoires de coupe ne comportant pas de changement de direction brusque, comme les trajectoires spiralées, permettent de minimiser l'erreur.

Ces essais expérimentaux ont donc permis de démontrer l'avantage d'utiliser un parcours d'outil plus doux. Ainsi, l'algorithme en cours de développement servant à générer des trajectoires spiralées adaptatives est pleinement justifié. Il est possible de réduire significativement le temps de fabrication tout en minimisant l'erreur d'usinage.

CONCLUSION

Les principales étapes qui ont été suivies pour l'élaboration de ce rapport ont permis de développer une nouvelle méthode d'usinage se basant sur les trajectoires spiralées adaptatives.

L'étude des techniques de coupe actuelles ainsi que des récentes percées technologiques dans le domaine de l'usinage à haute vitesse a tout d'abord favorisé la mise au point de la nouvelle tactique de coupe suggérée.

Les essais expérimentaux qui furent menés, ont démontré le plein potentiel pouvant être offert par cette méthode d'usinage. Entre autres, ces essais ont permis de déterminer la variable C% définissant le début de transition de la spirale au contour de la pochette. Il a été démontré que lorsque cette valeur est fixée à 50 %, la transition de la trajectoire permet d'obtenir le meilleur gain de temps. Également, l'étude du comportement des trajectoires spiralées a permis de spécifier que le gain de temps s'opérait au tout début de l'opération d'ébauche. Grâce au développement de formules expérimentales, il est maintenant possible de prédire le temps à gagner pour des opérations de dégrossissage sur des pochettes. Dans son ensemble, la réduction du temps d'usinage est de l'ordre de 15% pour des pochettes entrant dans la fabrication de composantes d'ailes d'avion.

Suite aux essais expérimentaux, la programmation d'une routine d'usinage en langage Visual Basic dans CATIA®, rend possible la génération automatique des parcours d'outil spiralés. Plusieurs exemples d'application ont été menés pour générer des trajectoires spiralées sur des pochettes de géométries variables. Des simulations virtuelles dans CATIA® ont démontré l'efficacité de la méthode face à l'implantation de la nouvelle tactique de coupe dans ce logiciel. De plus, l'intégration de techniques d'approche mieux adaptées à l'UHV permettent de réduire les efforts de coupe lors de l'entrée de l'outil dans la matière.

L'usinage de pièces, basées sur des caractéristiques de composantes industrielles, confirme la raison d'être de cette nouvelle technique de fabrication. Des gains de temps ont tous été enregistrés suite à la fabrication des pièces. Également, l'application des trajectoires spiralées sur une pièce prototype de Bombardier ainsi qu'une simulation dans CATIA® démontre qu'il est possible d'en faire une application utile dans un contexte industriel, pour réduire le temps de production et ainsi augmenter le rendement. L'évaluation de l'erreur maximale par la méthode KGM a également permis d'assurer le respect des tolérances dimensionnelles du procédé.

Le présent travail a contribué à l'implantation de nouvelles tactiques de coupe spiralées adaptatives pour l'ébauche de pochettes dans les logiciels de CFAO. Également, l'algorithme générant les trajectoires prend en considération les murs à angle. Il est ainsi possible d'usiner davantage de matériel. De plus, le programme inclut la nouvelle technique d'approche hélicoïdale dans le matériel et permet de réduire l'effort de coupe au tout début de l'usinage. Ces nouvelles méthodes contribuent à améliorer l'efficacité des parcours d'outil offerts dans les logiciels de CFAO.

L'utilisation des tactiques de coupe spiralées adaptatives constitue en soi une amélioration qui révèle toute son importance pour des productions massives de composantes requérant le dégrossissage de pochettes. Les gains de production peuvent alors être significatifs.

RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus lors d'essais d'usinage mettent de l'avant l'efficacité des parcours d'outil spiralés. L'implantation de cette nouvelle méthode est particulièrement intéressante pour les opérations de dégrossissage en milieu industriel. À cet effet, l'annexe 6 contient la procédure à suivre concernant l'utilisation de la macro Visual Basic avec l'interface utilisateur dans CATIA®. Les étapes qui y sont écrites permettent de générer les trajectoires spiralées adaptatives dans le logiciel. Tous les calculs concernant les paramètres de coupe nécessaires à la détermination du parcours d'outil y sont faits de manière automatique.

Bien que les valeurs employées pour corriger la vitesse d'avance soient bel et bien calculées dans la macro VB, celles-ci ne sont pas appliquées pour corriger l'avance de l'outil dans CATIA®. La fonctionnalité "Suivi de trajectoire" dans ce logiciel n'offre pas la possibilité d'intégrer cette modification. Inévitablement, pour une vitesse d'avance spécifiée, le contrôleur de la commande numérique gère la correction de ce paramètre lors des changements de directions.

En plus des trajectoires spiralées, le programme peut tenir compte des murs inclinés et maximiser l'enlèvement de matière. L'usinage de ce surplus de matériel rendrait envisageable l'élimination des passes de semi-finition et offrir des perspectives intéressantes face à la réduction du temps de fabrication. Mentionnons également que l'ajout de nouvelles tactiques de coupe en approche a été incorporé à la routine d'usinage développée dans la macro VB (annexe 3). L'utilisation du programme permettant la génération de trajectoires spiralées a été employée sur des pochettes de géométrie variable rencontrées en milieu industriel. Il n'en demeure pas moins que la routine d'usinage est davantage applicable pour des pochettes qui ne sont pas de géométrie trop complexe. Néanmoins, des gains de temps intéressants sont obtenus pour une grande partie des géométries rencontrées.

ANNEXE 1

DESSIN DE FABRICATION D'UNE PIÈCE PROTOTYPE

Les dimensions et la géométrie de cette pièce prototype sont à la base de tous les essais d'usinage. Cette composante a servi de modèle de référence.

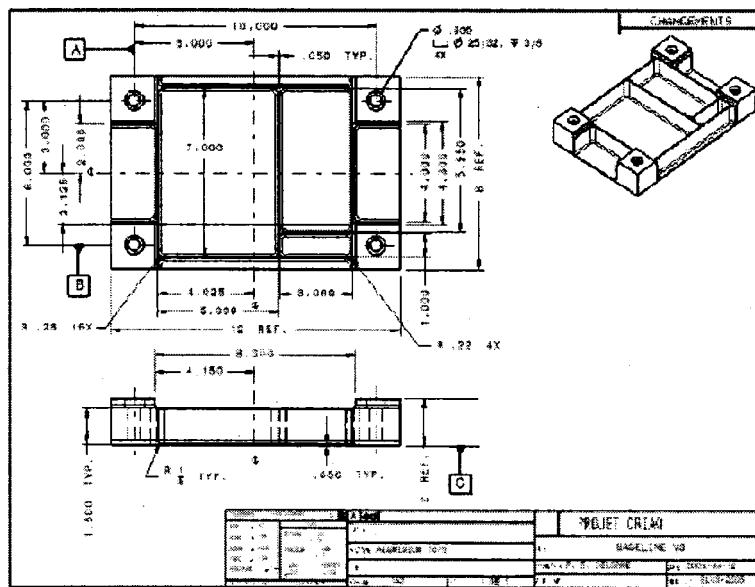


Figure 103 Vue de dessus et de côté

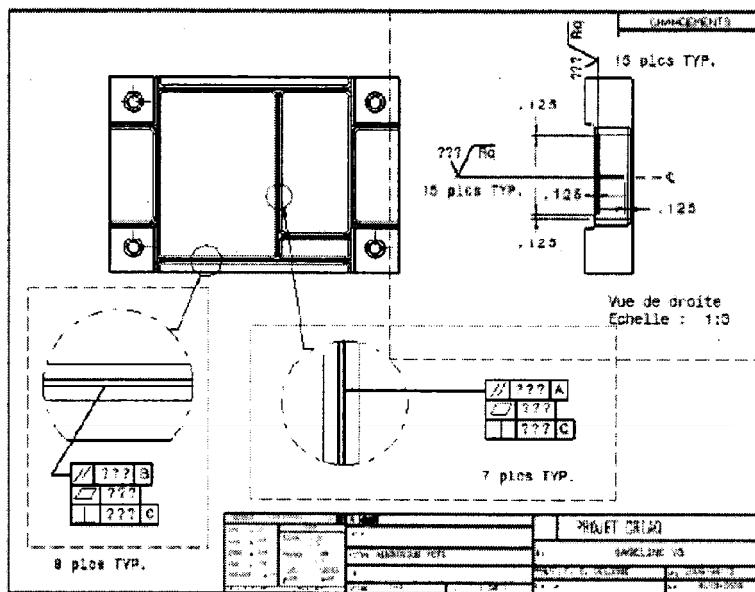


Figure 104 Dessin de détails

ANNEXE 2

PROGRAMMATION DE LA TRAJECTOIRE SPIRALÉE

Les essais expérimentaux à vide qui ont permis de déterminer le comportement dynamique des trajectoires spiralées adaptatives ont été réalisés tôt dans le projet, par l'intermédiaire d'une petite routine programmée en MATLAB®. Grâce à celle-ci, les trajectoires spiralées associées à des pochettes carrées et rectangulaires ont été générées.

```
% -----
% Programme MATLAB® pour générer des trajectoires spiralées sur des pochettes
% carrées et rectangulaires
% -----
clear all          % Effacer toutes les variables

% Données

L=7;                % Longueur de la cavité
H=5;                % Hauteur de la cavité
Doutil=0.3;          % Diamètre de l'outil
hfeed=300;            % High feed
lfeed=150;            % Low feed
inc=20;               % Incréments pour les arcs de cercle
pcercle=0.60;          % Pourcentage en trajectoire circulaire
poutil=0.30;          % Pourcentage Diam.outil
epasse=poutil*Doutil;    % Épaisseur de passe en %Diam.outil
coupe=[0, 0, 0, 0, 0];    % Initialiser une matrice des paramètres de coupe

% -----
% Appel de la fonction 'Cercle' pour générer un trajet circulaire

ncercle=(pcercle*(H/2))/epasse;    % Nombre de passes circulaires
                                    % (Arrondis à la baisse ex.5,45=5,5=5)
for i=1:(ncercle)
    xdecal=0;                  % Centre du cercle décalé à (0,0)
    ydecal=0;                  % Centre du cercle décalé à (0,0)
    r=i*epasse;
    lcoupe=length(coupe);      % Longueur de la matrice coupe
    if(lcoupe<6)                % Entre les angles
        angledep=0;
        anglefin=2*pi;
    else

