

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculte des Sciences et Technologie et des Sciences de la Matiere
Département Génie Mécanique



Mémoire

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Présenté par : GUENDOOUZ Abdelhak

Thème

**Sélection des Outils de Coupe pour
l'Évidement des Poches Triangulaires ,
Rectangulaires et Circulaires**

Soutenu publiquement

le : 26 /06/2013

Devant le jury :

M ^{me}	I. REZGUI	MA(B)	Président	UKM Ouargla
Mr	A. BELLOUFI	MA(A)	Encadreur	UKM Ouargla
M ^{me}	Dj. DAMENE	MA(B)	Examineur	UKM Ouargla

Année Universitaire :2012/2013

Dédicace

A ma famille, à tous mes amis

Remerciements

Tout d'abord, mes remerciements au Dieu, mon créateur de m'avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mon encadreur Mr. A.Belloufi d'avoir accepté de diriger ce travail et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens qui m'ont permis de mener à terme cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Je tiens aussi à remercier M^{me}. I. Rezgui pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.

Mes remerciements vont également au M^{me}. Dj. Damene pour s'être intéressé à ce travail et d'avoir bien voulu m'honorer de leur présence dans ce jury.

Enfin, mes remerciements vont tout particulièrement à tous les étudiants de ma promotion.

Table des matières

Introduction générale.....	3
-----------------------------------	----------

Chapitre I

Les méthodes d'évidement des poches

I.1	Introduction.....	4
I.2	Le fraisage.....	4
I.3	Les machines de fraisage	5
I.3.1	Les fraiseuses d'outillage (universelles)	6
I.3.2	Fraiseuses à commande numérique.....	7
I.4	les procédés de fraisage	8
I.4.1	Le fraisage en bout	8
I.4.2	Le fraisage en roulant.....	8
I.5	Les directions de fraisage	9
I.5.1	Fraisage en opposition.....	9
I.5.2	Fraisage en concordance ou fraisage "en avalant"	10
I.6	Le fraisage hémisphérique	10
I.7	Les conditions de coupe.....	11
I.7.1	Vitesse de coupe.....	11
I.7.2	Vitesse de broche	12
I.7.3	La vitesse d'avance	12
I.7.4	Avance par tour	12
I.7.5	Avance par dent.....	12
I.7.6	La profondeur de passe	13
I.7.7	Détermination du temps de coupe.....	13
I.8	Stratégie d'usinage des poches	14
I.8.1	Choix des outils et de leurs dimensions	14

I.8.2	Entrées et sorties de la matière.....	15
I.9	L'évidement des poches.....	15
I.9.1	Processus d'évidement d'une poche quelconque.....	16
I.9.2	Types de strategies d'usinage.....	17
I.10	Conclusion	18

Chapitre II

Modélisation de la trajectoire des outils de coupe pour l'évidement des poches

II.1	Introduction.....	19
II.2	Modèle analytique de trajectoire d'outil de coupe pour la partie intérieure	19
II.2.1	L'évidement des poches triangulaires	19
II.2.2	L'évidement des poches rectangulaire	26
II.3	Modèle analytique de trajectoires d'outils pour l'usinage des coins	31
II.3.1	Usinage des coins	31
II.4	L'évidement des poches circulaires.....	38
II.4.1	Modèle analytique de trajectoire d'outil de coupe pour la partie intérieure	38
II.5	Conclusion	40

Chapitre III

Optimisation du choix des outils de coupe

III.1	Introduction.....	41
III.2	Temps d'usinage	41
III.3	Formulation du modèle d'optimisation pour le choix des outils de coupe	42
III.3.1	Choix des variables du modèle.....	42
III.3.2	Formulation de l'objectif.....	42
III.3.3	Formulation des contraintes	42

III.4	La méthode de résolution.....	44
III.4.1	Avantages de la programmation quadratique séquentielle	44
III.5	Méthodologie d'optimisation.....	45
III.6	Traitement d'un trois exemples d'une poche :.....	46
III.6.1	Une poches triangulaires	46
III.6.2	Une poches rectangulaires	49
III.6.3	Une poches circulaires.....	52
III.7	Conclusion	54
Conclusion Générale.....		55
Bibliographie.....		56

Liste des figures

Chapitre I		
Les méthodes d'évidement des poches		
Figure I.1	Mouvements de coupe et d'avance.....	5
Figure I.2	Principe du fraisage.....	5
Figure I.3	Fraisage universelle.....	6
Figure I.4	Fraisage horizontal.....	7
Figure I.5	fraisage verticale.....	7
Figure I.6	Fraiseuse à commande numérique.....	8
Figure I.7	Fraisage en bout.....	8
Figure I.8	Fraisage en roulant.....	9
Figure I.9	Fraisage en opposition.....	9
Figure I.10	Fraisage en avalant.....	10
Figure I.11	Fraisage hémisphérique.....	10
Figure I.12	Les conditions de coupe.....	11
Figure I.13	Vitesse de coupe	11
Figure I.14	Vitesse de broche	12
Figure I.15	Vitesse de broche, vitesse de coupe et avances.....	13
Figure I.16	Fraisage en bout.....	14
Figure I.17	Fraisage en roulant.....	14
Figure I.18	Stratégies d'usinage pour l'évidement des poches.....	16
Figure I.19	Principe d'évidement de la poche.....	16
Figure I.20	Stratégie d'usinage en zigzag.....	17
Figure I.21	stratégie contour parallèle.....	17
Figure I.22	stratégie spirale.....	18
Chapitre II		
Modélisation de la trajectoire des outils de coupe pour l'évidement des poches		
Figure II.1	Paramètres d'une poche de contour triangulaire.....	19
Figure II.2	Représentation géométrique de h.....	20
Figure II.3	Segments horizontaux.....	22

Figure II.4	Segments de contournage.....	23
Figure II.5	Représentation des contours parallèles.....	24
Figure II.6	Représentation de la trajectoire spirale.....	25
Figure II.7	Paramètres d'une poche de contour rectangulaire.....	26
Figure II.8	Segments horizontaux.....	27
Figure II.9	Segments de contournage.....	28
Figure II.10	Représentation des contours parallèles.....	29
Figure II.11	Représentation de la trajectoire spirale.....	30
Figure II.12	Définition d'un coin.....	31
Figure II.13	Représentation de la surépaisseur W	32
Figure II.14	Trajectoire de l'outil dans le 1er cas.....	33
Figure II.15	Trajectoire de l'outil dans le 2ème cas.....	33
Figure II.16	Trajectoire de l'outil de coupe.....	34
Figure II.17	Représentation des limites de trajectoire de l'outil dans le coin.....	35
Figure II.18	Représentation des arcs parallèles.....	36
Figure II.19	Représentation des contours parallèles.....	38
Figure II.20	Paramètres d'une poche de contour circulaire.....	39
Figure II.21	La longueur L_0	39
Figure II.22	Périmètre de contournage.....	40

Chapitre III

Optimisation du choix des outils de coupe

Figure III.1	Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche triangulaire	43
Figure III.2	Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche rectangulaire.....	43
Figure III.3	Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche circulaire...	44
Figure III.4	Organigramme d'optimisation du choix des outils.....	45
Figure III.5	Longueurs de trajectoires dans la partie intérieure et coins pour une poche triangulaire.....	47
Figure III.6	Temps d'usinage de la poche triangulaire.....	48
Figure III.7	Longueurs de trajectoires dans la partie intérieure et coins pour une poche rectangulaire.....	50
Figure III.8	Temps d'usinage de la poche rectangulaire.....	51
Figure III.9	Longueurs de trajectoires dans la partie intérieure pour une poche circulaire.....	53
Figure III.10	Temps d'usinage de la poche circulaire.....	53

Liste des tableaux

Tableau III.1	Paramètres de la poche triangulaire.....	46
Tableau III.2	Outils de coupe.....	46
Tableau III.3	Conditions de coupe.....	46
Tableau III.4	Résultats d'optimisation pour la stratégie zig zag.....	48
Tableau III.5	Résultats d'optimisation pour la stratégie contour parallèle.....	49
Tableau III.6	Résultats d'optimisation pour la stratégie spirale.....	49
Tableau III.7	Paramètres de la poche rectangulaire.....	49
Tableau III.8	Résultats d'optimisation pour la stratégie zig zag.....	51
Tableau III.9	Résultats d'optimisation pour la stratégie contour parallèle.....	52
Tableau III.10	Résultats d'optimisation pour la stratégie spirale.....	52
Tableau III.11	Résultats d'optimisation pour la stratégie contour parallèle.....	54

Désignation des symboles

Symbole	Unité	Désignation
V_c	m / \min	Vitesse de coupe
n	tr / \min	Vitesse de broche
V_f	mm / \min	La vitesse d'avance
f_z	$mm / dent$	Avance par dent
Z		Nb dent
L_{01}	mm	Côtés 1
L_{02}	mm	Côtés 2
L_{03}	mm	Côtés 3
L_{04}	mm	Côtés 4
r_1	deg	Angle de poche 1
r_2	deg	Angle de poche 2
r_3	deg	Angle de poche 3
r_4	deg	Angle de poche 4
r_1	mm	Rayons de raccordement 1
r_2	mm	Rayons de raccordement 2
r_3	mm	Rayons de raccordement 3
r_4	mm	Rayons de raccordement 4
R	mm	Rayon d'outil
T_c	min	Temps de coupe
h	mm	La hauteur totale
n		Le nombre d'incrément
...		Coefficient de recouvrement d'usinage
E		Le coefficient de correction
P	mm	L'incrément
L_h	mm	Les segments horizontaux de longueur
L_{h1}	mm	Les segments horizontaux de la zone (1)
L_{h2}	mm	Les segments horizontaux de la zone (2)
n_1		Le nombre d'incrément dans la zone (1)

L_m	mm	La trajectoire entre incréments
L_c	mm	La trajectoire de contournage
L_{pi}	mm	La longueur totale de la trajectoire de l'outil dans la partie intérieure
X	mm	Segment de passage d'un contour à un autre
W_i	mm	La connaissance de la surépaisseur de la matière
R_1	mm	Rayon de l'outil de coins
L_{coin}	mm	Les segments de coins
n_c		Le nombre d'incrément dans les coins
P_c	mm	L'incrément dans les coins
L	mm	La longueur des arcs parallèles
α	deg	Angle
S_1	deg	Angle
S_2	deg	Angle
L_{arc}	mm	La longueur arc de rayon
R_c	mm	Rayon de cercle
L_0	mm	La longueur de segments dans cercle

Introduction générale

A ce jour, l'enlèvement de matière par outil coupant occupe toujours une place en termes de coût, dominante parmi les procédés de mise en forme des matériaux. [1]

Face à la concurrence internationale et l'accélération du progrès technique, les entreprises doivent continuellement améliorer leur productivité ainsi que la qualité de leurs produits. Les logiciels de conception et de fabrication assistée par ordinateur (CFAO) deviennent des outils indispensables, d'une part, pour l'automatisation de la production, d'autre part, pour la génération automatique du programme CN. Ces logiciels offrent actuellement un large éventail de typologies d'opérations associées à des générateurs de trajectoires d'usinage de plus en plus performants. Cependant, une méthodologie permettant de réaliser un choix optimisé du processus d'usinage et ses différents paramètres devient nécessaire. Ceci permettra aux systèmes FAO de générer les trajectoires optimales de l'outil de coupe. [2]

Actuellement, plusieurs approches sont développées pour optimiser certains paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe, etc.), en tenant compte d'un ou de plusieurs critères. [2]

Le travail réalisé au cours de cette étude a pour objectif de proposer une méthodologie d'optimisation du choix des outils de coupe pour l'usinage des poches triangulaires, rectangulaires et circulaires.

En vue d'appréhender la maîtrise de cette opération ainsi qu'à suivre la stratégie de trajectoire minimale pour réduire le temps d'usinage, le travail présenté dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

Le chapitre 1 présente un état de l'art sur les méthodes d'évidement des poches ; Le fraisage, Usinage des poches, mode d'usinage des poches, et les stratégies d'usinage des poches.

Le chapitre 2 constitue le fondement du travail par la proposition d'un modèle analytique de calcul de trajectoires des trois stratégies d'usinage « Zig Zag » et « Contour parallèles » et « spirale ».

Le chapitre 3 permet de faire le point sur la formulation du modèle d'optimisation pour le choix des outils de coupe en se basant sur la fonction objective et les contraintes liées au problème, nous expliquons enfin les algorithmes développés et nous traitons trois exemples d'usinage d'une poche.

Chapitre I

Les méthodes d'évidement des poches

I.1 Introduction

En mécanique industrielle, la fabrication d'une pièce à partir d'une quantité de matière livrée sous forme de produits semi-finis (tôles, barres, etc.) requiert la mise en œuvre d'un ensemble de techniques. L'une d'entre elles est l'usinage, c'est-à-dire un enlèvement de matière par un outil coupant. L'usinage d'une pièce se décompose en une succession d'opérations, définie par la gamme d'usinage établie par le bureau des méthodes à partir du dessin de définition issu du bureau d'études. L'usinage traditionnel s'effectue, en respectant les règles de la coupe des métaux, sur des machines-outils classiques ou automatisées. [2]

L'usinage des poches nécessite en général l'enlèvement d'un important volume de matière en ébauche ou en ébauche et finition combinées. D'un point de vue géométrique, une poche est constituée d'un fond et d'une surface latérale s'appuyant sur un contour ouvert ou fermé. Le contour et par suite la surface latérale comprend un contour externe et aucun ou plusieurs contours internes. Les portions de surface latérale s'appuyant sur des contours internes sont appelées îlots.

Dans ce chapitre nous présenterons les méthodes d'évidement des poches après une introduction sur le fraisage.

I.2 Le fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisé au moyen d'un outil multiple (à plusieurs arêtes de coupe) qui est animé d'un mouvement de rotation.

- Mouvement de rotation de la fraise qui est entraîné par la broche de la machine, Mc (mouvement rapide circulaire de coupe).
- Mouvement de translation de la pièce qui est fixée sur la table de la machine, Ma (mouvement lent rectiligne uniforme d'avance).

Le mouvement de translation est orienté de façon à pousser la pièce contre la fraise suivant une direction généralement perpendiculaire par rapport à son axe. [3]

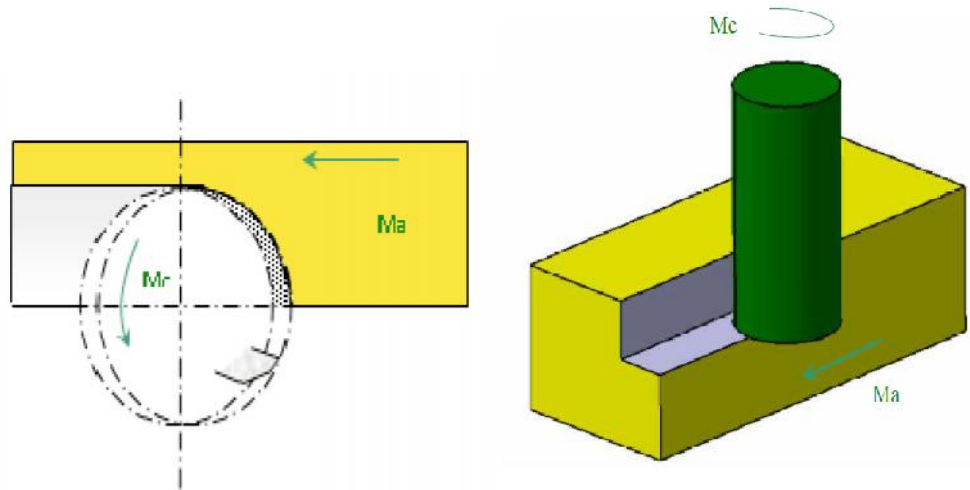


Figure I.1. Mouvements de coupe et d'avance. [3]

I.3 Les machines de fraisage

Les machines à fraiser servent à réaliser des surfaçages ainsi que l'usinage des surfaces de différentes formes ; elles permettent aussi de tailler les dents et l'usinage des surfaces de forme complexe. Les fraiseuses doivent leur appellation à la fraise, outil de coupe à dents multiples utilisée sur ces machines.

Le principe de travail de la fraiseuse est la combinaison d'un mouvement de coupe (rotation de la fraise sur la broche) avec un mouvement auxiliaire (translation de la table portant la pièce par rapport à la fraise) comme le montre la figure I.2 .

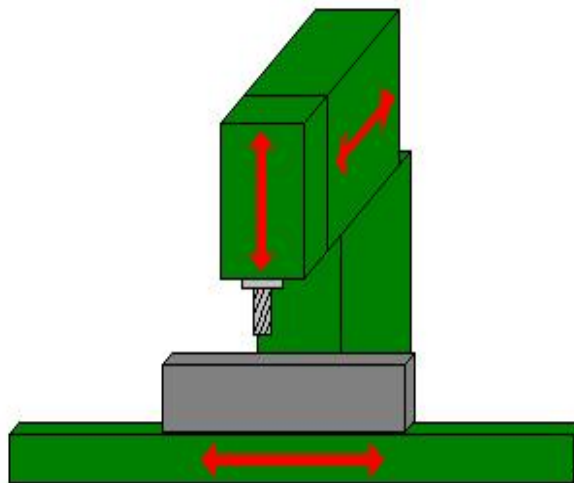


Figure I.2. Principe du fraisage

Les machines à fraiser les plus répandues en construction mécanique et dans l'usinage des métaux sont de trois types : la fraiseuse horizontale, la fraiseuse verticale et la fraiseuse universelle.

I.3.1 Les fraiseuses d'outillage (universelles)

Cette machine sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil est mis en rotation par le moteur de broche, il suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux. Ces petits éléments de matière sont appelés les copeaux .