```

```

angledep=acos(r/(r+epasse));
anglefin=2*pi;
end
[coupe] = cercle(xdecal,ydecal,r,angledep,anglefin,inc,epasse,hfeed,coupe);

end

% -----
% Appel de la fonction 'Spire' pour générer une trajectoire adaptative

nspire=((L/2)-(pcercle*(H/2))/epasse); % Nombre de passes, pas arrondi

for spcomp=1:nspire % Calcule le nb complet de spire
    spcomp;
end

for i=1:(nspire-1)
    nbspire=i;
    rcercle=r*((nspire-i)/nspire); % Rayon de courbure (%)
    L1x=r+(i*epasse); % Position en X de la ligne
    L1y=(r+i*((H/2)-r)/nspire))-rcercle; % Position en Y de la ligne
    L2y=(r+i*((H/2)-r)/nspire))-rcercle+((H/2)-r)/nspire); % Position en Y de la ligne transition
    [coupe] =
    spire_tronc(H,L,Doutil,L1x,L1y,L2y,rcercle,spcomp,inc,nbspire,epasse,lfeed,hfeed,coupe);
end

% -----
% Sortie tangentielle
xcentre=(L/2-epasse)-Doutil; % Centre du cercle décalé à (x,y)
ycentre=(H/2-epasse-0.5); % Centre du cercle décalé à (x,y)
rcercle=.5;
angledep=pi/2;
anglefin=pi;
[coupe] = sortietan(xcentre,ycentre,rcercle,angledep,anglefin,inc,lfeed,coupe);

% -----
% Afficher la matrice des points totaux
disp('Ensemble des points constituant la trajectoire.')
disp('      X      Y      R      Feed      Géométrie ')
coupe
pause

```

```

% -----
% Graph de la trajectoire

envelope=[L/2,H/2;-L/2,H/2;-L/2,-H/2;L/2,-H/2;L/2,H/2];
plot(coupe(:,1),coupe(:,2),'b',envelope(:,1),envelope(:,2),'g','linewidth',2);
title('Trajectoire de coupe')
xlabel('X')
ylabel('Y')
grid on

pause

% -----
% Générateur de code G

grandeur=length(coupe);

for i=1:grandeur
    x=0;
    y=0;
    r=0;
    f=0;
    ligne=i;
    if (coupe(i,5)==1)
        g=1;
        x=coupe(i,1);
        y=coupe(i,2);
        f=coupe(i,4);
        txt=strcat('N',num2str(ligne),' G0',num2str(g),' X=',num2str(sprintf('%0.4f',x)),
        ' Y=',num2str(sprintf('%0.4f',y)),', F=',num2str(f));
        disp(txt)
    else
        g=3;
        x=coupe(i,1);
        y=coupe(i,2);
        r=coupe(i,3);
        f=coupe(i,4);
        txt=strcat('N',num2str(ligne),' G0',num2str(g),' X=',num2str(sprintf('%0.4f',x)),
        ' Y=',num2str(sprintf('%0.4f',y)),', R=',num2str(sprintf('%0.4f',r)),', F=',num2str(f));
        disp(txt)
    end
end

```

ANNEXE 3

EFFORT DE COUPE EN APPROCHE

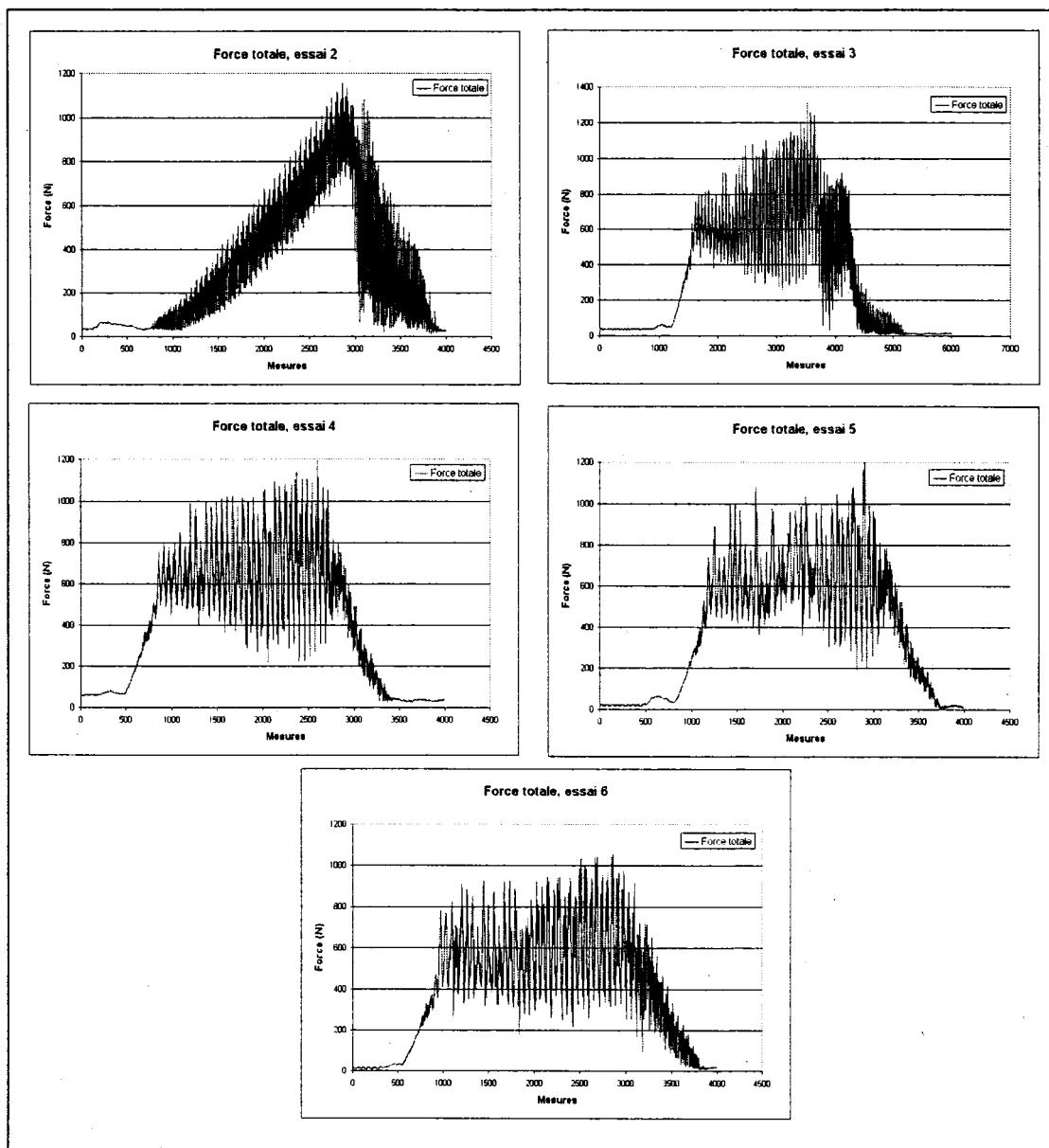


Figure 105 Effort de coupe des essais en approche

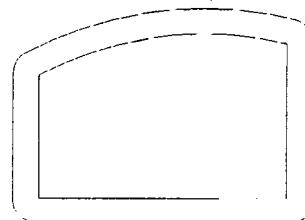
Les résultats expérimentaux des efforts de coupe associés aux diverses approches sont regroupés à la figure 105. On y remarque la répartition de la force (N) sur l'outil durant l'évolution de l'usinage (sec.). L'amplitude de l'effort varie dépendamment de la tactique d'approche.