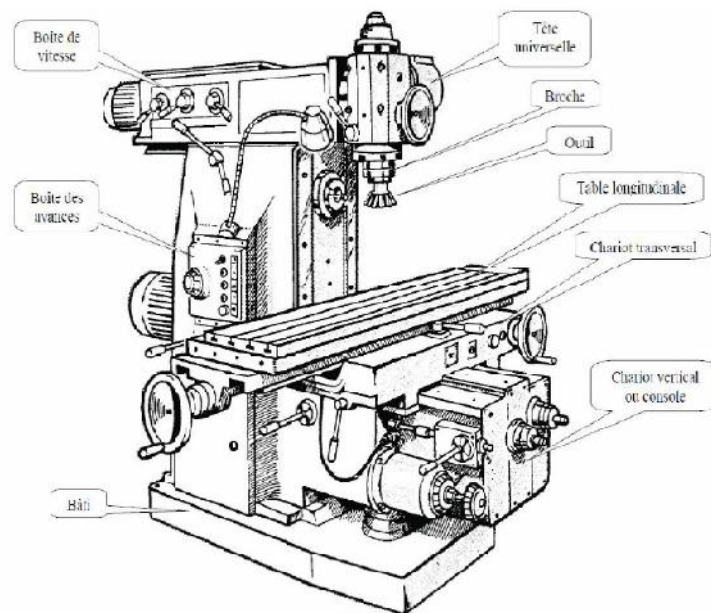


Figure I.3. Fraisage universelle [4]

I.3.1.1 Fraiseuse horizontale

Il y a des fraiseuses horizontales dont la table est mobile en translation selon les trois directions (mouvement latéral, transversal et vertical), peut aussi pivoter d'un certain angle, ce pivotement les classe dans la catégorie des fraiseuses universelles.

Dans ce cas, l'angle de rotation de la table est lu directement sur une échelle spéciale. Il y a des fraiseuses universelles qui offrent une possibilité d'inclinaison de la broche par rapport à la pièce pour donner plus de souplesse dans la réalisation des pièces par l'opérateur. [4]



Figure I.4. Fraisage horizontal. [2]

I.3.1.2 Fraiseuse verticale

Dans la fraiseuse verticale : l'axe de la broche est perpendiculaire à la table. [4]



Figure I.5. fraisage verticale. [2]

I.3.2 Fraiseuses à commande numérique

Le déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage est décrit par l'opérateur à l'aide d'un programme. On utilise pour cela les coordonnées des différents points de passage de l'outil par rapport à la pièce. Les mouvements sont possibles sur plusieurs axes simultanément.

Les mouvements sur les axes sont générés par des moteurs qui permettent aussi de choisir des vitesses d'avance. Le choix de ces vitesses s'effectue par un variateur. On dispose donc d'un large choix des vitesses. [5]



Figure I.6. Fraiseuse à commande numérique. [6]

I.4 les procédés de fraisage

I.4.1 Le fraisage en bout

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale. Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière.

La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure. [7]

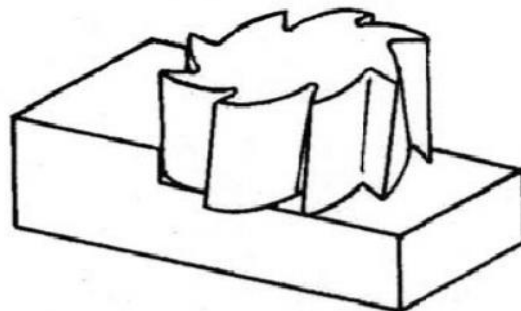


Figure I.7. Fraisage en bout. [7]

I.4.2 Le fraisage en roulant

L'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre. La charge de la machine en est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les à-coups provoqués par cette façon de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, on utilisera une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration enregistrée s'explique ainsi: la denture est chargée et déchargée Progressivement. [7]

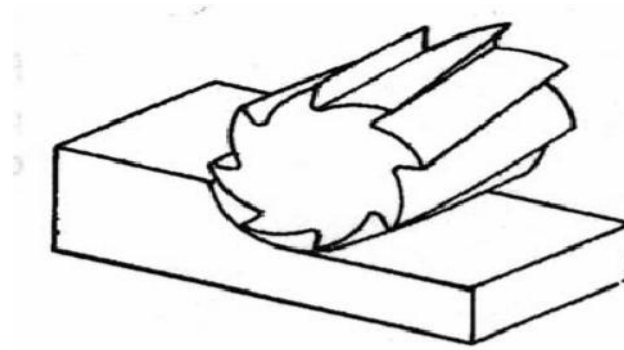


Figure I.8. Fraisage en roulant. [7]

I.5 Les directions de fraisage

La fraise effectue un mouvement de rotation tandis que la pièce avance dans sa direction. La coupe est donc ainsi définie par les paramètres impliqués. Il existe deux manières de procéder, selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce. Cette différence joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. La pièce peut avancer, selon le cas, dans le sens de la rotation ou dans le sens opposé, ce qui a tout spécialement son importance en début et en fin de coupe. [2]

I.5.1 Fraisage en opposition

Le mouvement d'avance de la pièce à fraiser est opposé au sens de rotation de la fraise. Cette dernière attaque le copeau au point d'épaisseur minimal. Dans ce cas, les dents glissent sur la surface usinée avant rotation de la fraise. Cette façon de faire provoque un grand frottement d'où une usure plus rapide des tranchants de la fraise. De plus, l'effort de coupe en fraisage horizontal tend à soulever la pièce à usiner. Les copeaux peuvent également être entraînés par la fraise et se coincer entre la pièce et les arêtes de coupe, endommageant la pièce et la fraise. [7]

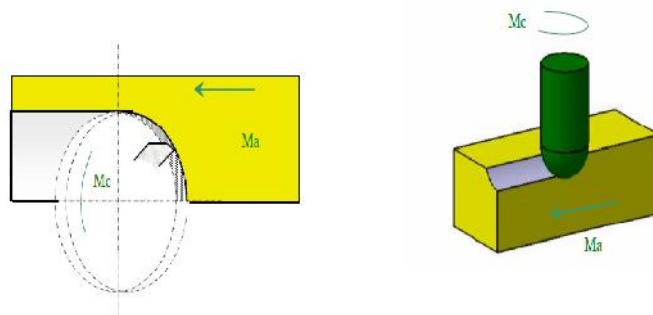


Figure I.9. Fraisage en opposition. [3]

I.5.2 Fraisage en concordance ou fraisage "en avalant"

Le sens de rotation de la fraise et celui du déplacement de la pièce à fraiser vont dans la même direction. Les tranchants de la fraise attaquent le copeau au point d'épaisseur maximal. Cette façon de faire, en fraisage horizontal, plaque la pièce sur la table de la fraiseuse et donne des surfaces finies de bonne qualité. Ce principe nécessite l'utilisation d'une machine robuste disposant d'une table équipée d'un système de translation avec rattrapage de jeu, ce qui est le cas sur les machines modernes. Ainsi on évite que la pièce soit "tirée" dans la fraise. [7]

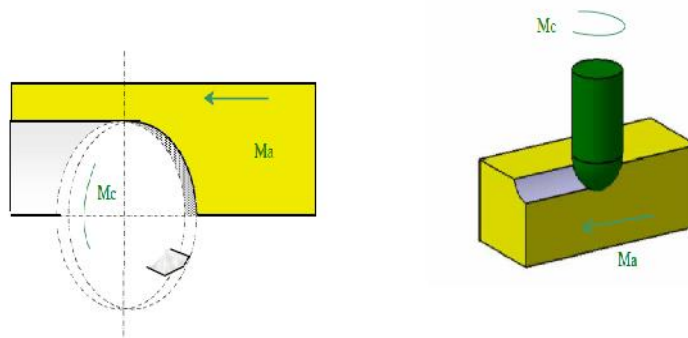


Figure I.10. Fraisage en avalant. [3]

I.6 Le fraisage hémisphérique

Une fraise à bout hémisphérique aussi appelée fraise sphérique, a une demi sphère au bout de l'outil. Les fraises à bout hémisphérique sont beaucoup utilisées dans l'usinage de filières, moules, et des pièces avec des surfaces complexes dans l'automobile, l'aérospatial et la Défense. [2]

Le diamètre effectif est le principal facteur utilisé dans le calcul de la vitesse de broche requise. Le diamètre effectif est défini comme le diamètre actuel de la fraise à la ligne axiale de profondeur de coupe. Le diamètre effectif est affecté par deux paramètres : rayon de l'outil et la profondeur de coupe axiale. [2]



Figure I.11. Fraisage hémisphérique. [2]

I.7 Les conditions de coupe

Le mouvement de coupe anime l'outil (fraise tournante). Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil. [5]

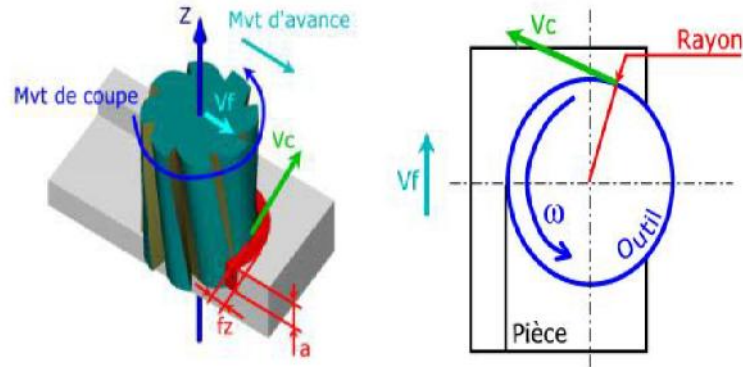


Figure I.12. Les conditions de coupe [5]

I.7.1 Vitesse de coupe

La vitesse de coupe indique pour sa part la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné.

La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par les formules suivantes. [8]

$$V_c = \frac{D f n}{1000} (m / \min) \quad (I.1)$$

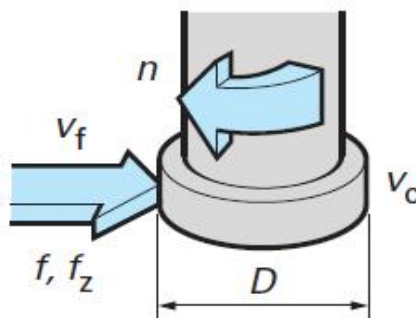


Figure I.13. Vitesse de coupe [8]

I.7.2 Vitesse de broche

La vitesse de rotation de la broche est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute. Il s'agit là d'une valeur dépendant de la machine, qui ne renseigne guère sur ce qui se passe à la périphérie où l'arête de coupe fait son office. [8]

$$n = \frac{1000 V_c}{D f} \text{ (tr / min)} \quad (I.2)$$

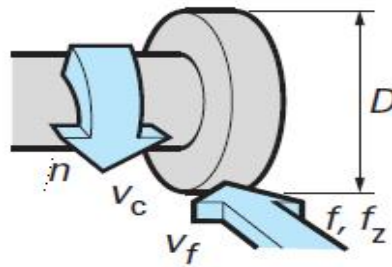


Figure I.14. Vitesse de broche. [8]

I.7.3 La vitesse d'avance

La vitesse d'avance est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de table. [8]

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot n \text{ (mm / min)} \quad (I.3)$$

I.7.4 Avance par tour

L'avance par tour est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfacer à travailler en finition. Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation. [8]

I.7.5 Avance par dent

L'avance par dent est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil à arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes.

La capacité d'enlèvement de matière de chaque dent est l'élément limitatif au niveau des performances de l'outil. L'avance par dent indique la distance linéaire parcourue par l'outil alors qu'une certaine dent est engagée.

L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc être exprimée en fonction du nombre d'arêtes de l'outil (z) et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par tour. [8]

$$f_z = \frac{V_f}{Z \cdot n} (\text{mm} / \text{dent}) \quad (\text{I.4})$$

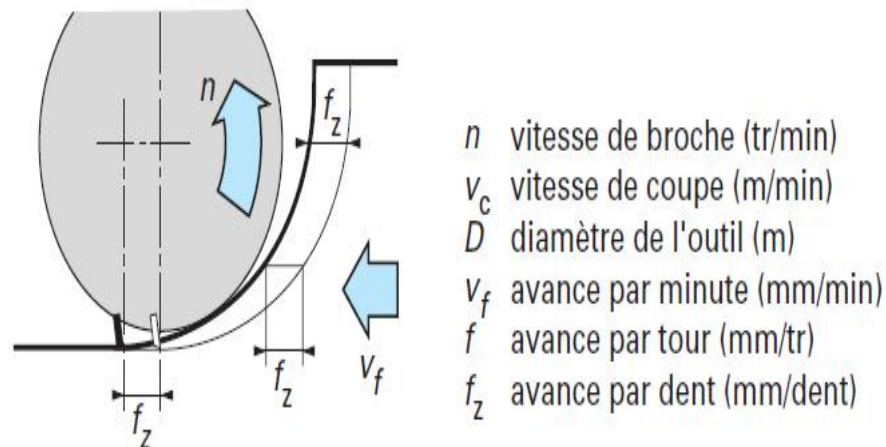


Figure I.15. Vitesse de broche, vitesse de coupe et avances. [8]

I.7.6 La profondeur de passe

La profondeur de passe (a en mm) correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. [2]

I.7.7 Détermination du temps de coupe

Nous déterminons ici le temps de coupe dans le cas de fraisage en bout et le cas de fraisage en roulant. [2]

I.7.7.1 Cas de fraisage en bout

$$T_c = \frac{D + L + l_1 + l_2}{1000 \cdot f_z \cdot V_c \cdot Z} \quad (\text{I.5})$$

L : Longueur de la fraise

l_1 : Longueur d'approche

l_2 : longueur de dégagement

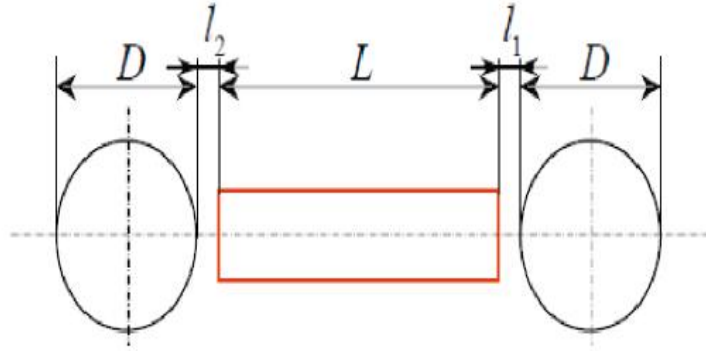


Figure I.16. Fraisage en bout [2]

I.7.7.2 Cas de fraisage en roulant

$$T_c = \frac{2\sqrt{a(D-a)} + l_1 + l_2 + L}{1000 f_z V_c Z} f D \quad (I.6)$$

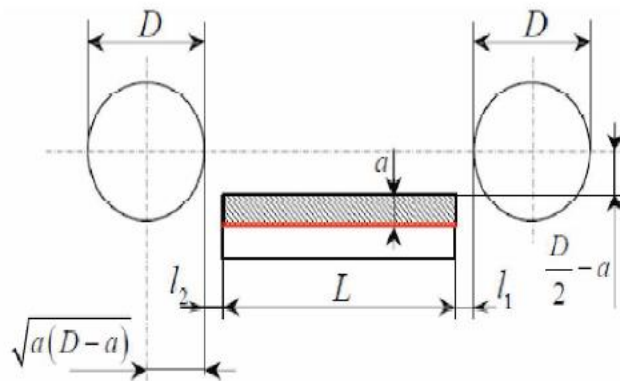


Figure I.17. Fraisage en roulant. [2]

I.8 Stratégie d'usinage des poches

Dans le cas de l'usinage de pièces simples ou prismatiques, les évolutions se situent dans l'organisation chronologique des différentes opérations et dans les trajectoires d'usinage. [9]

I.8.1 Choix des outils et de leurs dimensions

En ce qui concerne l'évidement d'une poche particulière ou d'un groupe de poche, l'optimal actuel consiste en la réalisation des opérations d'usinage avec un même outil dont le diamètre est le plus grand possible en fonction des rayons de raccordement. Cela s'oppose aux méthodes usuelles qui enchaînent le perçage d'un avant trou de passage de la fraise, l'évidement ébauche avec une fraise de grand diamètre, puis avec une de plus petit diamètre, jusqu'à obtenir la forme attendue.

Ce choix est justifié par trois constats. Déjà la puissance disponible ne permet pas forcément d'utiliser des outils de grand diamètre au mieux de leur performance. Puis on considère que le temps d'arrêt d'une broche grande vitesse, de changement de l'outil et de ré-stabilisation à haute fréquence de rotation est trop important, par rapport au gain apporté par l'emploi d'un outil de grand diamètre.

Enfin, la précision des machines-outils à commande numérique permet actuellement de réaliser des cylindres par contournage ayant une cylindricité suffisante. On peut donc considérer les alésages de grand diamètre comme des poches à profil circulaire obtenu par interpolation circulaire. On assiste donc à une minimisation du nombre d'outils dans la phase d'usinage, chaque outil étant utilisé pour réaliser plusieurs formes.

Il faut remarquer que cette règle repose uniquement sur l'analyse des performances dynamiques de la broche. Suivant celles-ci, une société pourrait conduire à un choix différent pour des raisons économiques. Néanmoins, il se poserait alors des problèmes d'usinage du fait des formes obtenues avec chaque outil. Si les diamètres sont différents, il n'est pas toujours possible de garantir des profondeurs de passe axiale constantes. [9]

I.8.2 Entrées et sorties de la matière

La principale contrainte associée à l'évidement des poches est de garantir le plus souvent possible une continuité de l'usinage pour assurer une continuité des sollicitations mécaniques appliquées à l'outil. Cela est totalement impossible à réaliser avec l'opération de perçage du trou de passage de la fraise qui ne sollicite pas l'outil dans des configurations normales et qui ne permet pas un refroidissement correct de l'outil.

Pour pallier cela, on utilise une stratégie d'entrée en pleine matière en colimaçon ou en feuille morte. L'outil est donc toujours en mouvement durant le percement du trou et la section de copeau est constante. L'outil fraise ne perce pas, cela impose des outils soit hémisphériques, soit toriques, qui évitent le talonnement durant la descente.

I.9 L'évidement des poches

L'évidement de la poche peut être réalisé par balayage ou en colimaçon. On préfère actuellement un usinage par balayage de l'extérieur vers l'intérieur pour les poches ayant une ouverture de passage de la fraise, et en colimaçon de l'intérieur vers l'extérieur pour les poches fermées. Ces solutions permettent de limiter le temps pendant lequel l'outil usine en pleine matière (rainurage). Il est nul avec la première stratégie très faible avec la seconde. On

évite donc le balayage des poches fermées. Le recours à des trajectoires en colimaçon permet aussi de choisir d'usiner en avalant ce qui est plutôt recommandé .