ANNEXE 4

FICHIERS DE DONNÉES DÉCRIVANT LES CONTOURS

Pochette 1 (X Y R)

coord(1,1)=10	coord(3,1)=coord(2,1)	coord(5,1)=coord(4,1)
coord(1,2)=9.5	coord(3,2)=coord(2,2)	coord(5,2)=coord(4,2)
coord(1,3)=0.5	coord(3,3)=coord(2,3)	coord(5,3)=coord(4,3)
coord(2,1)=9.5	coord(4,1)=3.5	coord(6,1)=3
coord(2,2)=10	coord(4,2)=10	coord(6,2)=9.5
coord(2,3)=0	coord(4,3)=0.5	coord(6,3)=0
coord(7,1)=coord(6,1)	coord(9,1)=coord(8,1)	coord(11,1)=coord(10,1)
coord(7,2)=coord(6,2)	coord(9,2)=coord(8,2)	coord(11,2)=coord(10,2)
coord(7,3)=coord(6,3)	coord(9,3)=coord(8,3)	coord(11,3)=coord(10,3)
coord(8,1)=3	coord(10,1)=3.5	coord(12,1)=9.5
coord(8,2)=5.5	coord(10,2)=5	coord(12,2)=5
coord(8,3)=0.5	coord(10,3)=0	coord(12,3)=0.5
coord(13,1)=coord(12,1)	coord(15,1)=coord(14,1)	
coord(13,2)=coord(12,2)	coord(15,2)=coord(14,2)	
coord(13,3)=coord(12,3)	coord(15,3)=coord(14,3)	
coord(14,1)=10	coord(16,1)=10	
coord(14,2)=5.5	coord(16,2)=9.5	
coord(14,3)=0	coord(16,3)=0	

Pochette 2 (X Y R)

coord(1,1)=10	coord(3,1)=coord(2,1)	coord(5,1)=coord(4,1)
coord(1,2)=5.25	coord(3,2)=coord(2,2)	coord(5,2)=coord(4,2)
coord(1,3)=0.5	coord(3,3)=coord(2,3)	coord(5,3)=coord(4,3)
coord(2,1)=9.621	coord(4,1)=3.263	coord(6,1)=3
coord(2,2)=5.735	coord(4,2)=4.94	coord(6,2)=4.5
coord(2,3)=8.876	coord(4,3)=0.5	coord(6,3)=0

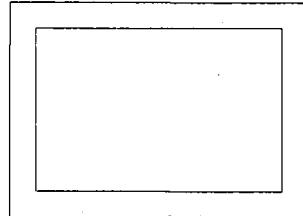
coord(7,1)=coord(6,1)	coord(9,1)=coord(8,1)	coord(11,1)=coord(10,1)
coord(7,2)=coord(6,2)	coord(9,2)=coord(8,2)	coord(11,2)=coord(10,2)
coord(7,3)=coord(6,3)	coord(9,3)=coord(8,3)	coord(11,3)=coord(10,3)
coord(8,1)=3	coord(10,1)=3.5	coord(12,1)=9.5
coord(8,2)=1.5	coord(10,2)=1	coord(12,2)=1
coord(8,3)=0.5	coord(10,3)=0	coord(12,3)=0.5

coord(13,1)=coord(12,1)	coord(15,1)=coord(14,1)
coord(13,2)=coord(12,2)	coord(15,2)=coord(14,2)
coord(13,3)=coord(12,3)	coord(15,3)=coord(14,3)
coord(14,1)=10	coord(16,1)=10
coord(14,2)=1.5	coord(16,2)=5.25
coord(14,3)=0	coord(16,3)=0

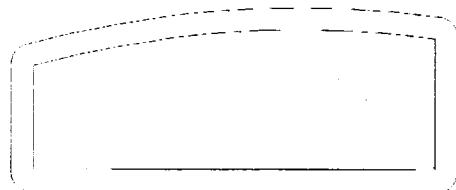
Pochette 3 (X Y R)



coord(1,1)=18	coord(3,1)=coord(2,1)	coord(5,1)=coord(4,1)
coord(1,2)=7.5	coord(3,2)=coord(2,2)	coord(5,2)=coord(4,2)
coord(1,3)=0.5	coord(3,3)=coord(2,3)	coord(5,3)=coord(4,3)
coord(2,1)=17.5	coord(4,1)=13.5	coord(6,1)=13
coord(2,2)=8	coord(4,2)=8	coord(6,2)=7.5
coord(2,3)=0	coord(4,3)=0.5	coord(6,3)=0
coord(7,1)=coord(6,1)	coord(9,1)=coord(8,1)	coord(11,1)=coord(10,1)
coord(7,2)=coord(6,2)	coord(9,2)=coord(8,2)	coord(11,2)=coord(10,2)
coord(7,3)=coord(6,3)	coord(9,3)=coord(8,3)	coord(11,3)=coord(10,3)
coord(8,1)=13	coord(10,1)=13.5	coord(12,1)=17.5
coord(8,2)=1.5	coord(10,2)=1	coord(12,2)=1
coord(8,3)=0.5	coord(10,3)=0	coord(12,3)=0.5
coord(13,1)=coord(12,1)	coord(15,1)=coord(14,1)	
coord(13,2)=coord(12,2)	coord(15,2)=coord(14,2)	
coord(13,3)=coord(12,3)	coord(15,3)=coord(14,3)	
coord(14,1)=18	coord(16,1)=18	
coord(14,2)=1.5	coord(16,2)=7.5	
coord(14,3)=0	coord(16,3)=0	

Pochette 4 (X Y R)

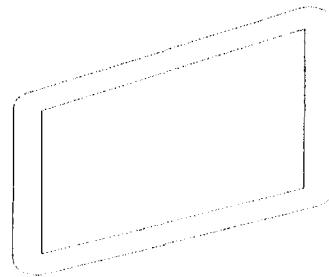
coord(1,1)=28	coord(3,1)=coord(2,1)	coord(5,1)=coord(4,1)
coord(1,2)=6	coord(3,2)=coord(2,2)	coord(5,2)=coord(4,2)
coord(1,3)=0	coord(3,3)=coord(2,3)	coord(5,3)=coord(4,3)
coord(2,1)=21	coord(4,1)=21	coord(6,1)=28
coord(2,2)=6	coord(4,2)=1	coord(6,2)=1
coord(2,3)=0	coord(4,3)=0	coord(6,3)=0
coord(7,1)=coord(6,1)	coord(8,1)=28	
coord(7,2)=coord(6,2)	coord(8,2)=6	
coord(7,3)=coord(6,3)	coord(8,3)=0	

Pochette 5 (X Y R)

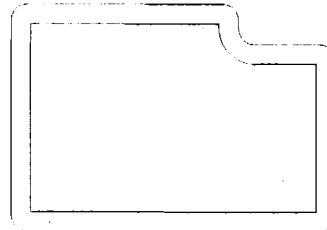
coord(1,1)=43	coord(3,1)=coord(2,1)	coord(5,1)=coord(4,1)
coord(1,2)=5.25	coord(3,2)=coord(2,2)	coord(5,2)=coord(4,2)
coord(1,3)=0.5	coord(3,3)=coord(2,3)	coord(5,3)=coord(4,3)
coord(2,1)=42.568	coord(4,1)=31.366	coord(6,1)=31
coord(2,2)=5.745	coord(4,2)=4.982	coord(6,2)=4.5
coord(2,3)=27.764	coord(4,3)=0.5	coord(6,3)=0
coord(7,1)=coord(6,1)	coord(9,1)=coord(8,1)	coord(11,1)=coord(10,1)
coord(7,2)=coord(6,2)	coord(9,2)=coord(8,2)	coord(11,2)=coord(10,2)
coord(7,3)=coord(6,3)	coord(9,3)=coord(8,3)	coord(11,3)=coord(10,3)
coord(8,1)=31	coord(10,1)=31.5	coord(12,1)=42.5
coord(8,2)=1.5	coord(10,2)=1	coord(12,2)=1
coord(8,3)=0.5	coord(10,3)=0	coord(12,3)=0.5

coord(13,1)=coord(12,1)	coord(15,1)=coord(14,1)
coord(13,2)=coord(12,2)	coord(15,2)=coord(14,2)
coord(13,3)=coord(12,3)	coord(15,3)=coord(14,3)
coord(14,1)=43	coord(16,1)=43
coord(14,2)=1.5	coord(16,2)=5.25
coord(14,3)=0	coord(16,3)=0

Pochette 6 (X Y R)



coord(1,1)=52.138	coord(3,1)=coord(2,1)	coord(5,1)=coord(4,1)
coord(1,2)=8.302	coord(3,2)=coord(2,2)	coord(5,2)=coord(4,2)
coord(1,3)=0.25	coord(3,3)=coord(2,3)	coord(5,3)=coord(4,3)
coord(2,1)=51.785	coord(4,1)=46.147	coord(6,1)=46
coord(2,2)=8.53	coord(4,2)=5.978	coord(6,2)=5.75
coord(2,3)=0	coord(4,3)=0.25	coord(6,3)=0
coord(7,1)=coord(6,1)	coord(9,1)=coord(8,1)	coord(11,1)=coord(10,1)
coord(7,2)=coord(6,2)	coord(9,2)=coord(8,2)	coord(11,2)=coord(10,2)
coord(7,3)=coord(6,3)	coord(9,3)=coord(8,3)	coord(11,3)=coord(10,3)
coord(8,1)=46	coord(10,1)=46.336	coord(12,1)=51.974
coord(8,2)=1.25	coord(10,2)=1.015	coord(12,2)=3.067
coord(8,3)=0.25	coord(10,3)=0	coord(12,3)=0.25
coord(13,1)=coord(12,1)	coord(15,1)=coord(14,1)	
coord(13,2)=coord(12,2)	coord(15,2)=coord(14,2)	
coord(13,3)=coord(12,3)	coord(15,3)=coord(14,3)	
coord(14,1)=52.138	coord(16,1)=52.138	
coord(14,2)=3.302	coord(16,2)=8.302	
coord(14,3)=0	coord(16,3)=0	