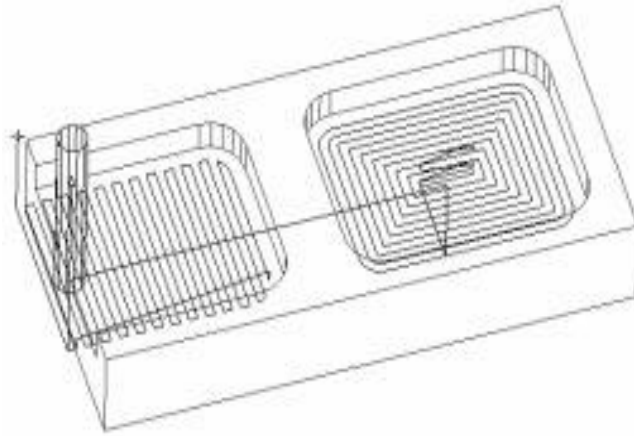


Figure I.18. Stratégies d'usinage pour l'évidement des poches.

Enfin, la recherche d'une section de copeau constante durant l'usinage impose la modification des trajectoires durant le balayage. On remplace actuellement les changements brusques de direction par des trajectoires suivant des arcs de cercle de raccordement.

I.9.1 Processus d'évidement d'une poche quelconque

L'évidement de la poche se fait en deux étapes :

- évidement de la partie intérieure « PI » (figure I.19 a) par un outil de rayon (R),
- reprise des coins par un outil de rayon (R1). (figure I.19 b). [10]

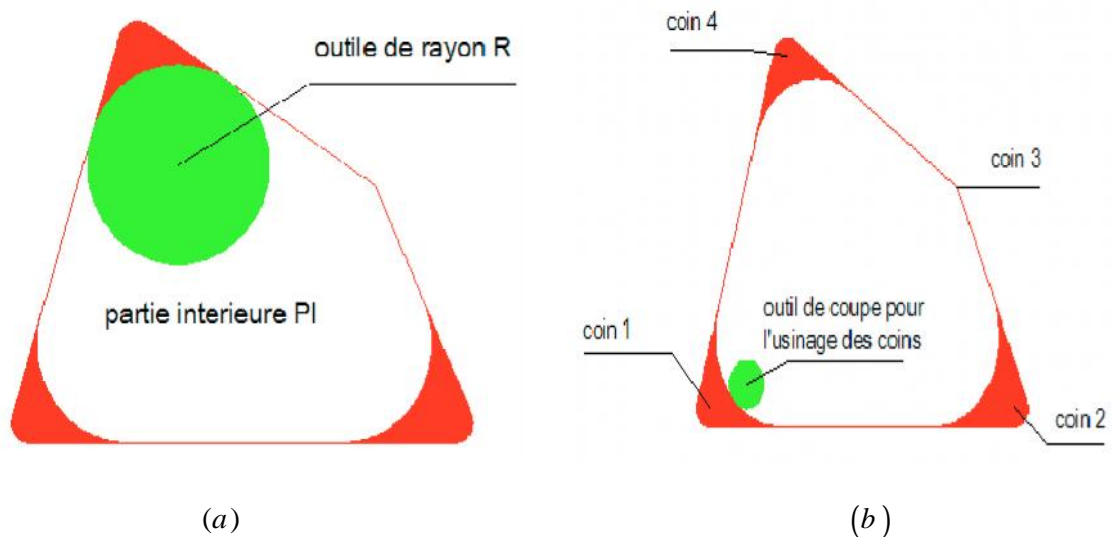


Figure I.19. Principe d'évidement de la poche. [10]

I.9.2 Types de strategies d'usinage

I.9.2.1 Stratégie Zig Zag

Avec cette stratégie, le balayage se fait suivant des passes parallèles à une direction donnée conduisant à une alternance de travail en opposition et en concordance. L'usinage en Zig-Zag génère des crêtes de matières sur le contour de la poche. Il est nécessaire dans ce cas d'utiliser un cycle de contournage de la poche pour enlever cette irrégularité de matière (figure I.20).

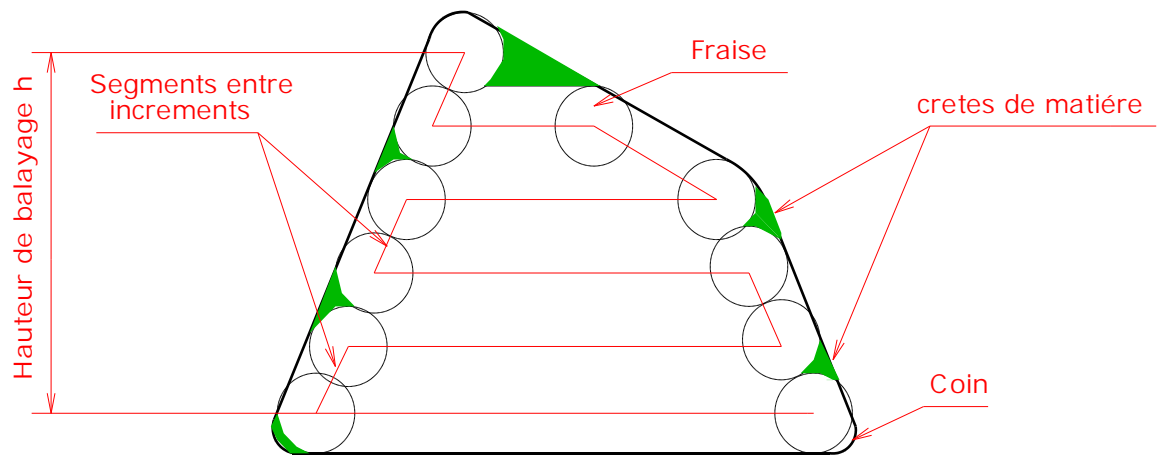


Figure I.20. Stratégie d'usinage en zigzag

I.9.2.2 Stratégie contours parallèles

Dans cette stratégie on utilise les contours de la poche pour construire des trajectoires décalées successivement, de préférence on commence l'usinage par le coin ou se trouve le plus petit angle pour araser les becquets à chaque passage de la fraise d'un contour à un autre (Figure I.21).

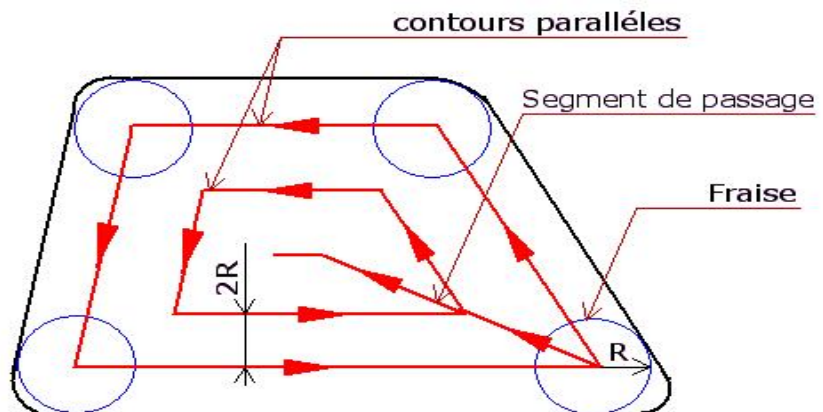


Figure I.21. Trajectoires de la stratégie contour parallèle

I.9.2.3 Stratégie contour spirale

De même que pour la stratégie précédente la trajectoire suit le contour de la poche de façon continue jusqu'au dernier contour sans segments de passage mais au départ l'usinage doit commencer à partir de la fin du plus long segment.

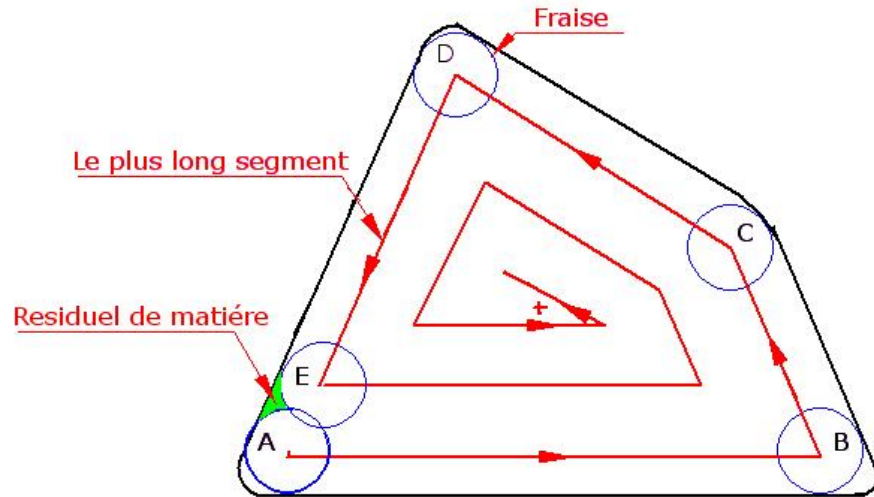


Figure I.22. Trajectoires de la stratégie contour spirale

I.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre de notre étude les principaux procédés d'usinage ainsi que les outils et les stratégies utilisés dans l'évidement des poches, pour pouvoir réaliser une modélisation de trajectoires des outils de coupe.

Chapitre II

Modélisation de la trajectoire des outils de coupe pour l'évidement des poches

II.1 Introduction

La connaissance de la trajectoire des outils de coupe pour l'évidement des poches repose essentiellement sur les méthodes d'exécution ainsi que sur les ressources de fabrication.

Nous proposons donc une modélisation de trajectoires des outils de coupe en utilisant les trois stratégies d'usinage précédentes, En prenant trois formes triangulaire , rectangulaire et circulaire . ce chapitre se décompose en deux parties. La première est concentrée sur le développement d'un modèle d'évidement de la partie intérieure de la poche. La deuxième partie consiste a la reprise des coins.

II.2 Modèle analytique de la trajectoire d'outil de coupe pour la partie intérieure

II.2.1 L'évidement des poches triangulaires

En général, l'opération d'usinage se compose de trois opérations élémentaires (ébauche, demi-finition et finition). Dans le cadre de la génération du processus d'usinage, nous avons appliqué les techniques d'évidement de poche à l'ébauche des cavités simples et profondes.

Les paramètres de la poche sont : trois côtés (L_{01} , L_{02} et L_{03}), trois angles α_i , trois rayons de raccordement r_i ($i = 1, 2, 3$). La figure présente le contour d'une poche de forme triangulaire avec les différents paramètres.

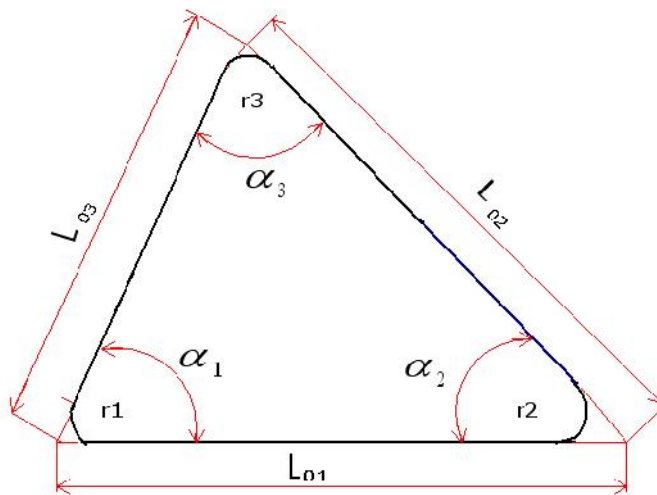


Figure II.1. Paramètres d'une poche de contour triangulaire

a. Stratégie Zig Zag

- Calcul de La hauteur (h)

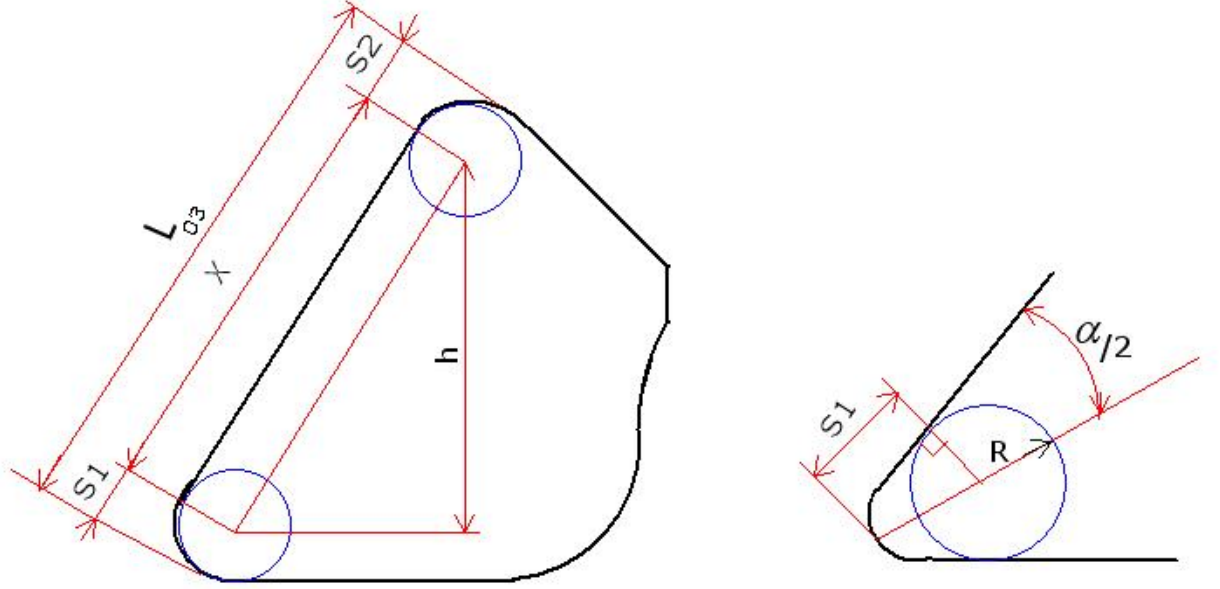


Figure II.2. Représentation géométrique de h

On a :

$$\sin r_1 = \frac{h}{x} \Rightarrow h = x \sin r_1$$

Avec :

$$x = L_{03} - s_1 - s_2$$

et

$$\cotg \left(\frac{r_1}{2} \right) = \frac{s_1}{R} \Rightarrow s_1 = R \cotg \left(\frac{r_1}{2} \right)$$

Et la même chose pour s_2 :

$$s_2 = R \cotg \left(\frac{r_3}{2} \right)$$

X devient

$$x = L_{03} - R \cotg \left(\frac{r_1}{2} \right) - R \cotg \left(\frac{r_3}{2} \right)$$

Alors :

$$h = \left[L_{03} - R \cotg \left(\frac{r_1}{2} \right) - R \cotg \left(\frac{r_3}{2} \right) \right] \sin r_1 \quad (II.1)$$

- Calcul de l'incrément (p)

Le nombre d'incréments est donné par l'équation suivante:

$$n = E\left(\frac{h}{2...R}\right) + 1 = E\left[\frac{\left[L_{03} - R \cotg\left(\frac{r_1}{2}\right) - R \cotg\left(\frac{r_3}{2}\right)\right] \sin r_1}{2...R}\right] + 1 \quad (II.2)$$

Avec : $... < 1$ Coefficient de recouvrement d'usinage.

Calcul de E :

On distingue deux cas :

1^{er} cas : $\frac{h}{2...R} = k$ tel que k : nombre entier

$$\text{Alors } E\left(\frac{h}{2...R}\right) + 1 = \frac{h}{2...R} - 1 + 1 \Rightarrow E = 1 - \frac{2...R}{h}$$

2^{ème} cas : $\frac{h}{2...R} = k + v$ tel que : v : nombre réel compris entre 0 et 1.

$$E = \frac{\text{integer}\left(\frac{h}{2...R}\right)}{\frac{h}{2...R}}$$

L'incrément « p » entre deux passes est calculé pour un nombre entier « n », il est exprimé par l'équation :

$$p = \frac{\left[L_{03} - R \cotg\left(\frac{r_1}{2}\right) - R \cotg\left(\frac{r_3}{2}\right)\right] \sin r_1}{n} \quad (II.3)$$

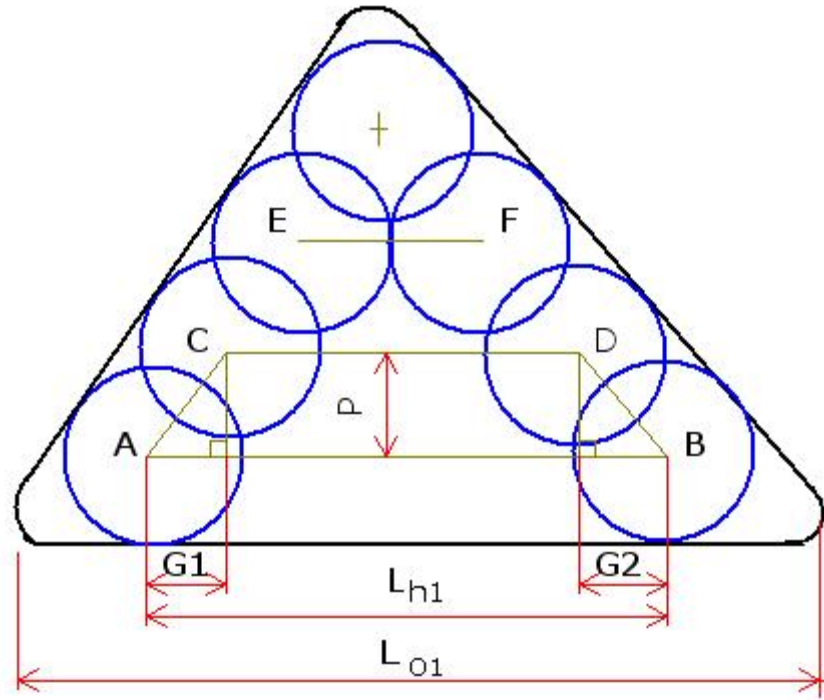


Figure II.3. Segments horizontaux.