Pochette 7 (X Y R)

coord(1,1)=78.138
 coord(1,2)=6.75
 coord(1,3)=0.25
 coord(2,1)=77.888
 coord(2,2)=7
 coord(2,3)=0

coord(7,1)=coord(6,1)
 coord(7,2)=coord(6,2)
 coord(7,3)=coord(6,3)
 coord(8,1)=75.138
 coord(8,2)=7.75
 coord(8,3)=0.25

coord(13,1)=coord(12,1)
 coord(13,2)=coord(12,2)
 coord(13,3)=coord(12,3)
 coord(14,1)=68.138
 coord(14,2)=7.75
 coord(14,3)=0

coord(19,1)=coord(18,1)
 coord(19,2)=coord(18,2)
 coord(19,3)=coord(18,3)
 coord(20,1)=77.888
 coord(20,2)=1
 coord(20,3)=0.25

coord(3,1)=coord(2,1)
 coord(3,2)=coord(2,2)
 coord(3,3)=coord(2,3)
 coord(4,1)=75.388
 coord(4,2)=7
 coord(4,3)=-0.25

coord(9,1)=coord(8,1)
 coord(9,2)=coord(8,2)
 coord(9,3)=coord(8,3)
 coord(10,1)=74.888
 coord(10,2)=8
 coord(10,3)=0

coord(15,1)=coord(14,1)
 coord(15,2)=coord(14,2)
 coord(15,3)=coord(14,3)
 coord(16,1)=68.138
 coord(16,2)=1.25
 coord(16,3)=0.25

coord(21,1)=coord(20,1)
 coord(21,2)=coord(20,2)
 coord(21,3)=coord(20,3)
 coord(22,1)=78.138
 coord(22,2)=1.25
 coord(22,3)=0

coord(5,1)=coord(4,1)
 coord(5,2)=coord(4,2)
 coord(5,3)=coord(4,3)
 coord(6,1)=75.138
 coord(6,2)=7.25
 coord(6,3)=0

coord(11,1)=coord(10,1)
 coord(11,2)=coord(10,2)
 coord(11,3)=coord(10,3)
 coord(12,1)=68.388
 coord(12,2)=8
 coord(12,3)=0.25

coord(17,1)=coord(16,1)
 coord(17,2)=coord(16,2)
 coord(17,3)=coord(16,3)
 coord(18,1)=68.388
 coord(18,2)=1
 coord(18,3)=0

coord(23,1)=coord(22,1)
 coord(23,2)=coord(22,2)
 coord(23,3)=coord(22,3)
 coord(24,1)=78.138
 coord(24,2)=6.75
 coord(24,3)=0

ANNEXE 5

SIMULATION FAO DANS VERICUT

Dans cette annexe, une simulation des trajectoires spiralées sur une pochette carrée est effectuée dans le logiciel VERICUT pour valider l'exactitude de la trajectoire et éviter les collisions avec la machine.

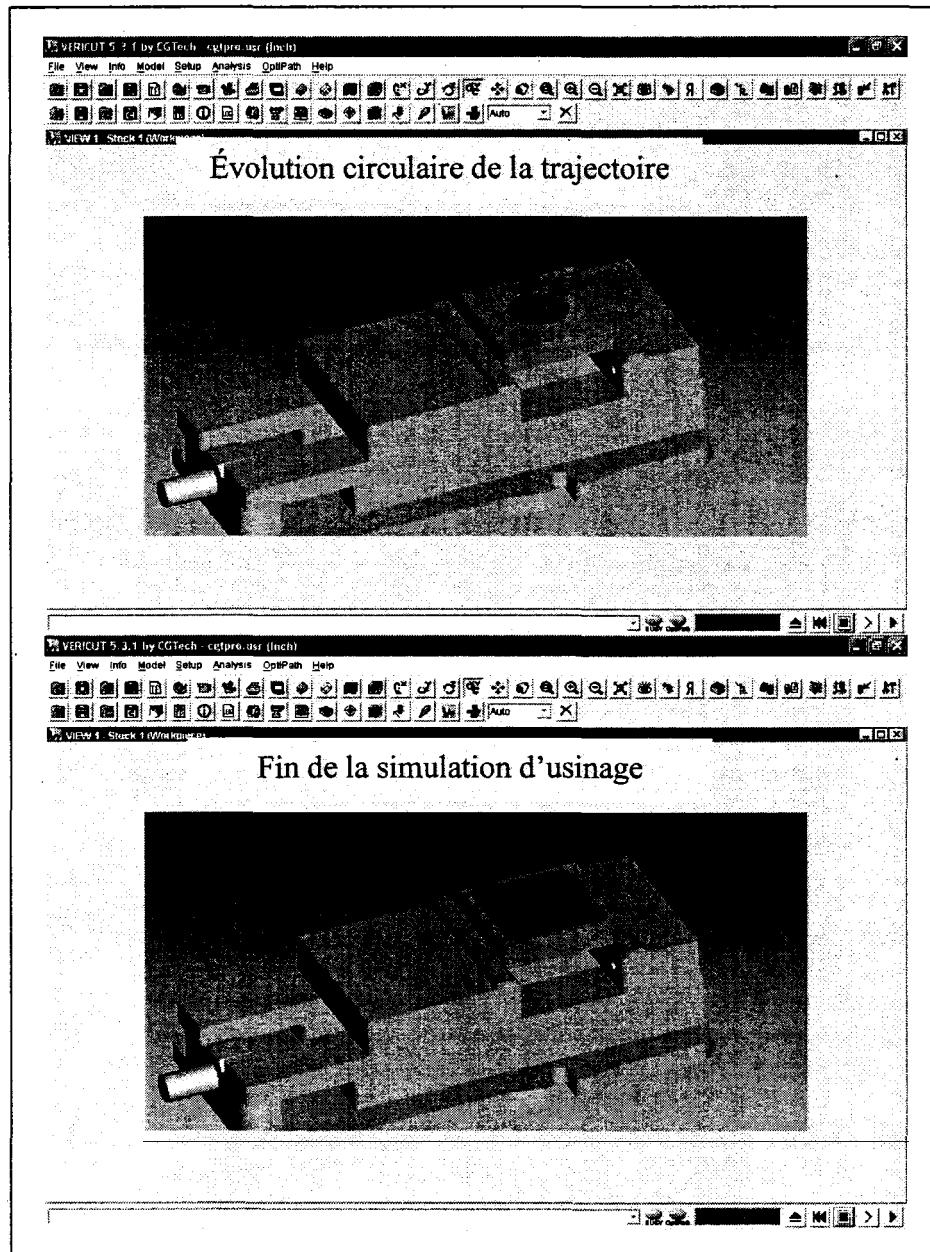


Figure 106 Simulation FAO dans VERICUT

ANNEXE 6

INTERFACE UTILISATEUR

Les étapes suivantes indiquent à l'utilisateur comment générer les trajectoires de coupe spiralées dans CATIA® :

- Exécuter le programme dans CATIA® avec le menu: Outil>>Macro>>Macros...
- Une fenêtre contenant les macros s'ouvre (figure 107).
- S'assurer que la macro, nécessaire pour générer les parcours d'outil, est dans la bonne bibliothèque.

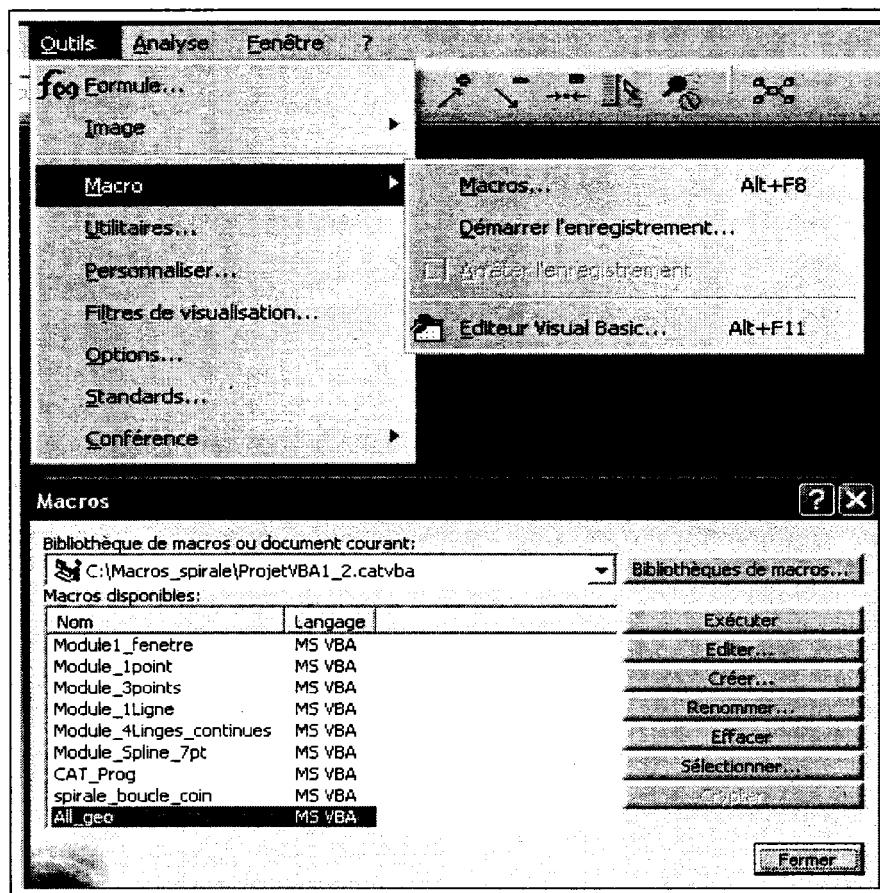


Figure 107 Ouverture des macros pour démarrer le programme

- Sélectionner la macro et appuyer sur le bouton Exécuter. L'interface utilisateur apparaît.