- Longueur des segments horizontaux

Le nombre de segments horizontaux égal : $n + 1$

La longueur totale des segments horizontaux est :

$$L_h = \sum_{i=1}^{n+1} L_{hi} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$L_{h1} = L_{o1} - R \cotg \left(\frac{r_1}{2} \right) - R \cotg \left(\frac{r_2}{2} \right)$$

$$\text{Et } L_{h2} = L_{h1} - G_1 - G_2$$

Alors que :

$$\cotg r_1 = \frac{G_1}{p} \Rightarrow G_1 = p \cotg r_1 \text{ et } G_2 = p \cotg r_2$$

Donc :

$$L_{h2} = \left[L_{o1} - R \cotg \left(\frac{r_1}{2} \right) - R \cotg \left(\frac{r_2}{2} \right) - p(\cotg r_1 + \cotg r_2) \right]$$

$$L_{hi} = \left[L_{0i} - R \cotg \left(\frac{r_1}{2} \right) - R \cotg \left(\frac{r_2}{2} \right) - p(i-1)(\cotg r_1 + \cotg r_2) \right]$$

La longueur totale des segments horizontaux devient :

$$L_h = \sum_{i=1}^{n+1} \left[L_{0i} - R \cotg \left(\frac{r_1}{2} \right) - R \cotg \left(\frac{r_2}{2} \right) - p(i-1)(\cotg r_1 + \cotg r_2) \right] \quad (II.5)$$

$$\text{Avec : } n = \text{entier} \left(\frac{lv * \sin r_2}{p} \right)$$

$$\text{Et : } lv = L_{02} - R * \cot \frac{r_2}{2} - R * \cot \frac{r_3}{2}$$

(II.6)

- Modèle analytique de la trajectoire entre incréments L_m

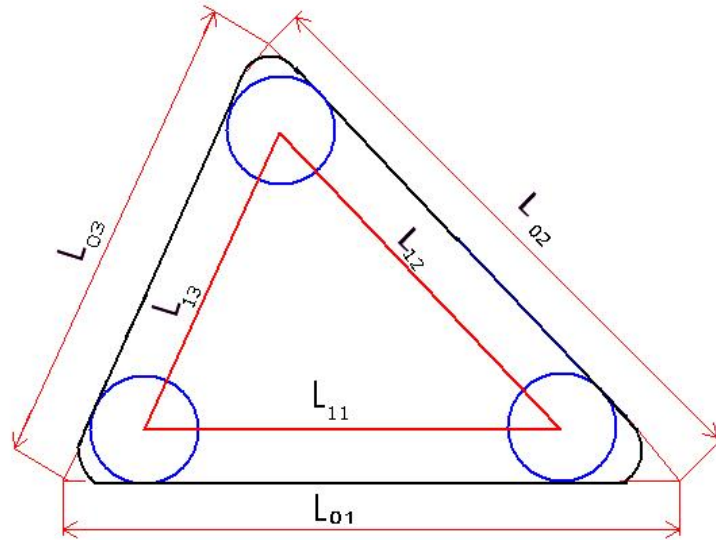


Figure II.4. Segments de contournage.

$$L_m = \frac{L_{12}}{2} + \frac{L_{13}}{2}$$

$$L_{12} = L_{02} - R \left(\cot g \left(\frac{r_2}{2} \right) + \cot g \left(\frac{r_3}{2} \right) \right)$$

$$L_{13} = L_{03} - R \left(\cot g \left(\frac{r_1}{2} \right) + \cot g \left(\frac{r_3}{2} \right) \right)$$

Donc :

$$L_m = \frac{1}{2} \left[L_{02} + L_{03} - R \left(\cot g \left(\frac{r_1}{2} \right) + \cot g \left(\frac{r_2}{2} \right) + 2 \cot g \left(\frac{r_3}{2} \right) \right) \right] \quad (II.7)$$

- Modèle analytique de la trajectoire de contournage L_c

$$L_c = L_{11} + L_{12} + L_{13}$$

$$L_c = L_{01} + L_{02} + L_{03} - 2R \left(\cot g \left(\frac{r_1}{2} \right) + \cot g \left(\frac{r_2}{2} \right) + \cot g \left(\frac{r_3}{2} \right) \right)$$

(II.8)

- La longueur totale de la trajectoire de l'outil de coupe dans la partie intérieure « L_{pi} »

$$L_{pi} = L_h + L_m + L_c \quad (II.9)$$

b. Stratégie contour parallèle

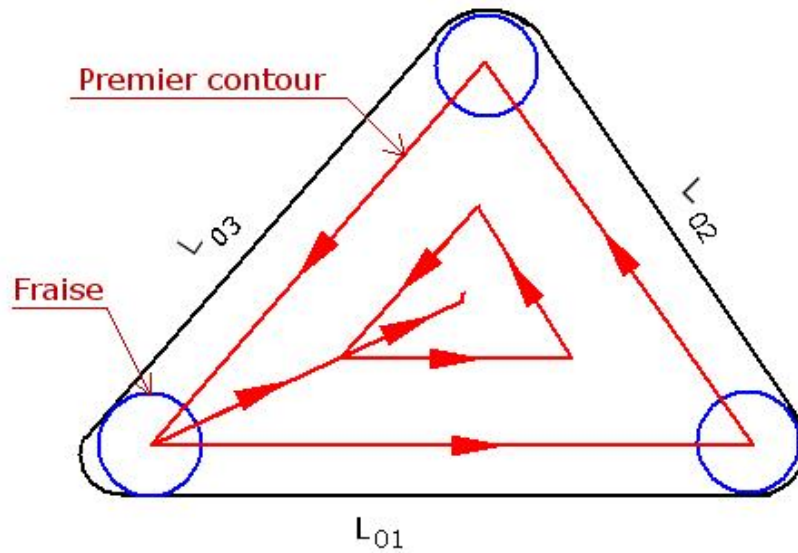


Figure II.5. Représentation des contours parallèles.

- Nombre d'incrément n
 n : c'est le nombre de contours moins un.
- Calcul du segment de passage d'un contour a un autre X_i

$$\text{On a : } \sin \frac{r_i}{2} = \frac{2 \dots R}{X} \text{ d'ou } X = \frac{2 \dots R}{\sin \frac{r_i}{2}}$$

$$\text{Alors : } X_i = X \times n \quad (II.10)$$

Longueur des contours

$$L_{pi} = L_{11} + L_{12} + L_{13} + L_{21} + L_{22} + L_{23} + L_{31} + L_{32} + L_{33} + + L_{n1} + L_{n2} + L_{n3} + X_t$$

$$L_{ij} = L_{(i-1)j} - Y \left(\cot g \left(\frac{r_j}{2} \right) + \cot g \left(\frac{r_{j+1}}{2} \right) \right) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$i = 1, \dots, n$ (n : Nombre de segments parallèles à chaque arête).

$j = 1, \dots, 3$ (Nombre des segments du contour).

- Lorsque $j + 1$ dépasse le nombre des segments du contour (m) on pose $j + 1 = 1$ vu que le contour est fermé.
- Pour déterminer la longueur du premier contour on pose $Y = R$ outre $Y = 2 \dots R$
- Le calcul s'arrête lorsque la longueur du dernier contour sera égale à zéro.

c. Stratégie contour spirale

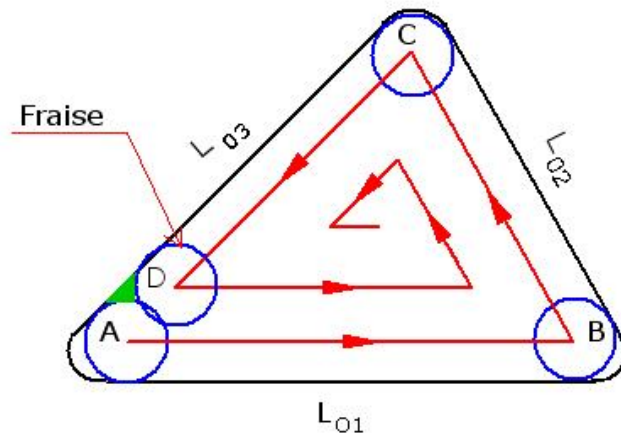


Figure II.6. Représentation de la trajectoire spirale.

- Nombre d'incrément n
 n : c'est le nombre de contours moins un.

- Longueur des contours

$$L_{pi} = L_{11} + L_{12} + L_{13} + L_{21} + L_{22} + L_{23} + L_{31} + L_{32} + L_{33} + + L_{n1} + L_{n2} + L_{n3}$$

$$L_{ij} = L_{(i-1)j} - Y \left(\cot g \left(\frac{r_j}{2} \right) + \cot g \left(\frac{r_{j+1}}{2} \right) \right) \quad (\text{II.12})$$

Si $i = 1$ et $j = 3$

$$L_{ij} = L_{(i-1)j} - Y \left(\cot g \left(\frac{r_j}{2} \right) + \cot g \left(\frac{r_{j+1}}{2} \right) \right) + \overline{AD} \quad (II.13)$$

Tel que :

$$\overline{AD} = \frac{2 \dots R}{\sin r_1}$$

II.2.2 L'évidement des poches rectangulaire

Les paramètres de la poche sont : trois côtés (L_{01}, L_{02}, L_{03} et L_{04}), quatre angles r_i , quatre rayons de raccordement r_i ($i = 1, 2, 3, 4$). La figure présente le contour d'une poche de forme rectangulaire avec les différents paramètres .



Figure II.7. Paramètres d'une poche de contour rectangulaire

d. Stratégie Zig Zag

- Calcul de La hauteur (h)

La hauteur est donné par l'équation suivante :

$$h = (L_{02} - 2R)$$

(II.14)

- Calcul de l'incrément (p)

Le nombre d'incréments est donné par l'équation suivante:

$$n = E \left(\frac{h}{2 \dots R} \right) + 1 = E \left[\frac{L_{02} - 2R}{2 \dots R} \right] + 1 \quad (II.15)$$

Avec : $\dots < 1$

Calcul de E :

On distingue deux cas :

1^{er} cas : $\frac{h}{2...R} = k$ tel que k : nombre entier

$$\text{Alors : } E \left(\frac{h}{2...R} \right) + 1 = \frac{h}{2...R} - 1 + 1 \Rightarrow E = 1 - \frac{2...R}{h} \quad (\text{II.16})$$

2^{ème} cas : $\frac{h}{2...R} = k + v$ tel que : v : nombre réel compris entre 0 et 1.

$$E = \frac{\text{integer} \left(\frac{h}{2...R} \right)}{\frac{h}{2...R}} \quad (\text{II.17})$$

L'incrément « p » entre deux passes est calculé pour un nombre entier « n », il est exprimé par l'équation :

$$p = \frac{(L_{02} - 2R)}{n} \quad (\text{II.18})$$

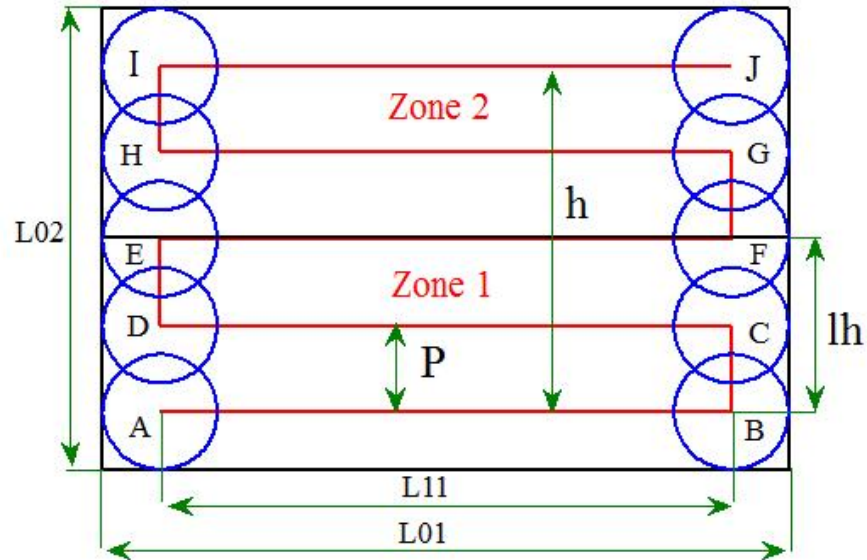


Figure II.8. Segments horizontaux.

- Longueur des segments horizontaux

Pour déterminer la longueur de la trajectoire d'un outil de coupe de rayon R on décompose la partie intérieure de la poche en deux zones (figure II.8). La longueur des segments horizontaux est déterminée zone par zone. On cherche pour chaque zone un modèle analytique pour calculer cette longueur, on aura L_h égale à la somme des L_{hi} relatives à chaque zone :

$$L_h = L_{h1} + L_{h2} \quad (\text{II.19})$$

- Longueur des segments horizontaux de la zone (1) L_{h1}

Le nombre de segments horizontaux égal : $n + 1$

$$L_h = (n + 1)(L_{11}) \quad (\text{II.20})$$

Avec:

$$L_{11} = L_{01} - 2R$$

La longueur totale des segments horizontaux de la zone (1) est :

$$L_{h1} = \sum_{i=1}^{n_1+1} [(i - 1)(L_{01} - 2R)] \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Avec } n_1 = \text{entier} \left(\frac{lh}{p} \right)$$

$$\text{Et : } lh = \left(\frac{L_{02}}{2} - R \right)$$

- Longueur des segments horizontaux de la zone (2) L_{h2}

$$L_{h2} = \sum_{i=1}^{n_2} [(i - 1)(L_{01} - 2R)] \quad \text{Avec : } n_2 = n - n_1 \quad (\text{II.22})$$

- Modèle analytique de la trajectoire entre incréments L_m

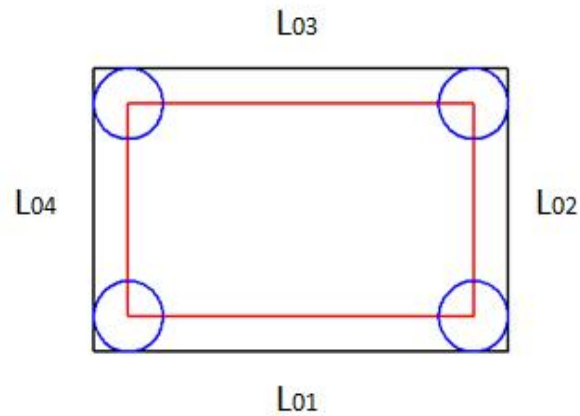


Figure II.9. Segments de contournage.

$$L_m = \frac{L_{12}}{2} + \frac{L_{14}}{2}$$

$$L_{12} = L_{02} - 2R$$

$$L_{14} = L_{04} - 2R$$

Donc :

$$L_m = \frac{1}{2}(L_{02} + L_{04} - 4R) \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Et : } L_{02} = L_{04}$$

Alors :

$$L_m = L_{04} - 2R \quad (\text{II.24})$$

- Modèle analytique de la trajectoire de contournage L_c

$$L_c = L_{11} + L_{12} + L_{13} + L_{14}$$

$$L_c = L_{01} + L_{02} + L_{03} + L_{04} - 8R$$

(II.25)

- La longueur totale de la trajectoire de l'outil de coupe dans la partie intérieure « L_{pi} »

$$L_{pi} = L_h + L_m + L_c \quad (\text{II.26})$$

e. Stratégie contour parallèle

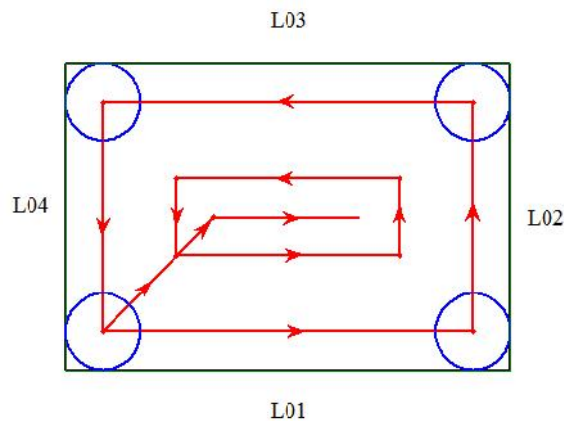


Figure II.10. Représentation des contours parallèles.

- Nombre d'incrément n

n : c'est le nombre de contours moins un.

- Calcul du segment de passage d'un contour a un autre X_t

$$\text{On a : } \sin \frac{r_i}{2} = \frac{2...R}{X} \text{ d'ou } X = \frac{2...R}{\sin \frac{r_i}{2}}$$

$$\text{Alors : } X_t = X \times n \quad (\text{II.27})$$

Longueur des contours

$$L_{pi} = L_{11} + L_{12} + L_{13} + L_{14} + L_{21} + L_{22} + L_{23} + L_{24} + L_{31} + L_{32} + L_{33} + L_{34} + \\ + L_{n1} + L_{n2} + L_{n3} + L_{n4} + X_t$$

$$L_{ij} = L_{(i-1)j} - Y \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$i = 1, ..., n$ (n : Nombre de segments parallèles à chaque arrête).

$j = 1, ..., 4$ (Nombre des segments du contour).

- Lorsque $j + 1$ dépasse le nombre des segments du contour (m) on pose $j + 1 = 1$ vu que le contour est fermé.
- Pour déterminer la longueur du premier contour on pose $Y = 2R$ outre $Y = 2...R$
- Le calcul s'arrête lorsque la longueur du dernier contour sera égale à zéro.

f. Stratégie contour spirale

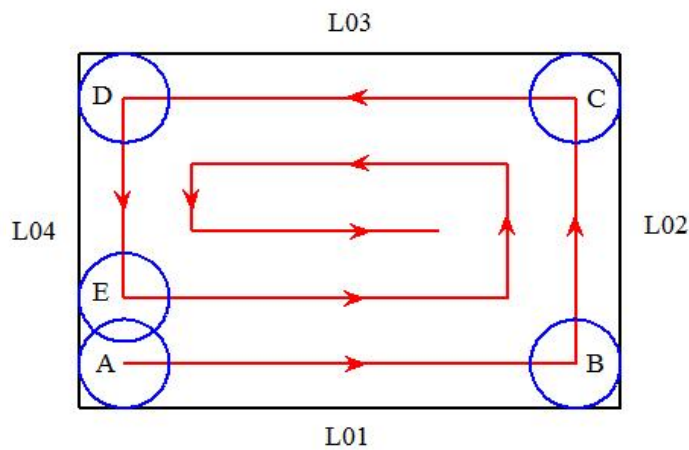


Figure II.11. Représentation de la trajectoire spirale.