- e) L'interface permettant de générer les parcours d'outil est constituée d'une fenêtre comprenant trois rubriques (figure 108). La première rubrique concerne les paramètres de coupe, la seconde est en rapport avec la géométrie de la pochette et la troisième gère la tactique d'approche de l'outil.

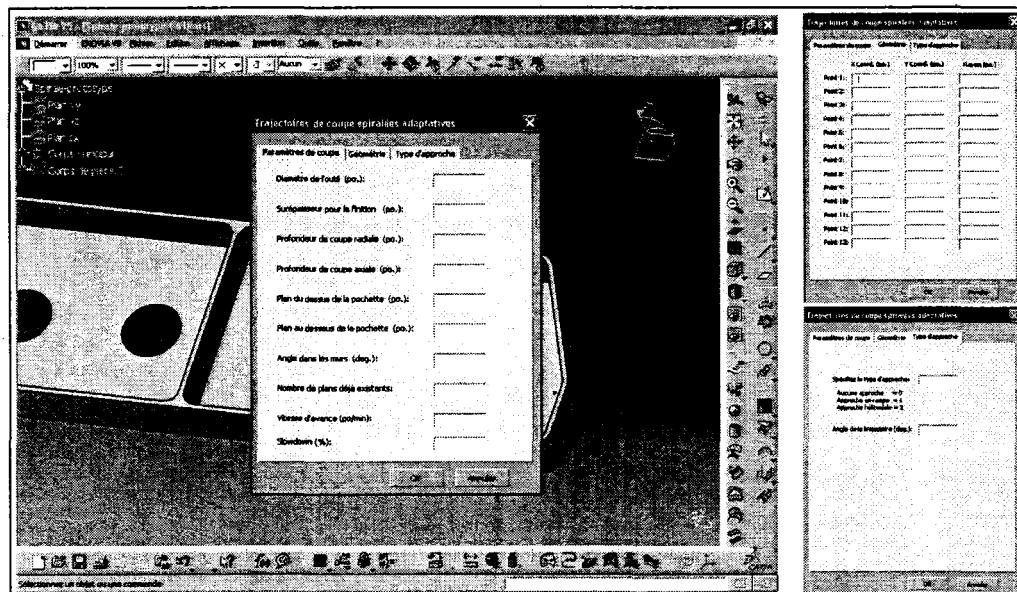


Figure 108 Rubrique des paramètres de coupe et de la géométrie

- f) Compléter les trois rubriques avec l'information appropriée.
 g) Les paramètres dimensionnels de la pochette peuvent être pris par l'entremise des fonctionnalités de mesure dans CATIA® (figure 109).

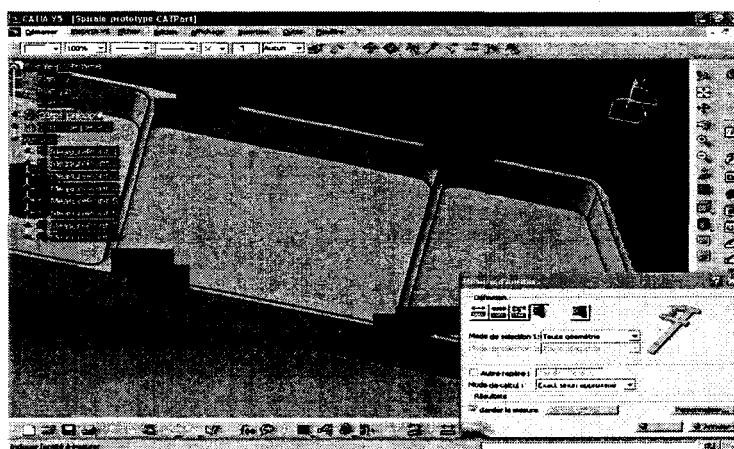
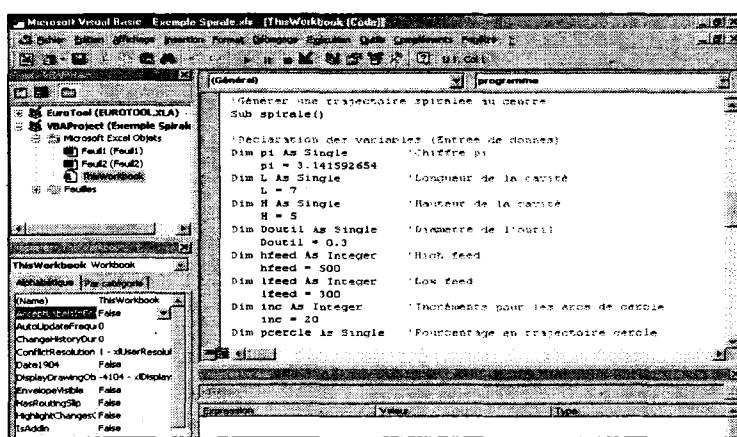


Figure 109 Prise de mesures sur la pochette

- h) Une fois les trois rubriques complétées, il faut appuyer sur le bouton OK pour lancer l'exécution du programme Visual Basic.
- i) La routine (VB) qui a été programmée pour générer les trajectoires n'est pas accessible par l'utilisateur (figure 110).



```

' Générer une trajectoire spirale au centre
Sub spirale()
    'Déclaration des variables (Entrée de données)
    Dim pi As Single      'Chiffre pi
    Dim pi = 3.141592654
    Dim L As Single        'Longueur de la cavité
    L = 7
    Dim H As Single        'Hauteur de la cavité
    H = 5
    Dim Doutil As Single   'Diamètre de l'outil
    Doutil = 0.3
    Dim hfeed As Integer   'High feed
    hfeed = 500
    Dim ideed As Integer   'Low feed
    ideed = 300
    Dim inc As Integer      'Incrément pour les angles de coupe
    inc = 20
    Dim pcercl As Single    'Pourcentage en trajectoire cercle

```

Figure 110 Routine Visual Basic

- j) Lorsque le programme est lancé, la trajectoire de coupe spiralee est dessinée au bon endroit dans le fichier contenant la pièce (figure 111).

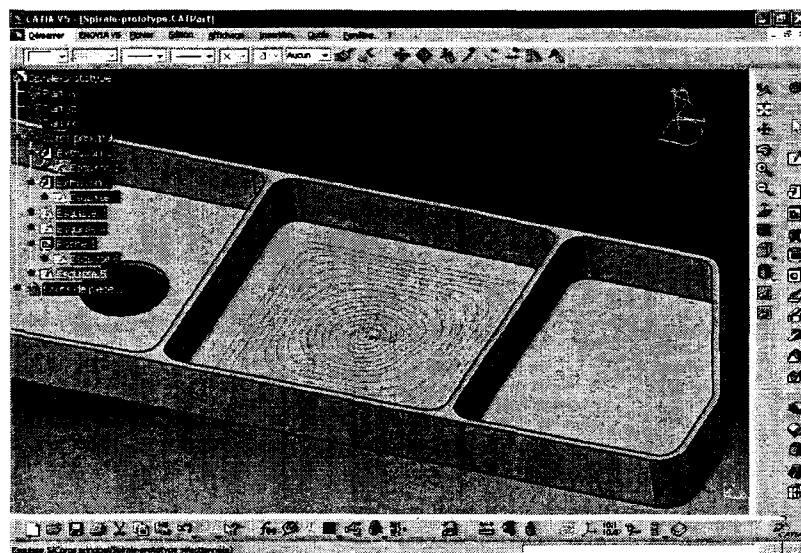


Figure 111 Tracé de la trajectoire

- k) L'étape suivante consiste à inclure la trajectoire de coupe au programme de fabrication dans le Process de la pièce à usiner (figure 112). Cliquez sur l'onglet "Suivi de trajectoire" et générez la tactique de coupe en sélectionnant la trajectoire spiralée. La méthode à suivre est la même que pour toutes les opérations d'usinage dans CATIA®.

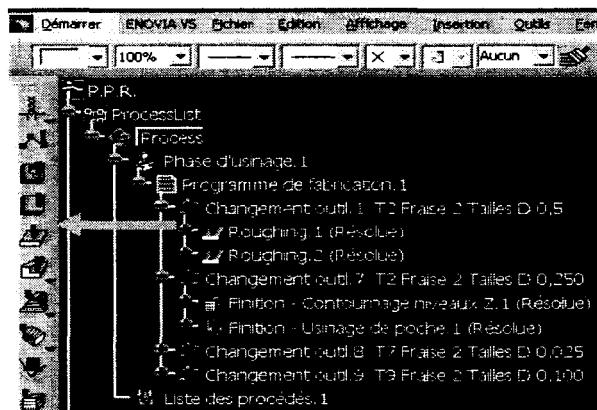


Figure 112 Programme de fabrication

- l) Après avoir effectué toutes les étapes, il ne reste plus qu'à simuler la trajectoire de l'outil dans CATIA® afin de visualiser le résultat final (figure 113).

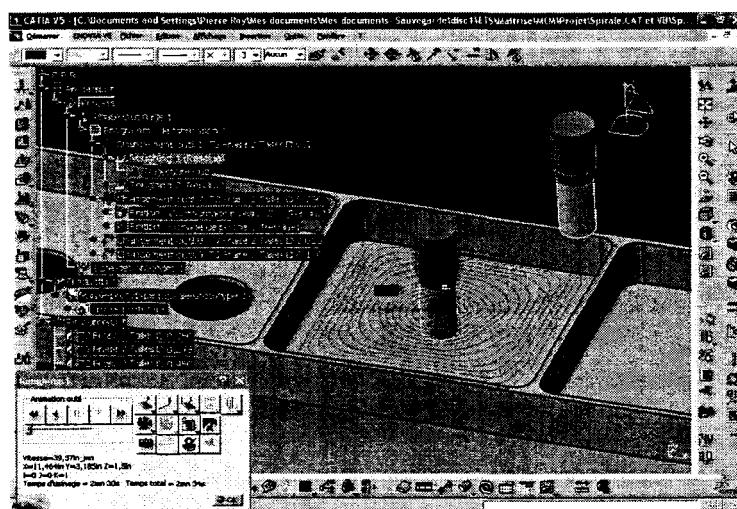


Figure 113 Simulation de la trajectoire de coupe

ANNEXE 7

ESSAIS CIRCULAIRES KGM

Les résultats expérimentaux des erreurs de parcours sont exprimés dans cette section pour une trajectoire circulaire mesurant 0,5 po. de rayon à une avance de 200, 250, 300, 350, 400, 500 et 600 po/min.

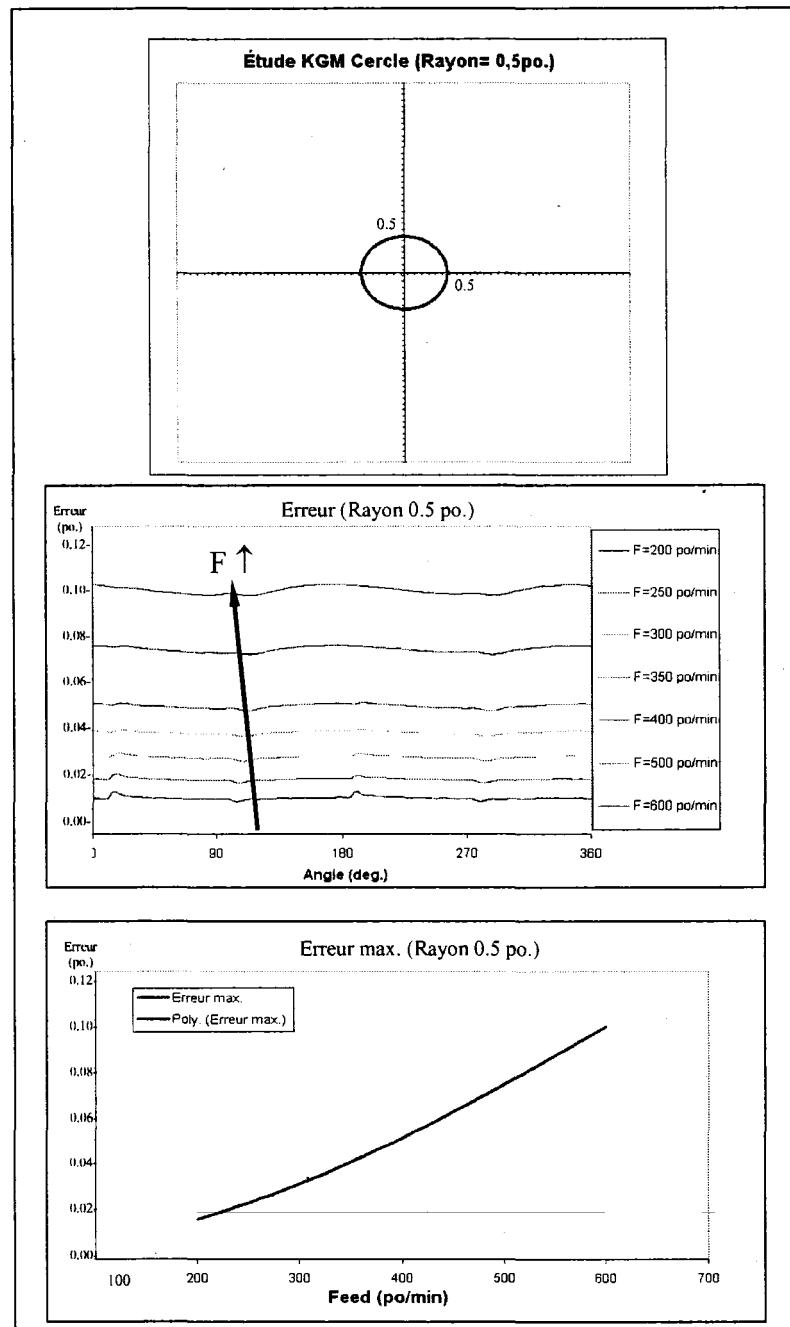


Figure 114 Erreur sur une trajectoire circulaire de 0,5 po.

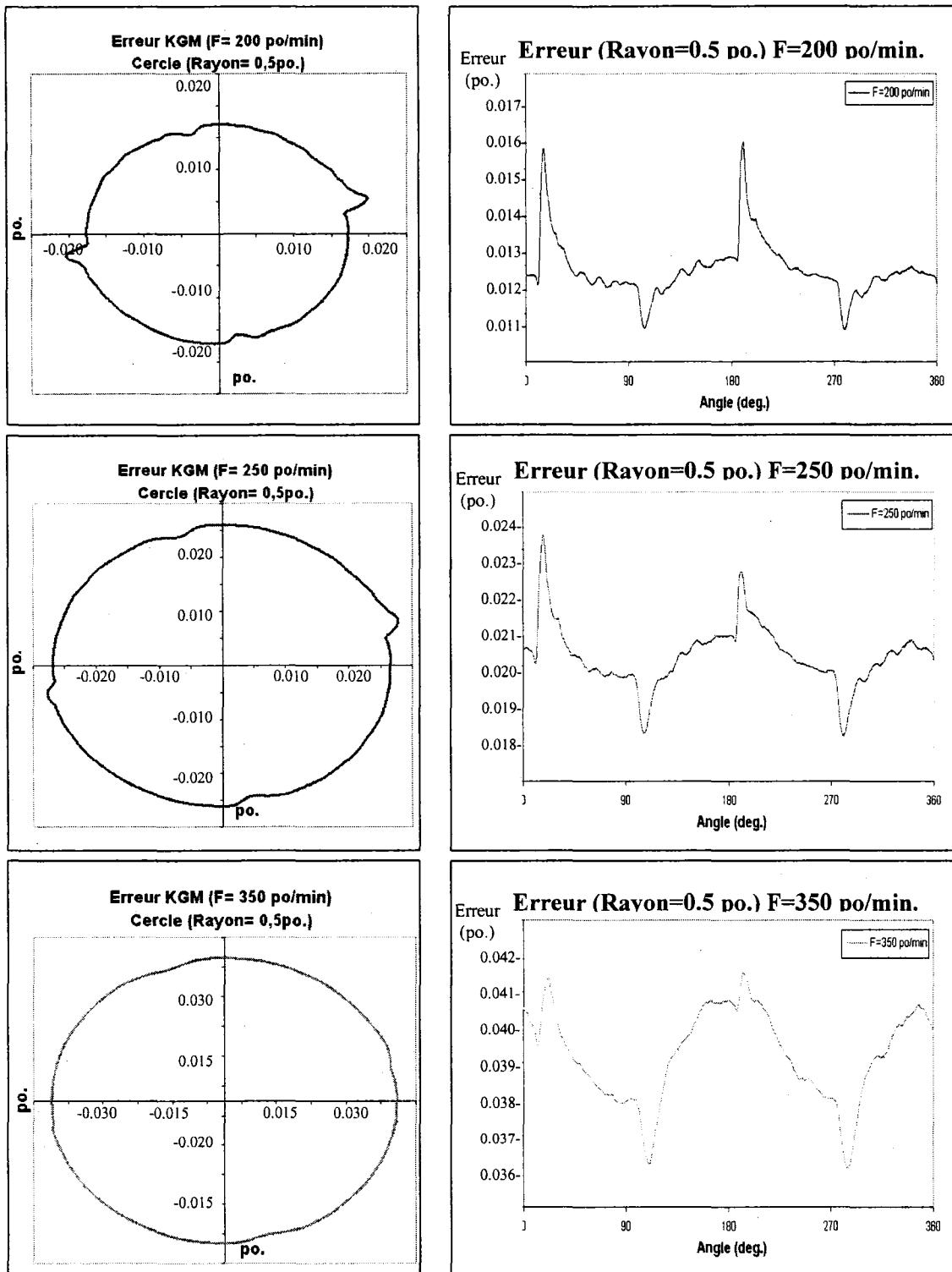


Figure 115 Erreur pour $R = 0,5 \text{ po.}$ avec $F = 200, 250 \text{ et } 350 \text{ po/min.}$