- Nombre d'incrément n
 n : c'est le nombre de contours moins un.
- Longueur des contours

$$L_{pi} = L_{11} + L_{12} + L_{13} + L_{14} + L_{21} + L_{22} + L_{23} + L_{24} + L_{31} + L_{32} + L_{33} + L_{34} + \\ + L_{n1} + L_{n2} + L_{n3} + L_{n4}$$

$$L_{ij} = L_{(i-1)j} - Y \quad (II.29)$$

Si $i = 1$ et $j = 4$

$$L_{ij} = L_{(i-1)j} - Y + \overline{AE}$$

Tel que :

$$\overline{AE} = 2 \dots R$$

II.3 Modèle analytique de trajectoires d'outils pour l'usinage des coins

Dans ce modèle, on utilise un seul outil de coupe pour usiner les quatre coins de la poche, cet outil doit avoir un rayon inférieur ou égal au rayon du plus petit raccordement.

II.3.1 Usinage des coins

L'usinage du coin nécessite tout d'abord la connaissance de la surépaisseur de la matière (w) (figure II.12).

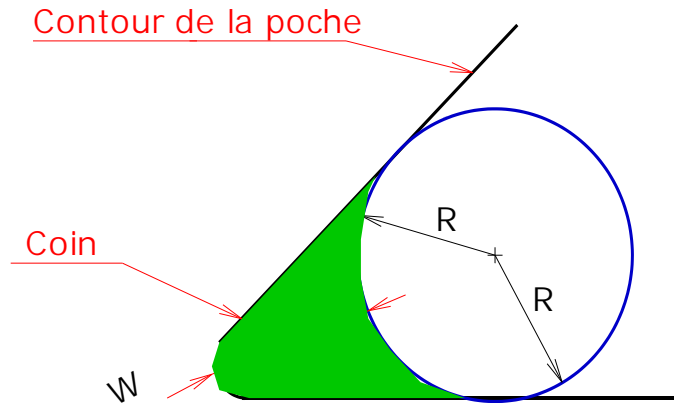


Figure II.12. Définition d'un coin.

II.3.1.1 Calcul de la surépaisseur de la matière (w)

A partir de la (figure II. 13).

On a :

$$w_i = w' + r_i \text{ tel que } i \text{ représente le coin ciblé } (i = 1, 2, 3 \text{ ou } 4)$$

$$\text{Et } \sin \frac{r_i}{2} = \frac{R-r_i}{w'+R} = \frac{R-r_i}{R+w_i-r_i}$$

$$\Rightarrow R-r_i = \sin \frac{r_i}{2} (R+w_i-r_i)$$

$$\Rightarrow \frac{R-r_i}{\sin \frac{r_i}{2}} = R+w_i-r_i \Rightarrow w_i = \frac{R-r_i}{\sin \frac{r_i}{2}} - R + r_i$$

$$\text{Alors : } w_i = (R-r_i) \left(\frac{1}{\sin \frac{r_i}{2}} - 1 \right) \quad (\text{II.30})$$

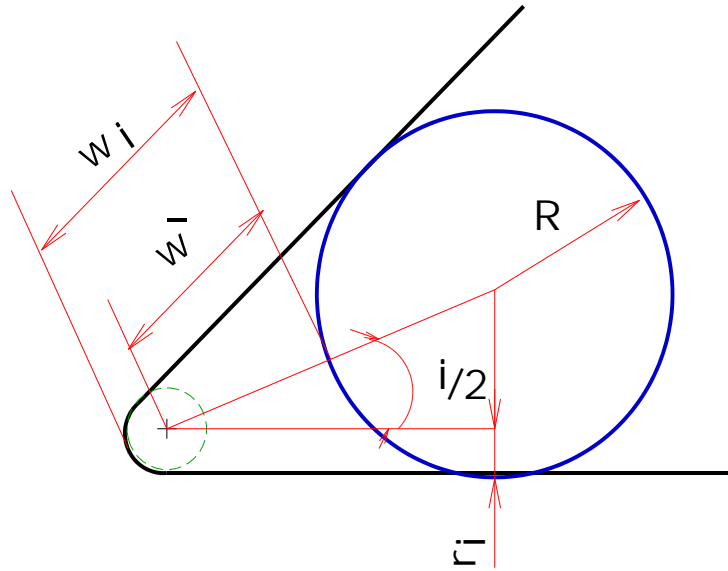


Figure II.13 Représentation de la surépaisseur W .

II.3.1.2 Calcul de trajectoires d'outil

Dans le but de chercher la trajectoire de l'outil de reprise des coins, notre recherche montre qu'il existe plusieurs types de trajectoire en fonction des rayons de l'outil de reprise des coins. En effet, on peut distinguer les cas suivants d'évidement de coins :

1^{er} Cas : Rayon de l'outil égal au rayon de raccordement et $w_i < 2...R$ (figure II.14)

Dans ce cas on a : $r_i = R_1$ et $w_i < 2...R_1$:

La trajectoire de l'outil :

$$L_{\text{coin}} = \overline{AB} + \overline{BC} \text{ avec } \overline{AB} = \overline{BC} \text{ donc } L_{\text{coin}} = 2\overline{AB}$$

$$\cotg \frac{r_i}{2} = \frac{\overline{AB}}{R - R_1}$$

$$\text{D'où : } \overline{AB} = (R - R_1) \cotg \frac{r_i}{2}$$

$$\text{Alors : } L_{\text{coin}} = 2(R - R_1) \cotg \frac{r_i}{2} \quad (\text{II.31})$$

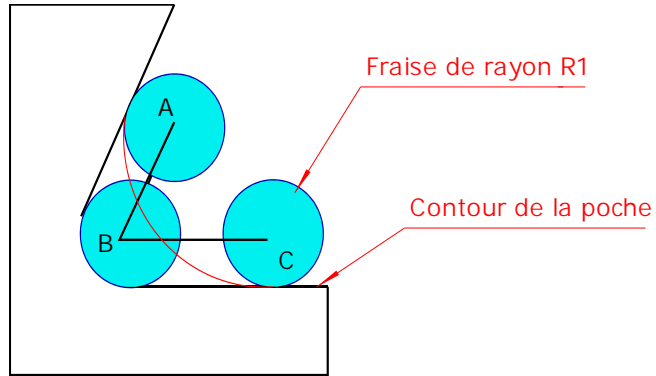


Figure II.14. Trajectoire de l'outil dans le 1er cas

2^{ème} Cas : Dans ce deuxième cas (figure II.15) on a : $R_1 < r_i$ et $w_i < 2 \dots R_1$

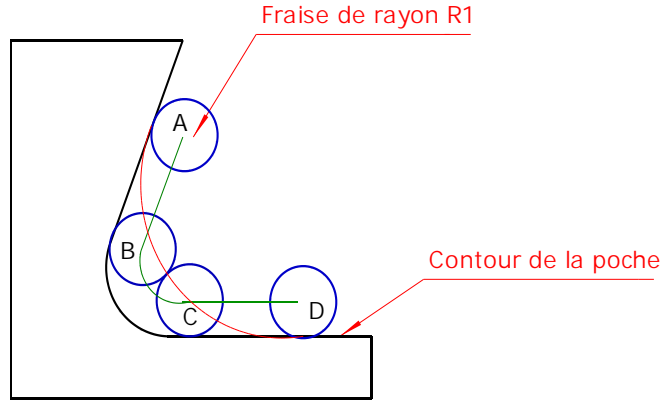


Figure II.15. Trajectoire de l'outil dans le 2ème cas.

La longueur de la trajectoire est exprimée par la relation suivante :

$$L_{\text{coin}} = 2(R - R_1) \cotg \frac{r_i}{2} + (r_i - R_1)(f - r_i) \quad (\text{II.32})$$

3^{ème} Cas : Dans ce cas on a : $w_i > 2 \dots R_1$ et $R_1 = r_i$

La stratégie appliquée pour l'usinage des coins est l'usinage en zigzag. La (figure II.16 a) représente la trajectoire de l'outil dans le cas où $R_1 = r_i$. Par contre la (figure II.16 b) montre la trajectoire de l'outil de coupe dans le cas où $R_1 < r_i$.

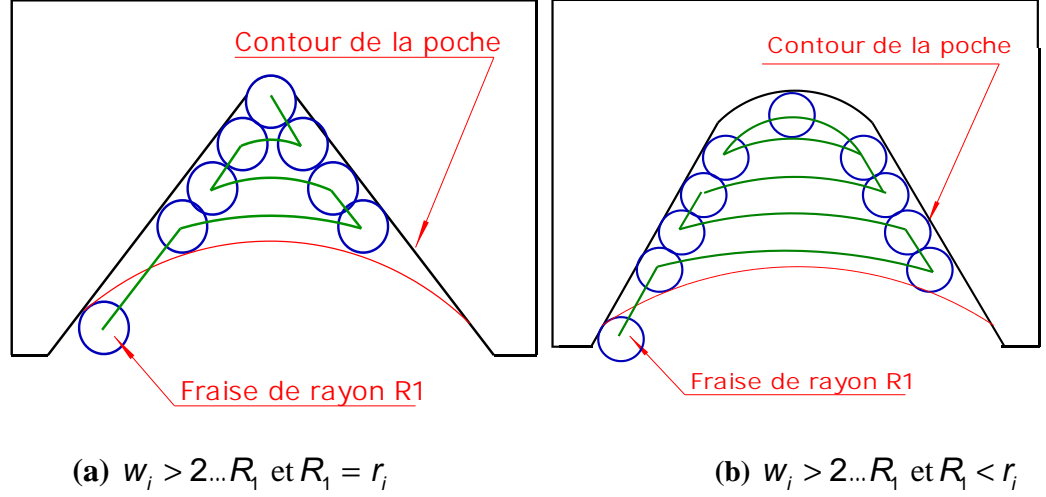


Figure II.16. Trajectoire de l'outil de coupe.

Dans ce cas la longueur de trajet de l'outil : $L_{\text{coin}} = L + L_m + L_c + L_{\text{arc}}$

II.3.1.3 Calcul de l'incrément

Le nombre d'incrément dans un coin est exprimé par la relation suivante :

$$n_c = E\left(\frac{\overline{BC}}{2...R_1}\right) + 1 \quad \text{Avec : } \overline{BC} = \overline{OB} - \overline{OD} - \overline{DC}$$

Dans le triangle OAB on a :

$$\sin \frac{r_i}{2} = \frac{\overline{OA}}{\overline{OB}} \quad \text{avec } \overline{OA} = R - R_1$$

$$\text{Donc : } \overline{OB} = \frac{R - R_1}{\sin \frac{r_i}{2}} \quad \text{Et } \overline{DC} = ...R_1, \overline{OD} = R$$

$$\text{Alors : } \overline{BC} = \frac{R - R_1}{\sin \frac{r_i}{2}} - (R + ...R_1)$$

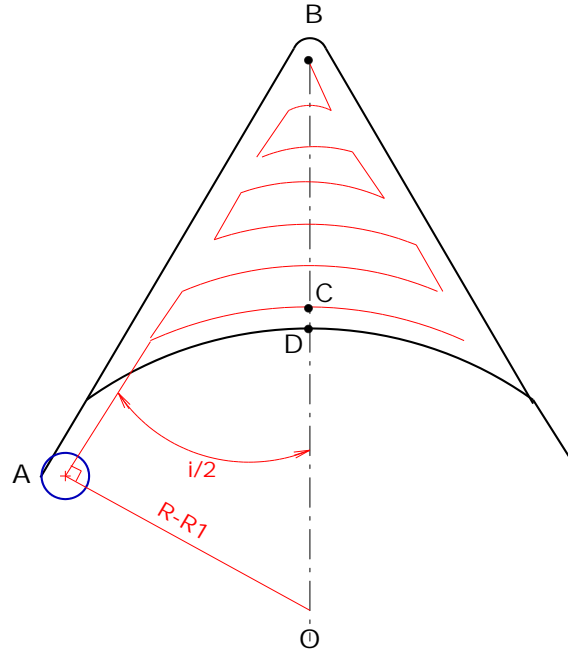


Figure II.17. Représentation des limites de trajectoire de l'outil dans le coin.

Le nombre d'incrément devient :

$$n_c = E \left(\frac{\frac{R - R_1}{\sin \frac{r_i}{2}} - (R + \dots R_1)}{2 \dots R_1} \right) + 1 \quad (\text{II.33})$$

Le pas corrigé (l'incrément) est exprimé par la relation suivante :

$$p_c = \frac{\frac{R - R_1}{\sin \frac{r_i}{2}} - (R + \dots R_1)}{n_c} \quad (\text{II.34})$$

II.3.1.4 Calcul de la longueur totale des arcs parallèles (L)

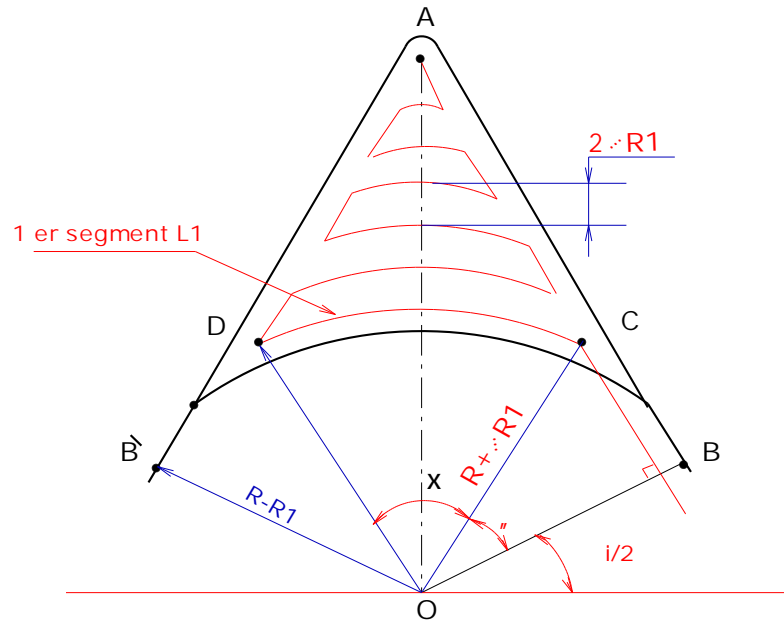


Figure II.18. Représentation des arcs parallèles.

La longueur totale des arcs parallèles est exprimée par la relation suivante :

$$L = \sum_{i=1}^n L_i$$

De la (figure II.18)

$$L_1 = \widehat{DC} = (R + \dots R_1) \chi$$

$$\text{Avec : } \chi = f - 2 \frac{r_i}{2} - 2 \alpha$$

$$\text{Alors que : } \cos \alpha = \frac{\overline{OB}}{\overline{OC}} = \frac{R - R_1}{R + \dots R_1} \Rightarrow \alpha = \cos^{-1} \left(\frac{R - R_1}{R + \dots R_1} \right)$$

$$\text{Donc : } \chi = f - r_i - 2 \cos^{-1} \left(\frac{R - R_1}{R + \dots R_1} \right)$$

En remplaçons la valeur de χ , L_1 devient :

$$L_1 = (R + \dots R_1) \left[f - r_i - 2 \cos^{-1} \left(\frac{R - R_1}{R + \dots R_1} \right) \right]$$

Et :

$$L_2 = (R + 3 \dots R_1) \left[f - r_i - 2 \cos^{-1} \left(\frac{R - R_1}{R + 3 \dots R_1} \right) \right]$$

⋮

$$L_i = (R + (2i - 1) \dots R_1) \left[f - r_j - 2 \cos^{-1} \left(\frac{R - R_1}{R + (2i - 1) \dots R_1} \right) \right] , j = 1, \dots, 4$$

Alors la longueur totale est :

$$L = \sum_{i=1}^{n_c} \left[(R + (2i - 1) \dots R_1) \left[f - r_j - 2 \cos^{-1} \left(\frac{R - R_1}{R + (2i - 1) \dots R_1} \right) \right] \right] , j = 1, \dots, 4 \quad (\text{II.35})$$

II.3.1.5 Calcul de la longueur de la trajectoire entre incréments (L_m)

De la (figure II.18) la longueur entre incréments :

$$L_m = \frac{\overline{AC}}{2} + \frac{\overline{AD}}{2} + \overline{BC} = \overline{AC} + \overline{BC} = \overline{AB}$$

On a :

$$\tan \frac{r_i}{2} = \frac{\overline{OB}}{\overline{AB}} = \frac{R - R_1}{\overline{AB}} \Rightarrow \overline{AB} = \frac{R - R_1}{\tan \frac{r_i}{2}} = (R - R_1) \cotg \frac{r_i}{2}$$

Alors :

$$L_m = (R - R_1) \cotg \frac{r_i}{2} \quad (\text{II.36})$$

II.3.1.6 Calcul de la longueur des segments du contour (L_c)

La longueur des segments du contour est exprimée par la relation suivante :

$$L_c = 2 (R - R_1) \cotg \frac{r_i}{2} \quad (\text{II.37})$$

Dans le cas où $R_1 < r_i$ (figure II. 16 b) l'outil termine l'usinage du coin par balayage suivant un arc de rayon $r_i - R_1$, la longueur (L_{arc}) de cet arc est exprimée par la relation

$$\text{suivante : } L_{\text{arc}} = (r_i - R_1) \left(\frac{f - r_i}{2} \right) \quad (\text{II.38})$$

La longueur de trajet de l'outil dans le 3^{ème} cas est devenue :

$$L_{\text{coin}} = \left[\sum_{i=1}^{n_c} \left[(R + (2i - 1) \dots R_1) \left(f - r_i - 2 \cos^{-1} \left(\frac{R - R_1}{R + (2i - 1) \dots R_1} \right) \right) \right] \right] + 3(R - R_1) \cotg \frac{r_i}{2} + (r_i - R_1) \left(\frac{f - r_i}{2} \right) \quad (\text{II.39})$$

II.4 L'évidement des poches circulaires

II.4.1 Modèle analytique de la trajectoire d'outil de coupe pour la partie intérieure

- **Stratégie contour parallèle**

Les paramètres de la poche sont : un rayon de cercle R_c , l'angle de contour \dagger_i

La figure présente le contour d'une poche de forme circulaires avec les différents paramètres.