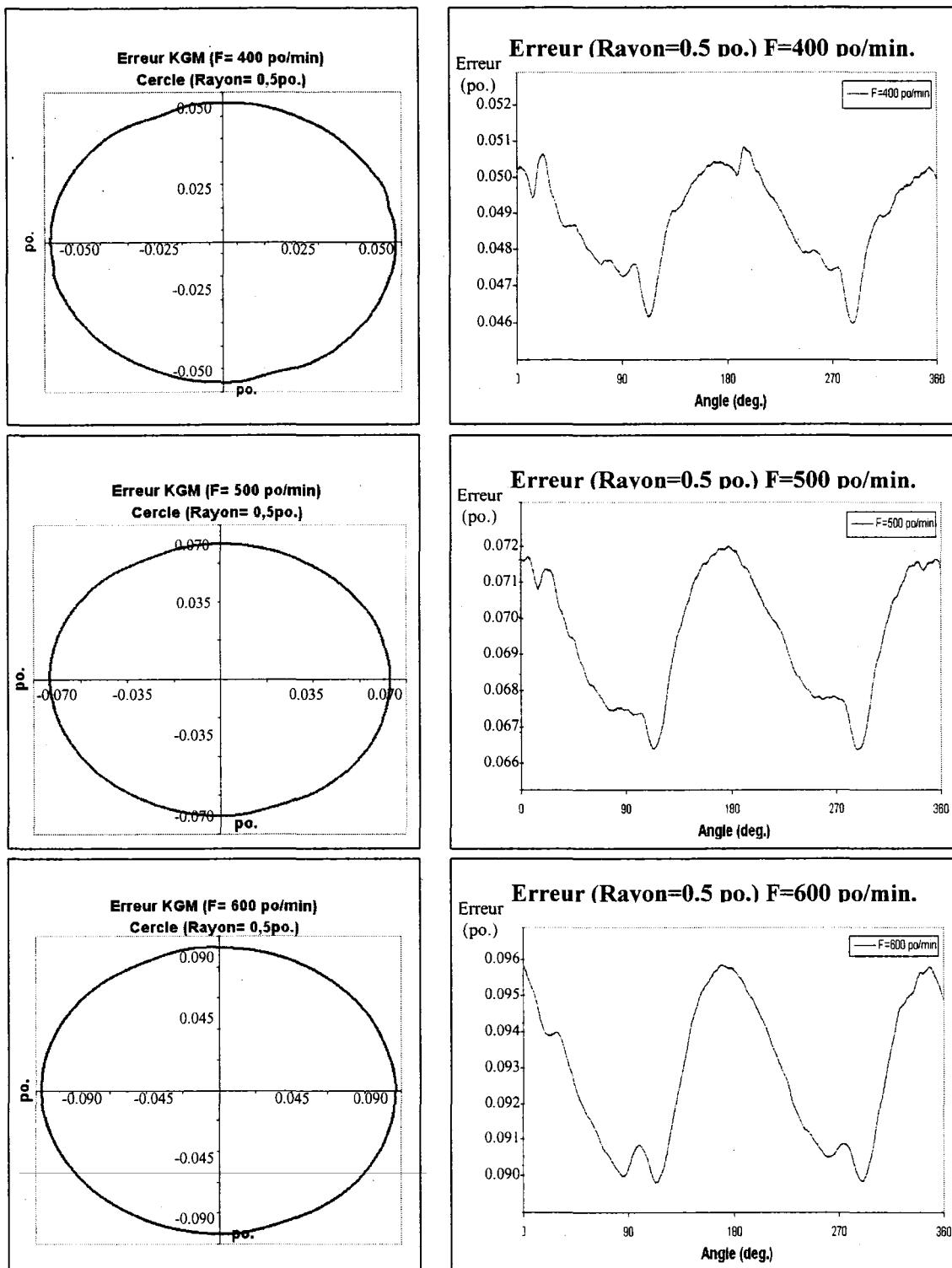


Figure 116 Erreur pour $R = 0,5 \text{ po.}$ avec $F = 400, 500$ et 600 po/min.

Les résultats expérimentaux des erreurs de parcours sont exprimés dans cette section pour une trajectoire circulaire mesurant 2 po. de rayon à une avance de 200, 250, 300, 350, 400, 500 et 600 po/min.

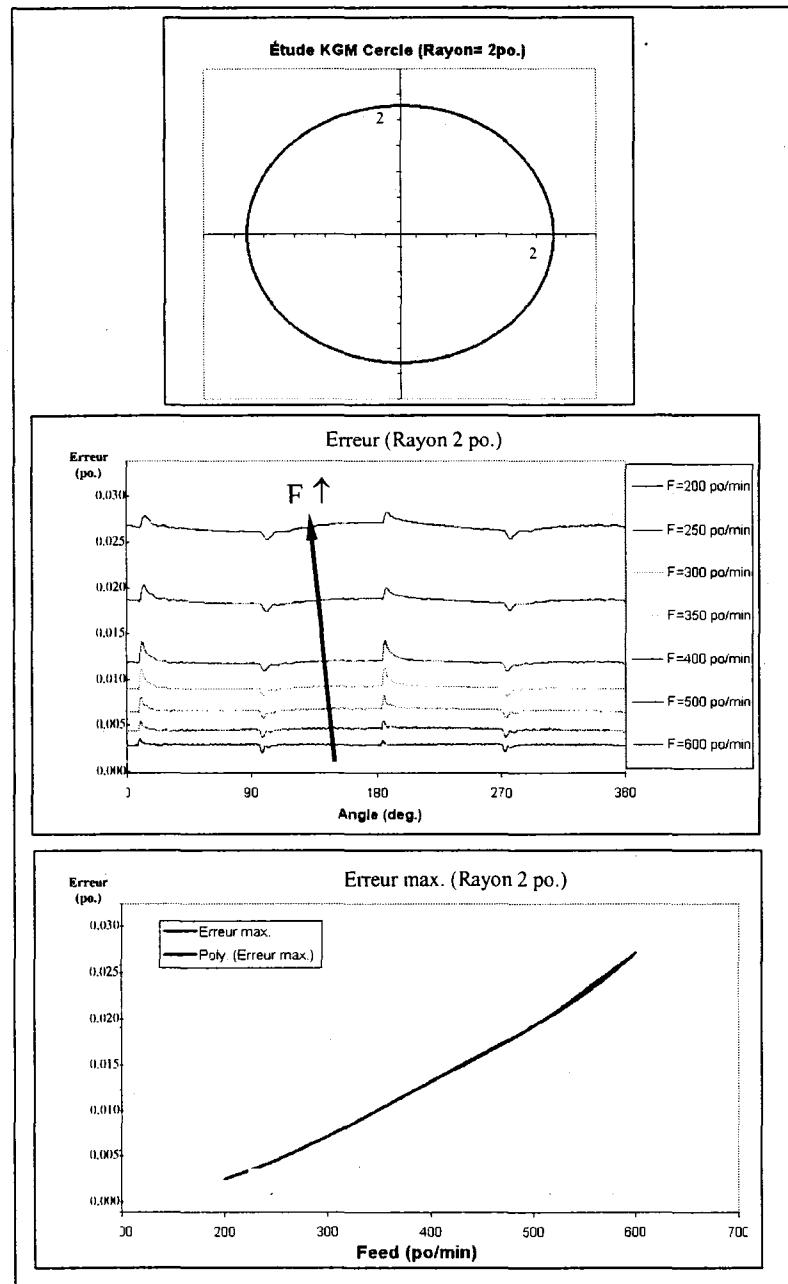
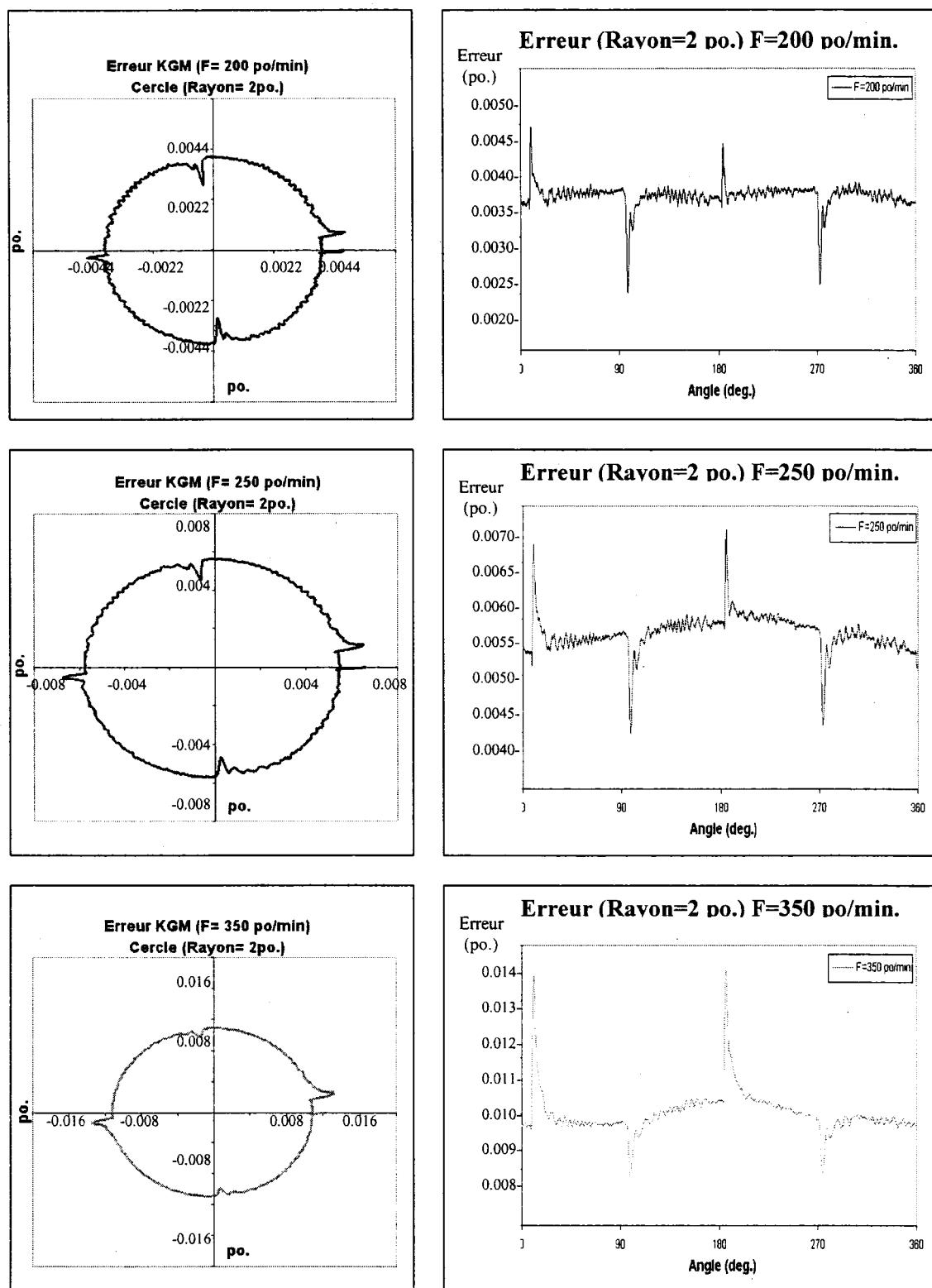
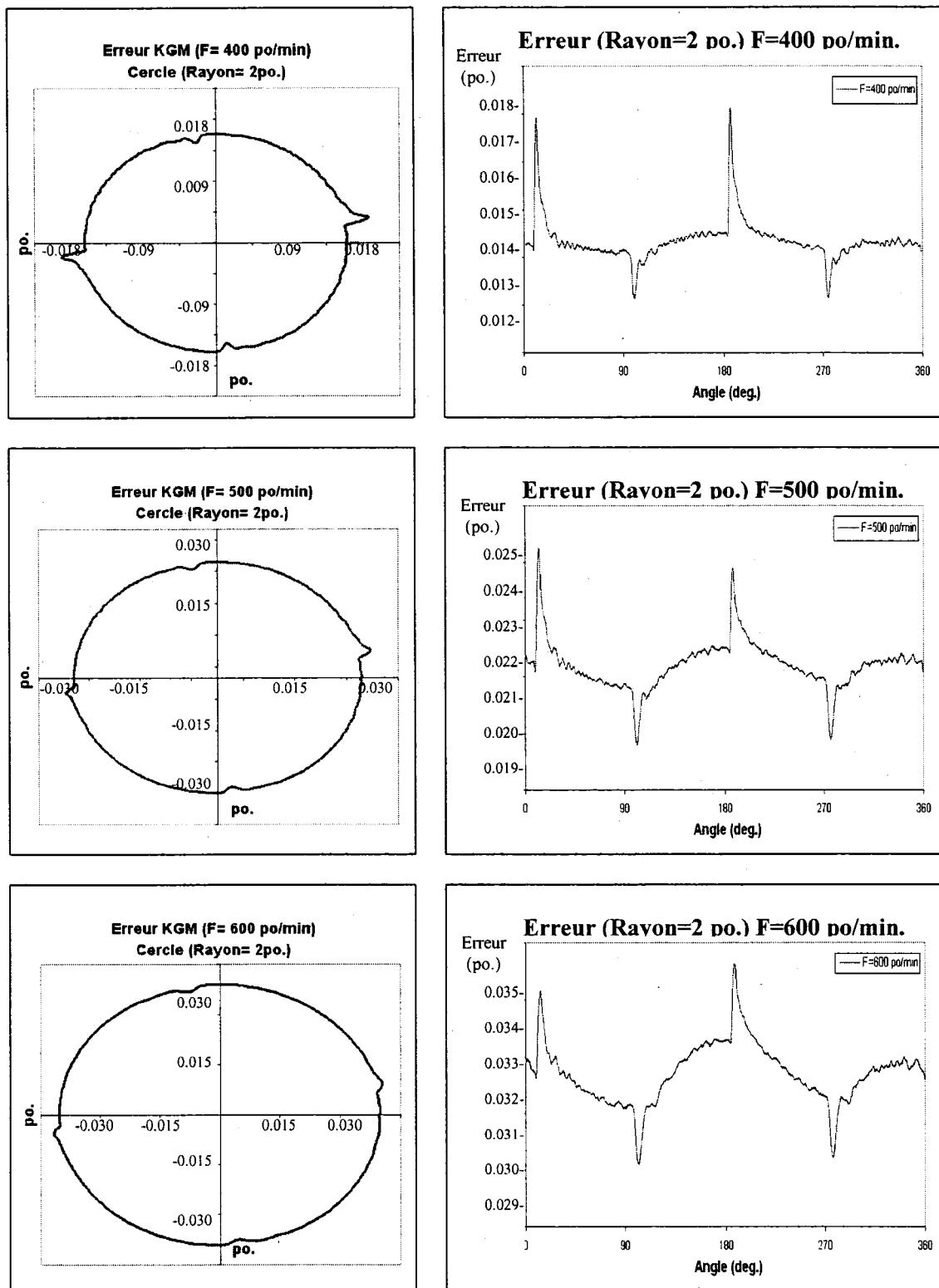


Figure 117 Erreur sur une trajectoire circulaire de 2 po.

Figure 118 Erreur pour $R = 2$ po. avec $F = 200, 250$ et 350 po/min.

Figure 119 Erreur pour $R = 2$ po. avec $F = 400, 500$ et 600 po/min.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. P. Raymer, *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, AIAA Education Series ed. Virginia, 1999.
- [2] J.-Y. Hascoet, A. Dugas, and J.-J. Lee, "Usinage grande vitesse - Simulation et prise en considération des limites machines," École Centrale de Nante, Nante 2000.
- [3] PTC, "Creating milling sequences with Pro/ENGINEER Wildfire 2.0." U.S.A., 2004.
- [4] M. Held, G. Lukacs, and L. Andor, "Pocket machining based on contour-parallel tool paths generated by means of proximity maps," *Computer-Aided Design*, vol. Vol.26, pp. pp.189-203, 1994.
- [5] S.-H. Bae, K. Ko, B. H. Kim, and B. K. Choi, "Automatic feedrate adjustment for pocket machining." Korea: Department of Industrial Engineering, 2001.
- [6] M. Monreal and C. A. Rodriguez, "Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling," Center for integrated manufacturing systems ed. Mexico: Elsevier Science Ltd, 2001.
- [7] M. B.Bieterman and D. R. Sandstrom, "A curvilinear tool-path method for pocket machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. Vol.125, pp. pp.709-715, 2003.
- [8] E. Lee, "Contour offset approach to spiral toolpath generation with constant scallop height," Sunchon National University ed. South Korea: Elsevier Science Ltd, 2003.
- [9] S.-G. Lee and S.-H. Yang, "CNC tool-path planning for high-speed high-resolution machining using a new tool-path calculation algorithm," *The international journal of advanced manufacturing technology*, vol. Vol.20, pp. pp.326-333, 2002.
- [10] S. Yan, W. Shuilai, and T. Shuguang, "Uneven offset method of NC tool path generation for free-form pocket machining," National Research Center of Mold Engineering ed. Republic of China: Elsevier Science Ltd, 2000.

- [11] H. S. Choy and K. W. Chan, "A corner-looping based tool path for pocket milling," The University of Hong Kong ed. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, 2001.
- [12] H. Wang, P. Jang, and J. A. Stori, "A metric-based approach to two-dimensional (2D) tool-path optimization for high-speed machining," *Journal of manufacturing science and engineering*, vol. Vol.127, pp. pp.33-48, 2005.
- [13] K. Lee, in *Principles of CAD/CAM/CAE systems*, A. Wesley, Ed. United States of America, 1999, pp. 149-187.
- [14] X. Liu, F. Ahmad, K. Yamazaki, and M. Mori, "Adaptive interpolation sheme for NURBS curves with the integration of machining dynamics," University of California ed. U.S.A.: Elsevier Science Ltd, 2004.
- [15] S. Jee and T. Koo, "Tool-path generation for NURBS surface machining," Dankook University, Seoul 2003.
- [16] Y. Altintas, in *Manufacturing automation*. British Columbia: Cambridge University, 2000, pp. 89-116.
- [17] E.Budak, Y.Altintas, and E.J.A.Armarego, "Prediction of milling forces coefficients from orthogonal cutting data.,," *Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 188, pp. 216-224, 1996.
- [18] Y. Boutin, in *Analyse de fabrication*. Montréal: École de technologie supérieure, 2001, pp. 144-152.
- [19] G. Warnecke and S. Siems, "Dynamics in high speed machining," in *Metal cutting and high speed machining*: University of Kaiserslautern, 2002, pp. 21-30.
- [20] S. Smith and D. Dvorak, "Tool path strategies for high speed milling aluminum workpieces with thin webs," University of North Carolina ed. North Carolina: Elsevier Science Ltd, 1998.