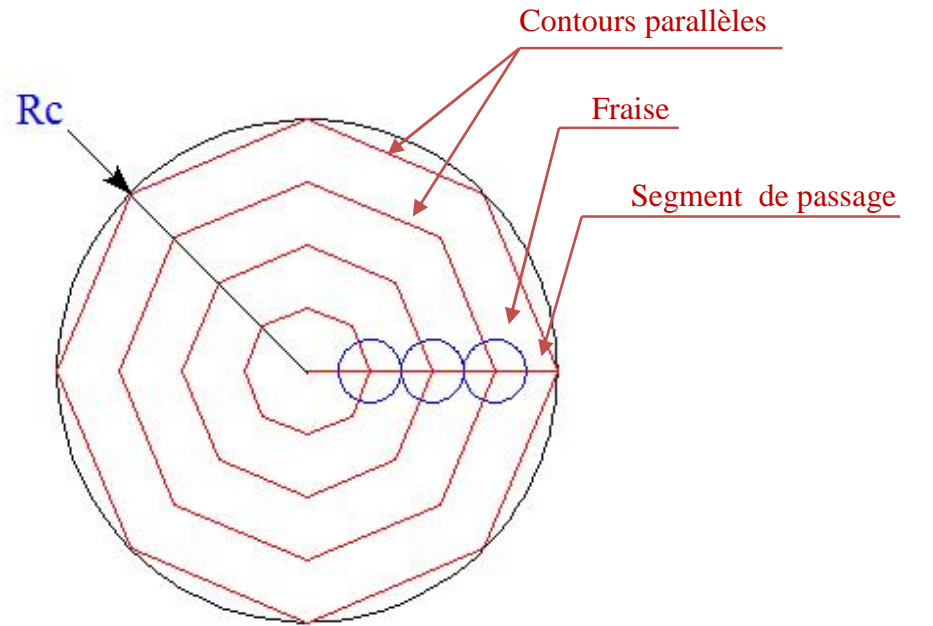


Figure II.19. Représentation des contours parallèles.

- Nombre d'incrément n
 n : c'est le nombre de contours moins un.
- Calcul du segment de passage d'un contour à un autre X_t

On a : $X = 2 \dots R$ **Alors :** $X_t = X \times n$

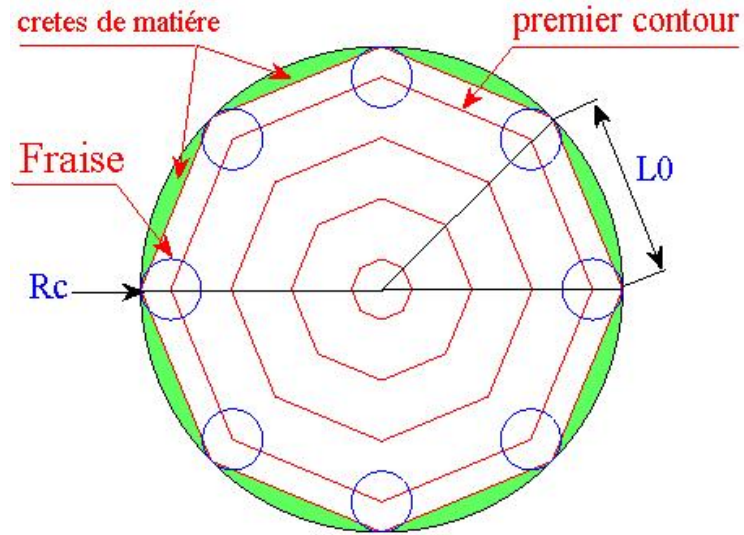


Figure II.20. Paramètres d'une poche de contour circulaire.

- Longueur des contours

$$L_s = 8(L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n) + X_t$$

$$L_i = L_{(i-1)} - 2Y \left(\sin\left(\frac{r}{2}\right) \right) \quad (\text{II.40})$$

Avec :

$i = 1, \dots, n$ (n : Nombre de segments parallèles à chaque arrête).

- Pour déterminer la longueur du premier contour on pose $Y = R$ outre $Y = 2 \dots R$
- Le calcul s'arrête lorsque la longueur du dernier contour sera égale à zéro.

- Calcul de la longueur L_0 :

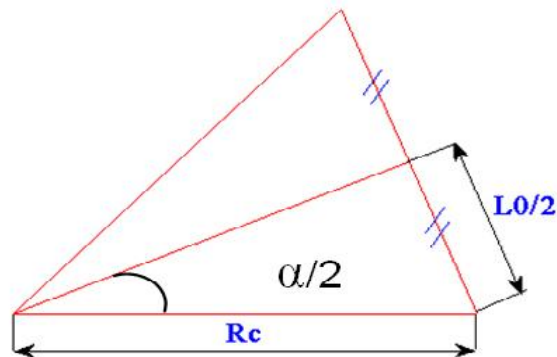


Figure II.21. La longueur L_0 .

A partir de la figure **II.21** :

On a :

$$\sin \frac{r}{2} = \frac{\frac{L_0}{2}}{R_c} \Rightarrow \frac{L_0}{2} = R_c \sin \frac{r}{2}$$

Donc :

$$L_0 = 2 \left(R_c \sin \frac{r}{2} \right) \quad (\text{II.41})$$

- Modèle analytique de la trajectoire de contournage L_c

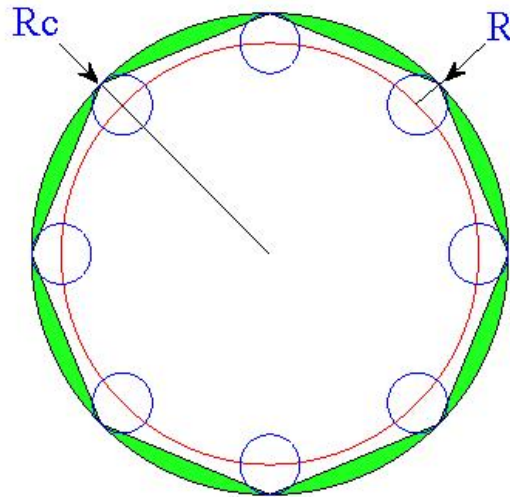


Figure II.22. Périmètre de contournage.

La longueur de contournage est égale le périmètre du cercle intérieure et donnée par la relation suivante :

$$L_c = 2(R_c - R)f \quad (\text{II.42})$$

- La longueur totale de la trajectoire de l'outil de coupe dans la partie intérieure « L_{pi} »

$$L_{pi} = L_s + L_c \quad (\text{II.43})$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé et présenté trois modèles analytique de calcul de trajectoires de l'outil de coupe pour l'évidement de la partie intérieure. Ces modèles sont basés sur les trois stratégies présentées dans le chapitre précédent ainsi qu'un modèle pour la reprise des coins, où nous avons pris en compte la valeur de la surépaisseur à enlever.

Chapitre III

Optimisation du choix des outils de coupe

III.1 Introduction

L'optimisation des processus de fabrication à une place importante au niveau de la production industrielle dans le but principale est l'amélioration de la qualité des produits fabriqués et la réduction des coûts de production.

La stratégie d'optimisation proposée dans ce chapitre consiste à la formulation de la fonction objective en se basant sur le critère économique, le temps d'usinage en particulier, en tenant compte des contraintes technologiques, ainsi qu'un programme pour accéder au résultats, dont la méthode de résolution utilisée est appelée la programmation quadratique séquentielle.

Ce programme est écrit en langage MATLAB.

III.2 Temps d'usinage

Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. Il s'exprime par la relation :

$$t_{total} = t_{pi} + t_{coin} \quad (III.1)$$

t_{pi} : Temps d'usinage de partie intérieure.

$$t_{pi} = \frac{L_{pi}}{V_f} \quad (III.2)$$

L_{pi} : Longueur de partie intérieure.

V_f : Vitesse d'avance.

t_{coin} : Temps d'usinage des coins.

$$t_{coin} = \frac{L_{coin}}{V_f} \quad (III.3)$$

L_{coin} : Longueur des coins.

III.3 Formulation du modèle d'optimisation pour le choix des outils de coupe

III.3.1 Choix des variables du modèle

Les variables utilisés dans les modèles d'optimisation du choix des outils de coupe sont : les rayons des fraises disponibles.

III.3.2 Formulation de l'objectif

En usinage les fonctions objectives diffèrent d'un problème à un autre.

L'optimisation peut prendre comme objectif de :

- Minimiser le coût de production,
- Minimiser le temps de production,
- Maximiser le débit de copeaux,
- Minimiser la valeur de la rugosité,
- Réduire les vibrations,
- Réduire les efforts de coupe .

Dans cette étude nous avons formulé les modèles de temps de coupe:

- Pour l'évidement de la partie intérieure

Le temps de coupe est calculé par la relation suivante :

$$t_{pi} = \frac{L_{pi}}{V_f}$$

L_{pi} : est calculée selon la stratégie choisie.

- Pour la reprise des coins

$$t_{coin} = \frac{L_{coin}}{V_f}$$

III.3.3 Formulation des contraintes

Le problème du choix de l'outil de coupe consiste à déterminer des valeurs de diamètre de l'outil pour chaque zone en prenant compte les limites dues à la forme géométrique de la poche à réaliser, ainsi que les magasins d'outils disponibles.

Les limites dues à la forme géométrique de la poche se traduisent par des contraintes sur la détermination des rayons .On peut distinguer trois contraintes pour les trois formes des poches :

- poches triangulaires :

$$2R \leq a - 2 \left[\cos r_1 \left(c - \left(\frac{a}{2} \right) \cos r_1 \right) \right] \quad (\text{III.4})$$

$$2R \leq b - \left(\frac{b}{2} \right) \sin r_2 \quad (\text{III.5})$$

$$R_1 \leq r_{\min} \quad (\text{III.6})$$

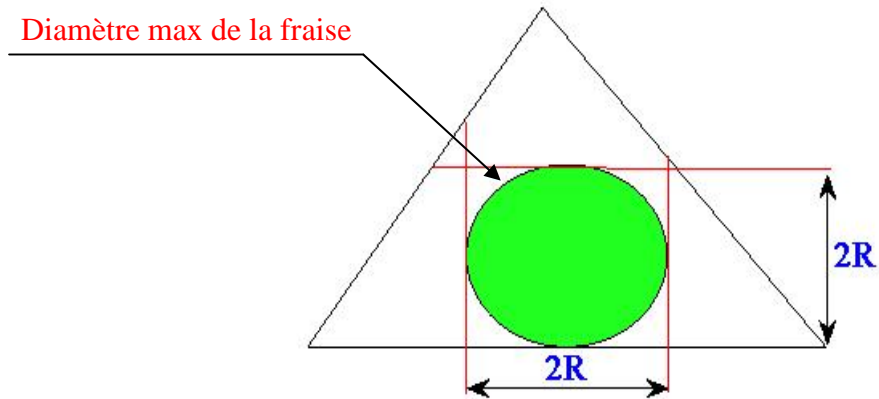


Figure III.1. Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche triangulaire.

Les jeux d'outils disponibles imposent une contrainte suivante :

$$R_{j\min} \leq R \leq R_{j\max} \quad (\text{III.7})$$

- poches rectangulaires :

$$2R \leq a - \left(\frac{d}{6} \right) \sin r_1 - \left(\frac{b}{6} \right) \sin r_2 \quad (\text{III.8})$$

$$2R \leq b \quad (\text{III.9})$$

$$R_1 \leq r_{\min} \quad (\text{III.10})$$

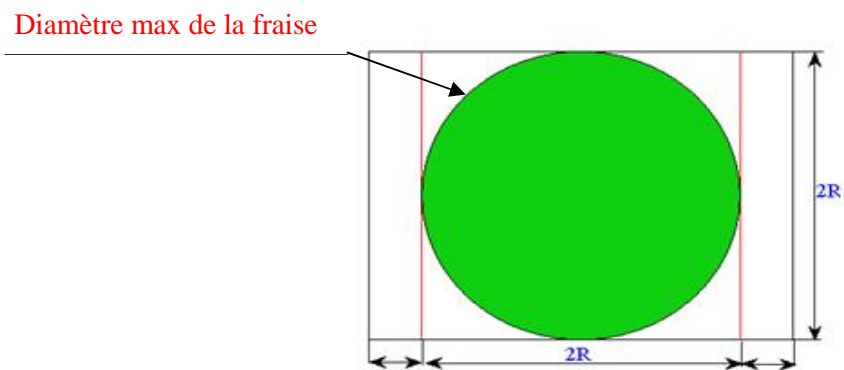


Figure III.2. Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche rectangulaire.

- poches circulaires :

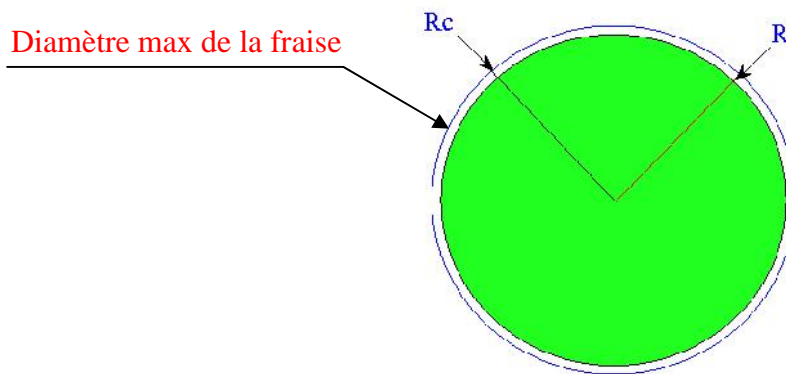


Figure III.3. Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche circulaire.

Les jeux d'outils disponibles imposent une contrainte suivante :

$$2R < 2R_c \quad (\text{III.11})$$

III.4 La méthode de résolution

Notre problème peut être résolu par la programmation quadratique séquentielle (SQP), cette méthode est utilisée pour la résolution des problèmes généraux d'optimisation non linéaire avec contraintes.

Les problèmes à résoudre avec cette méthode sont de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{d \in \mathbb{R}^n} f(x) \\ \text{sous } g_i(x) = 0, \quad \text{pour } i = 1, \dots, n \\ h_j(x) \geq 0, \quad \text{pour } j = n+1, \dots, m \\ x^{\inf} \leq x \leq x^{\sup} \end{array} \right.$$

Où toutes les fonctions du problème sont continues et différentiables.

III.4.1 Avantages de la programmation quadratique séquentielle

Avec la programmation quadratique on peut résoudre tous les types de l'optimisation non linéaire avec contraintes, quelque soit le type de ces derniers (contraintes d'égalité ou contraintes d'inégalité).

Cette méthode peut utiliser une recherche linéaire de large itérations pour calculer un pas d'optimisation.

III.5 Méthodologie d'optimisation

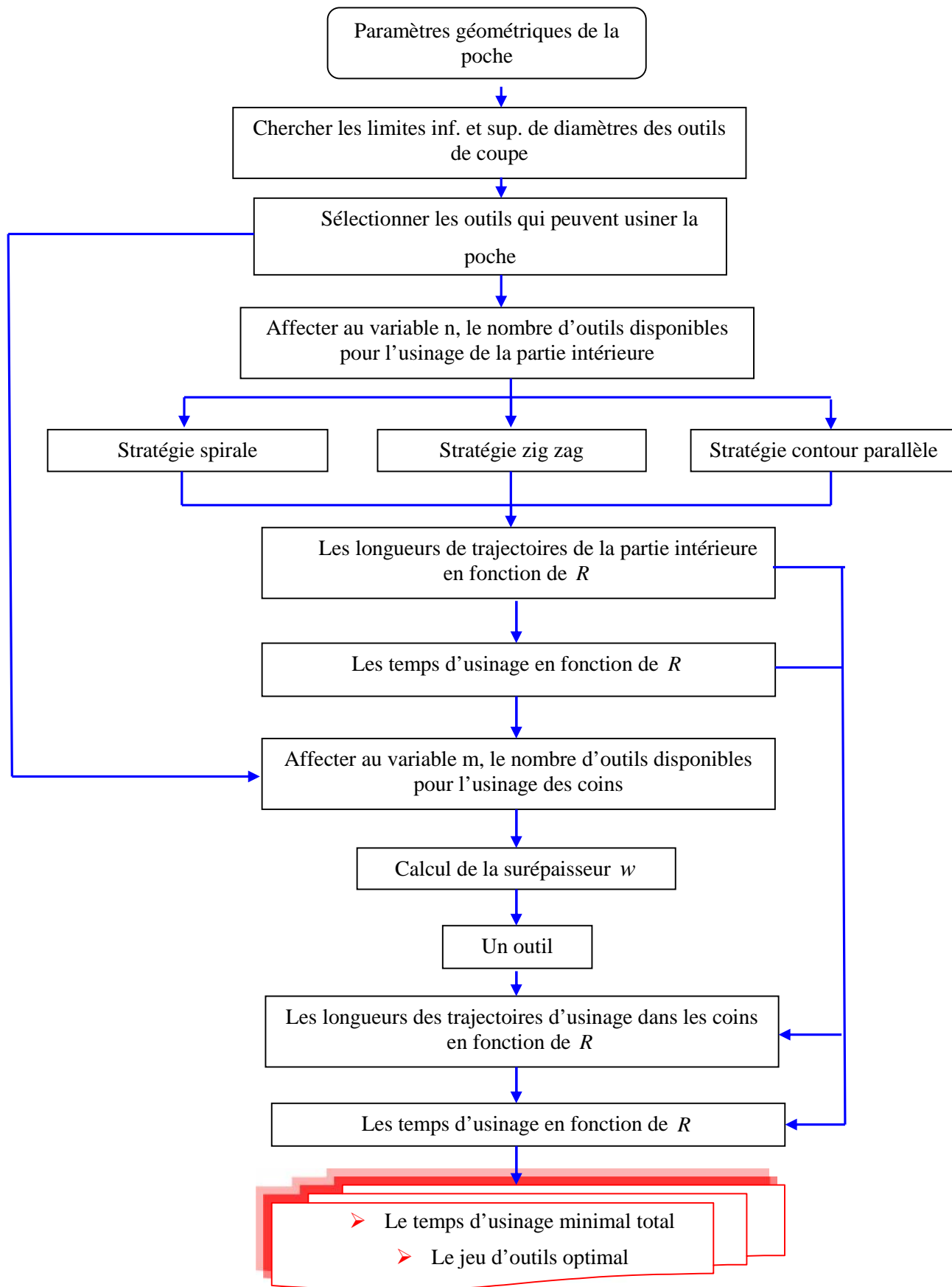


Figure III.4. Organigramme d'optimisation du choix des outils.

III.6 Traitement d'un trois exemples d'une poche :

III.6.1 Poche triangulaire

III.6.1.1 Paramètres géométriques de la poche

Nous proposons d'étudier une pièce qui comporte une poche triangulaire de contour quelconque et de rayons de raccordements identiques. Les paramètres géométriques définissant la poche sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Paramètres de la poche triangulaire

Côtés (mm)			Angles °			Raccordements (mm)		
L_{01}	L_{02}	L_{03}	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
94	85	80	57.82	52.80	69.38	4	4	4

III.6.1.2 Conditions de coupe

On considère dans cet exemple un jeu d'outils constitué de 14 outils. Nous présentons dans le tableau 2, les différents diamètres des outils ainsi que la numérotation associée (Les outils sont numérotés de 1 à 14 dans l'ordre croissant de diamètre).

Tableau III.2 .Outils de coupe

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	30	32	36	40

Le tableau 3, est extrait du livre Mémotech [11], dont « d » représente le diamètre de l'outil en mm, « z » le nombre de dents de l'outil, « f_z » l'avance par dent en mm/dent. Ces valeurs sont données pour l'usinage des aciers non alliés : d'usage général, pour traitement thermique et pour une durée de vie de l'outil de 60 min, la vitesse de coupe $V_c = 28 \text{ m/min}$. L'outil est en acier rapide supérieure ARS non revêtu.

Tableau III.3. Conditions de coupe

d	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	30	32	36	40
z	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6
$f_z (10^{-3} \text{ mm/dent})$	13	20	25	30	35	40	45	50	55	50	50	55	55	55

III.6.1.3 Optimisation du choix des outils de coupe :(Résultats numériques)

Pour la résolution de notre problème, nous avons développé une application informatique en langage MATLAB. L'application de ce programme permet de trouver les valeurs de temps d'usinage minimal ainsi que le diamètre de l'outil en question pour les trois stratégies.

III.6.1.4 Graphes et commentaires

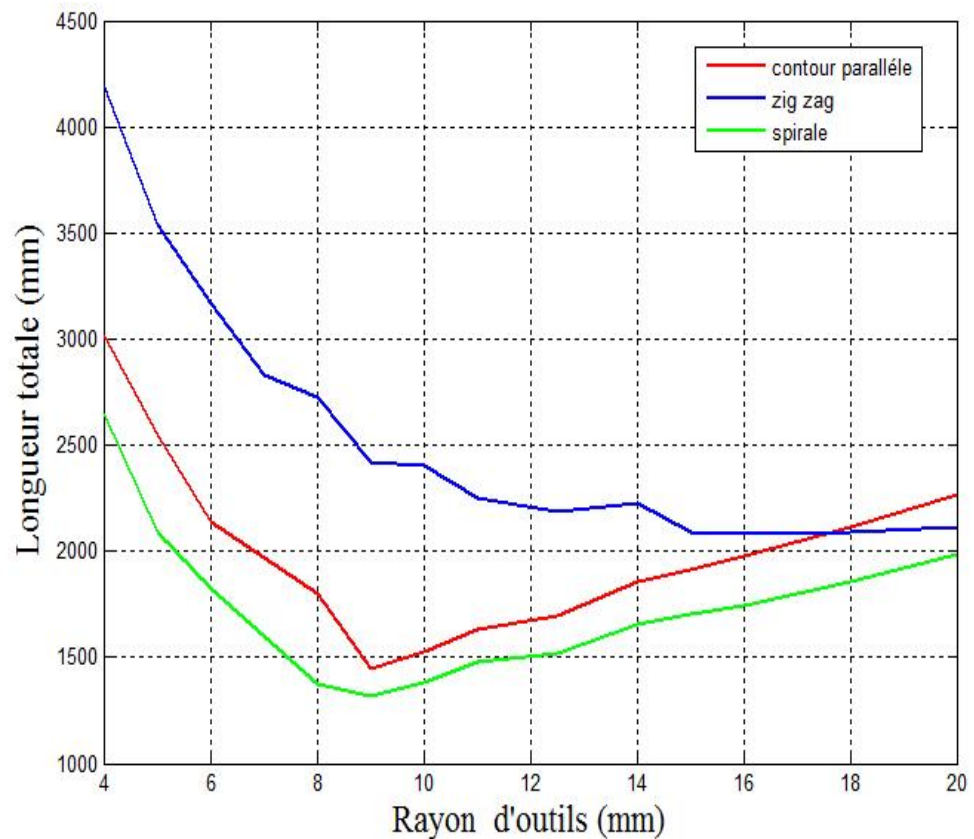


Figure III.5. Longueurs de la trajectoires de l'outil de coupe pour une poche triangulaire

D'après la (figure III.5) en remarque que :

La longueur totale de trajectoires de l'outil de coupe tend vers l'infinie pour les outils de diamètres proche de zéro, par contre elle devient courte tout en prenant des outils de grand diamètres mais le plus intéressant c'est que la stratégie spirale permet d'avoir une longueur minimale par rapport a la stratégie Zig Zag et contour parallèle.

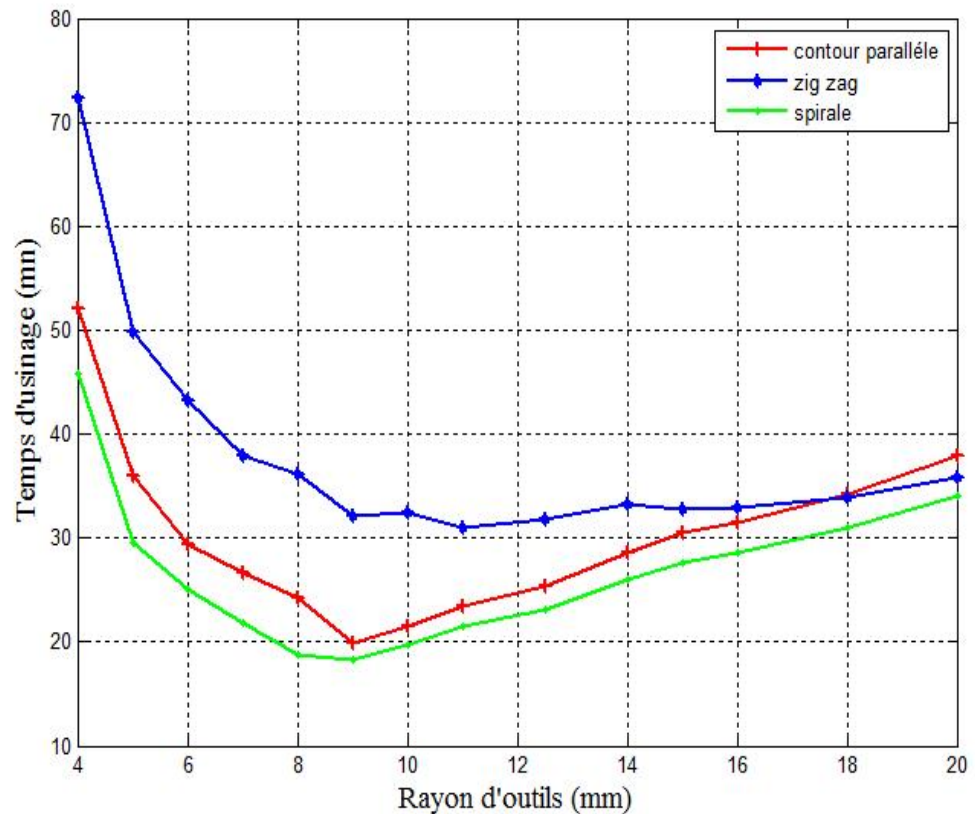


Figure III.6. Temps d'usinage de la poche triangulaire.

De même que pour les longueurs de trajectoires d'outils les temps d'usinage de la poche « partie intérieure plus coins » par les trois stratégies sont très proches, mais le temps d'usinage minimal pour les deux ne correspond pas à un même outil et avec un avantage pour la stratégie contours spirales ce qui est représenté dans la figure III.6.

III.6.1.5 Résultats

Les résultats obtenus sont représentés dans les trois tableaux suivant :

Tableau III.4. Résultats d'optimisation pour la stratégie Zig Zag.

	Temps minimal d'usinage de la poche (min)	Le rayon de l'outil optimal. (mm)
Partie intérieure	19.3664	11
Coins	11.7036	4
Total	31.0700	

Tableau III.5. Résultats d'optimisation pour la stratégie contour parallèle.

	Temps minimal d'usinage de la poche (min)	Le rayon de l'outil optimal. (mm)
Partie intérieure	13.8124	9
Coins	6.0645	4
Total	19.8769	

Tableau III.6. Résultats d'optimisation pour la stratégie spirale.

	Temps minimal d'usinage de la poche (min)	Le rayon de l'outil optimal. (mm)
Partie intérieure	12.2018	9
Coins	6.0645	4
Total	18.2662	

III.6.2 Poche rectangulaire

III.6.2.1 Paramètres géométriques de la poche

Nous proposons d'étudier une pièce qui comporte une poche rectangulaire de contour quelconque et de rayons de raccordements identiques. Les paramètres géométriques définissant la poche sont présentés dans le tableau III.7.

Tableau III.7. Paramètres de la poche rectangulaire

Côtés (mm)				Angles °				Raccordements (mm)			
L01	L02	L03	L04	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1	r_2	r_3	r_4
80	60	80	60	90	90	90	90	4	4	4	4

III.6.2.2 Conditions de coupe

Les même conditions de la poche triangulaire.

III.6.2.3 Graphes et commentaires

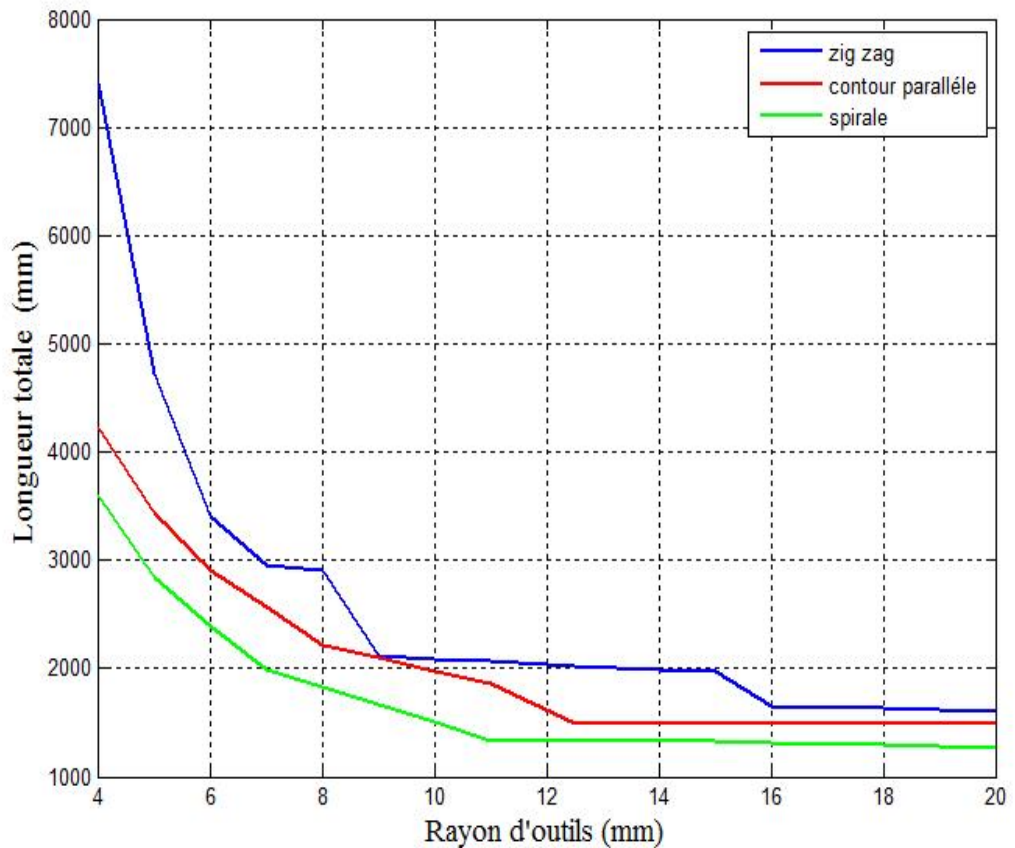


Figure III.7. Longueurs de la trajectoires de l'outil de coupe pour une poche rectangulaire.

D'après la (figure III.7) en remarque que :

la longueur totale de trajectoires de l'outil de coupe tend vers l'infinie pour les outils de diamètres proche de zéro, par contre elle devient courte tout en prenant des outils de grand diamètres mais le plus intéressant c'est que la stratégie spirale permet d'avoir une longueur minimale par rapport a la stratégie Zig Zag et contour parallèle.

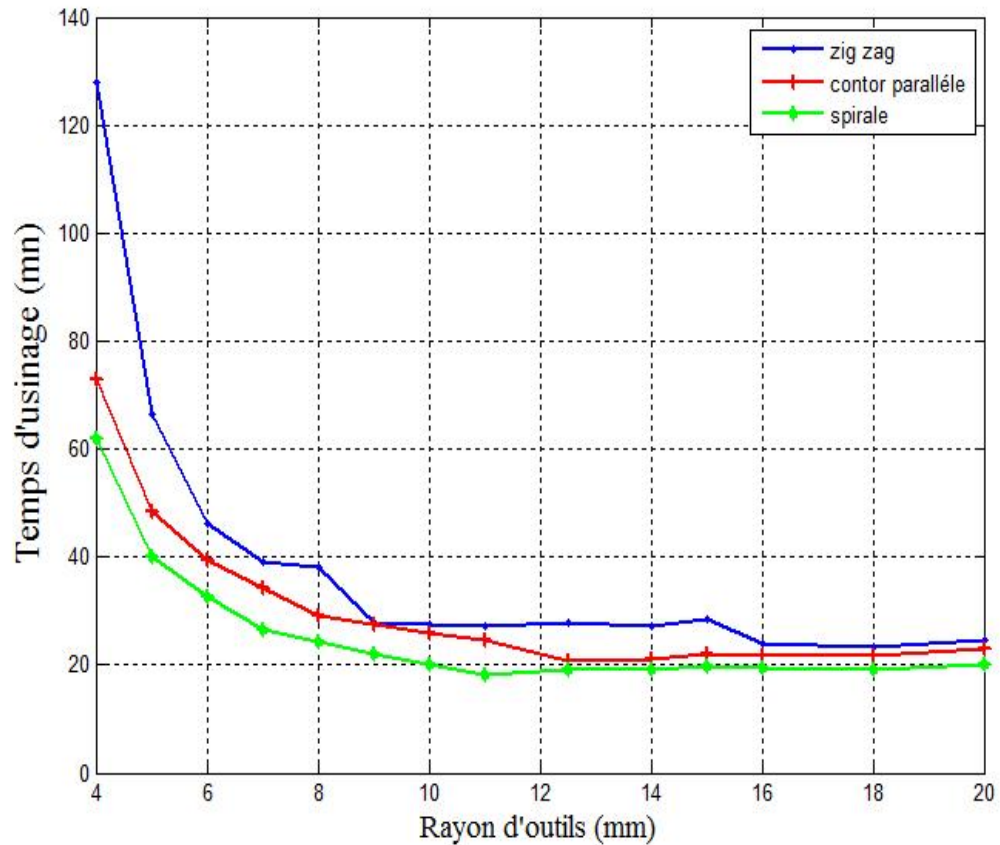


Figure III.8. Temps d'usinage de la poche rectangulaire.

De même que pour les longueurs de trajectoires d'outils les temps d'usinage de la poche « partie intérieure plus coins » par les trois stratégies sont très proches, mais le temps d'usinage minimal pour les deux ne correspond pas à un même outil et avec un avantage pour la stratégie contours spirales ce qui est représenté dans la figure III.8.

III.6.2.4 Résultats

Les résultats obtenus sont représentés dans les trois tableaux suivant :

Tableau III.8. Résultats d'optimisation pour la stratégie Zig Zag.

	Temps minimal d'usinage de la poche (min)	Le rayon de l'outil optimal. (mm)
Partie intérieure	11.7504	18
Coins	11.5997	4
Total	23.3501	

Tableau III.9. Résultats d'optimisation pour la stratégie contour parallèle.

	Temps minimal d'usinage de la poche (min)	Le rayon de l'outil optimal. (mm)
Partie intérieure	13.7700	12.5
Coins	7.0427	4
Total	20.8127	

Tableau III.10. Résultats d'optimisation pour la stratégie spirale.

	Temps minimal d'usinage de la poche (min)	Le rayon de l'outil optimal. (mm)
Partie intérieure	12.3074	11
Coins	5.7999	4
Total	18.1073	

III.6.3 Poche circulaire

III.6.3.1 Paramètres géométriques de la poche

Les paramètres de la poche sont : un rayon de cercle $R_c = 30mm$, l'angle de contour $r = 45^\circ$, le rayon de countournage est le même rayon de la partie intérieure.

III.6.3.2 Conditions de coupe

Les conditions de coupe sont les mêmes conditions de la poche triangulaire et rectangulaire.

III.6.3.3 Graphes et commentaires

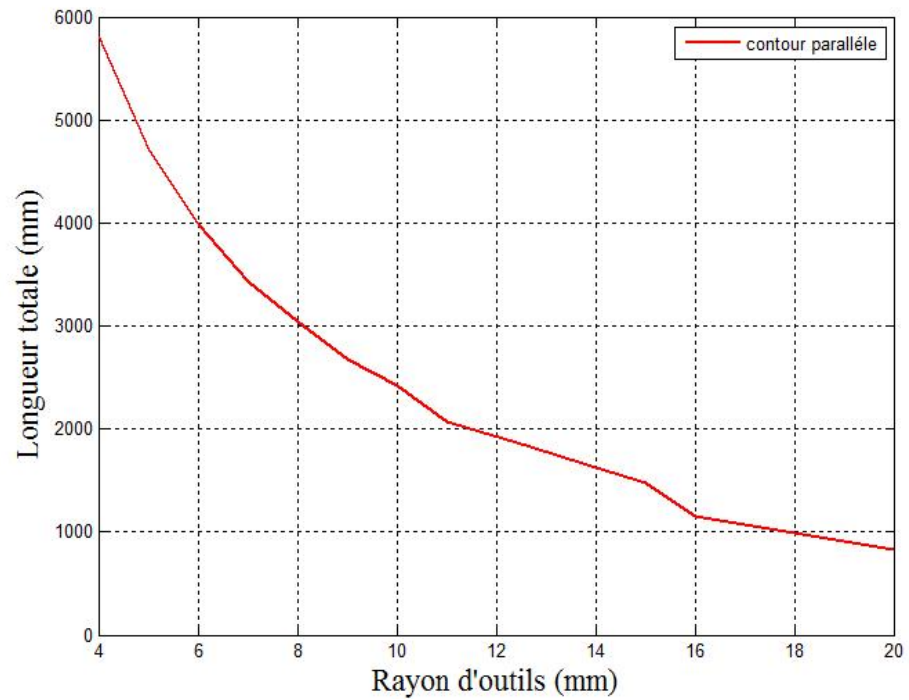


Figure III.9. Longueurs de la trajectoires de l'outil de coup pour une poche circulaire.

D'après la (figure III.9) en remarque que :

La longueur totale de la trajectoires de l'outil de coupe diminuée si le rayon d'outil augmente..

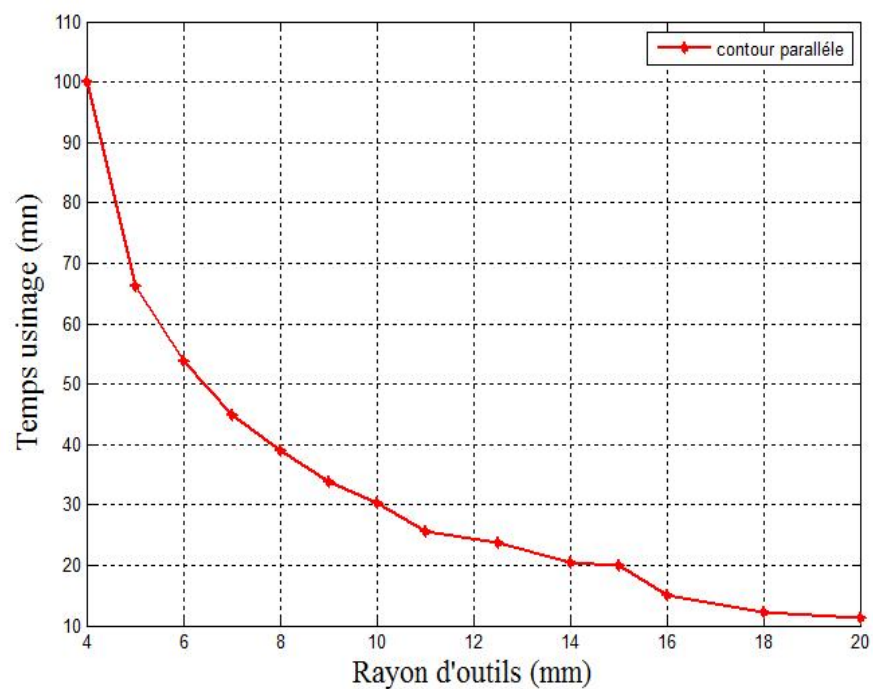


Figure III.10. Temps d'usinage de la poche circulaire.

D'après la (figure III.10) en remarque que :

Le temps d'usinage diminue si le rayon de l'outil de coupe augmente.

III.6.3.4 Résultats

Tableau III.11. Résultats d'optimisation pour la stratégie contour parallèle.

	Temps minimal d'usinage de la poche (min)	Le rayon de l'outil optimal. (mm)
Partie intérieure	11.2482	20

III.7 Conclusion

A partir des résultats obtenus on remarque que le temps d'usinage minimal ne correspond pas à un outil de grand diamètre mais à un outil de diamètre optimal qui prend en considération les deux temps d'usinage « Partie intérieure, coins ».

La stratégie contour spirale est plus efficace que la stratégie contour parallèle dans l'évidement de la partie intérieure, elle permet de réduire le temps d'évidement de la poche, ainsi que le nombre de discontinuité du parcours de l'outil ce qui veut dire augmentation de production.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons abordé le problème de choix d'un jeu optimal pour l'évidement des poches triangulaire, rectangulaire et circulaire ayant des rayons de raccordement. Le processus d'usinage dans ce cas est défini par un cycle d'ébauche et un cycle de reprise des raccordements. En effet, nous avons développé des modèles analytiques pour calculer la longueur de la trajectoire des outils de coupe relative à chaque cycle d'usinage en se basant sur trois stratégies d'usinage. Par la suite, nous avons montré la méthode de résolution de choix optimal d'un jeu d'outil, basée sur le principe de minimisation de temps d'usinage. Un algorithme a été développé sous MATLAB pour la génération des résultats numériques.

Bien que cette étude traite le cas d'une poche triangulaire, rectangulaire et circulaire avec des raccordements, la structure de la solution proposée pour le choix d'un jeu d'outil, peut être aussi utilisée pour l'usinage d'autres formes de poches.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **A.Mohamed**, Industrialisation de Procède : Contribution a La maîtrise de L'opération de tréflage ou fraisage vertical - Approches analytique et expérimentale, Thèse doctorat, ENSAM, CER de Metz 2008.
- [2] **S. Benarabi, A.Chouchani** , Optimisation du Choix des Outils de Coupe pour l'évidement des Poches Quadrilatères en 2D1/2', Mémoire Fin d'Étude, Université d'Ouargla, 2011.
- [3] **A. Benyoucef**, Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique, mémoire de magistère, Université de Batna 2006.
- [4] **M.C.Hachem, H.A.Liameche**, Présentation d'une gamme d'entretien préventive d'une fraiseuse de type 6 P 13. Mémoire Fin d'Étude, Université d'Ouargla, 2011.
- [5] **A.Toumine**, Cours de Fabrication – usinage par enlèvement de copeaux.
- [6] **B.Benmohammed**, Cours de Fabrication Mécanique, Université de Batna 2008.
- [7] **P.H. Gille**, Commande numérique des machines-outils, Technique de l'ingénieur, Traité génie mécanique, B 7130, pp.3, 1997.
- [8] **C. Sandvik**, Fraisage, Principes, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique. BM 7 082, pp.5, 1997.
- [9] **K.Mawussi, S.Lavernhe , C.Lartigue**, Usinage de poches en UGV – Aide au choix de stratégies , Article sélectionné à l'issue de la conférence CPI'2003. 22-24 octobre 2003 à Meknès .
- [10] **E.Bahloul**, Optimisation du Choix des Outils de Coupe pour L'evidement des Poches Quadrilateres en 3D, Mémoire Fin d'Étude, Université de Batna, 2009.
- [11] **C. Barlier, B. Poulet**, Mémotech génie mécanique : Productique mécanique, Deuxième édition – Editions CASTELLA, 1999.

Annexe

Programme de triangle

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%                               Programme d'optimisation du temps d'usinage                               %%
%%                               et choix de l'outil correspondant                                         %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

display '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%'
display '%%                               Programme d optimisation du temps d usinage                               %%'
display '                               et choix de l outil correspondant                                         %%'
display '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%'

global A ;
global Af ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Définition des paramètres de la poche à usiner
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%L01=94;
%L02=85;
%L03=80;
af1=57.82*pi/180;%1.0091;
af2=52.80*pi/180;%0.9215;
af3=69.38*pi/180;%1.2109;
A=[L01 L02 L03];
Af=[af1 af2 af3];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Profondeur de la poche
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
prof =20;
ap =3;
m=prof/ap;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Jeu d'outils disponible
xd=[4 5 6 7 8 9 10 11 12.5 14 15 16 18 20];
% xd =4:0.1:20
% Ndx=161;
Ndx=14;
xdc = zeros(1,14); % le jeu d'outils vérifiant les contraintes
yc = zeros(2,14);
    for i=1:14
        yc(:,i)= contraintesLpi_tr(xd(i));
        if (yc(1,i)<0&yc(2,i)<0)
            xdc(i)=xd(i);
        else
            xdc(i)=0;
        end
    end
end
x0 = xdc(11);% Les valeurs initiales
LB = min(xd);% Les bornes inférieures
UB = max(xdc);% Les bornes supérieure
% l'avance par dent
fz1=[13 20 25 30 35 40 45 50 55 50 50 55 55 55];
fz=fz1*10^(-3);
%nombre de dents
z=[4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 5 6 6];
d=2*xd;
% la vitesse de coupe
vc=28;%m/min
% calcul de la vitesse d'avance
i=1;

```

```

while i<=14
    N(i)=vc*1000/(pi*d(i));%tour/min
    vf(i)=fz(i)*z(i)*N(i);%m/min
    i=i+1;
end
lzi =zeros(1,Ndx); % Logueur zigzag interieur
lci =zeros(1,Ndx);% logueur contour interieur
lsi =zeros(1,Ndx);% logueur spirale interieur
lc =zeros(1,Ndx);% longueur des coins

tzig =zeros(1,Ndx); % temps d'usinage zigzg
tcont =zeros(1,Ndx);%temps d'usinage contour
tspir =zeros(1,Ndx);%temps d'usinage spirale
tcoin=zeros(1,Ndx); %temps d'usinage coin
for i=1:Ndx
    x(1)=xd(i);
    lci(i) = longueurpic_tr(x);
    lc(i)   = longueurcoin_tr(x);
    lzi(i) = longueurzig_tr(x);
    lsi(i) = longueurpis_tr(x);
end%
for i=1:14
    tzig(i) =m*(lzi(i)/vf(i)+lc(i)/vf(1));
    tcont(i) =m*(lci(i)/vf(i)+lc(i)/vf(1));
    tspir(i) =m*(lsi(i)/vf(i)+lc(i)/vf(1));
    tcoin(i) = m*lc(i)/vf(i);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Optimisation de la stratégie zigzag
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
maxiter=1000000;
options = optimset('LargeScale','off');
options = optimset('MaxFunEvals', maxiter);
[x,Lpi]= ...
fmincon(@longueurzig_tr,x0,[],[],[],[],LB,UB,@contraintesLpi_tr,options);
tz =tzig(1);
for i=2:14
    if(xdc(i)>0)
        if(tz>tzig(i))
            tz=tzig(i);
            tzi=m*lzi(i)/vf(i);
            tcoin=m*lc(i)/vf(1);
            Rz=xd(i);
        end
    end
end
display 'Temps d usinage coin pour la stratégie zigzag:'
tcoin=tcoin %Temps d'usinage coin pour la stratégie zigzag
display 'minutes'
display 'Temps d usinage interieur pour la stratégie zigzag:'
tzi=tzi %Temps d'usinage interieur pour la stratégie zigzag
display 'minutes'
display 'Temps d usinage totale pour la stratégie zigzag:'
tz=tz %Temps d'usinage totale pour la stratégie zigzag
display 'minutes'
display 'Rayon doutil optimal pour la stratégie zigzag:'
Rz=Rz % Rayon d'outil optimal pour la stratégie zigzag
display 'mm'

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Optimisation de la stratégie contour
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[x,Lpi]= ...
fmincon(@longueurpic_tr,x0,[],[],[],[],LB,UB,@contraintesLpi_tr,options)
    tc =tcont(1);
    for i=2:14
        if(xdc(i)>0)
            if(tc>tcont(i))
                tc=tcont(i);
                tci=m*lci(i)/vf(i);
                tcoin=m*lc(i)/vf(1);
                Rc=xd(i);
            end
        end
    end
    display 'Temps d usinage coin pour la stratégie contour:'
    tcoin=tcoin %Temps d'usinage coin pour la stratégie contour
    display 'minutes'
    display 'Temps d usinage interieur pour la stratégie contour:'
    tci=tci %Temps d'usinage interieur pour la stratégie contour
    display 'minutes'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Optimisation de la stratégie spirale
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[x,Lpi]= ...
fmincon(@longueurpis,x0,[],[],[],[],LB,UB,@contraintesLpi_tr,options)
ts =tspir(1);
    for i=2:14
        if(xdc(i)>0)
            if(ts>tspir(i))
                ts=tspir(i);
                tsi=m*lsi(i)/vf(i);
                tcoin=m*lc(i)/vf(1);
                Rs=xd(i);
            end
        end
    end
    display 'Temps d usinage coin pour la stratégie spirale:'
    tcoin=tcoin %Temps d'usinage coin pour la stratégie spirale
    display 'minutes'
    display 'Temps d usinage interieur pour la stratégie spirale:'
    tsi=tsi %Temps d'usinage interieur pour la stratégie spirale
    display 'minutes'
    display 'Temps d usinage totale pour la stratégie spirale:'
    ts=ts%Temps d'usinage totale pour la stratégie spirale
    display 'minutes'
    display 'Rayon doutil optimal pour la stratégie spirale:'
    Rs=Rs% Rayon d'outil optimal pour la stratégie spirale
    display 'mm'
    figure(1)
    plot(xd,tcont,'+-',xd,tzig,'d-',xd,tspir,'b-');
    xlabel 'Rayon d'outils (mm)'
    ylabel 'Temps usinage (mn)'
    grid on
    figure(2)
    plot(xd,(lci+lc)*m,'r',xd,(lzi+lc)*m,'b',xd,(lsi+lc)*m,'g');
    grid on
    xlabel ' Rayon d outils (mm)'
    ylabel 'Longueur interieure (mn)'

```

```

display 'pas de triangulaire'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% la longueur de trajectoires d'outils de coupe pour la partie intérieure %
%                               stratégie zigzag                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function Lpi =longueurzig_tr(x)
%les paramètres géométriques de la poche
global A;
global Af;
%
%L01=94;
%L02=85;
%L03=80;%
%alpha(1)=1.0091;%57.82;
%alpha(2)=0.9215;%52.80;
%alpha(3)=1.2109;%69.38;
L01=A(1);
L02=A(2);
L03=A(3);
alpha =Af;
%ro:le coefficient de recouvrement d'usinage
ro=0.9;
lv=L02-x(1)*cot(alpha(2)/2)-x(1)*cot(alpha(3)/2);
h=(L03-x(1)*cot(alpha(1)/2)-x(1)*cot(alpha(3)/2))*sin(alpha(1));% La
hauteur
g=h/(2*ro*x(1));
% % coefficient de correction
E=floor(g)/g;
% nombre d'incréments
if g-floor(g)==0
    n=E*g;
else
    n=E*g+1;
end
% l'incrément
p=h/n;
g=lv*sin(alpha(2))/p;
n=floor(g);
lh=0;
lm =0;
lc =0;
for i=1:n+1
    % longueur de segments horizontaux
    lh=lh+(L01-x(1)*cot(alpha(1)/2)-x(1)*cot(alpha(2)/2)-p*(i-1)*...
        (cot(alpha(1))+cot(alpha(2))));
end
% la longueur entre incréments
lm=lm+(1/2*((h/sin(alpha(1)))+(L02-x(1)*cot(alpha(2)/2)-...
    x(1)*cot(alpha(3)/2)));
% la longueur de contournage
lc=lc+(L01-x(1)*cot(alpha(1)/2)-2*x(1)*cot(alpha(2)/2)+...
    L02-2*x(1)*cot(alpha(3)/2)-x(1)*cot(alpha(2)/2)+...
    h/sin(alpha(1)));
% % la longueur de la partie intérieure
Lpi=(lh+lm+lc);
End

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      la longueur de trajectoire d'usinage de la partie intérieure
%      stratégie CONTOURS PARALLELES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function Lpic = longueurpic_tr(x)
global A;
global Af;
%les paramètres géométriques de la poche
%L01=94;
%L02=85;
%L03=80;
%
%alpha(1)=1.0091;%57.82;
%alpha(2)=0.9215;%52.80;
%alpha(3)=1.2109;%69.38;
L01=A(1);
L02=A(2);
L03=A(3);
alpha =Af;
%ro:le coefficient de recouvrement d'usinage
ro=0.9;
% Calcul des longueurs des segments des contours
L11=L01-x(1)*cot(alpha(1)/2)-x(1)*cot(alpha(2)/2);
L12=L02-x(1)*cot(alpha(2)/2)-x(1)*cot(alpha(3)/2);
L13=L03-x(1)*cot(alpha(1)/2)-x(1)*cot(alpha(3)/2);
Ltemp = L11+L12+L13;
Lcont=0;
nbr=0;
while (Ltemp>0)
    % pause
    if (Ltemp >=0)
        Lcont =Lcont+Ltemp ;
        Ltemp = Ltemp-2*x(1)*cot(alpha(1)/2)-2*x(1)*cot(alpha(2)/2)...
                -2*x(1)*cot(alpha(2)/2)-2*x(1)*cot(alpha(3)/2)...
                -2*x(1)*cot(alpha(1)/2)-2*x(1)*cot(alpha(3)/2);
        nbr=nbr+1;
    end
end
nbr=nbr;
%La longueur totale d'usinage de la partie intérieur en fonction de rayon
Lpic=Lcont+(nbr-1)*2*ro*x(1)/sin(alpha(1)/2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      la longueur de trajectoire d'usinage de la partie intérieure
%      stratégie SPIRALE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Lpis = longueurpis_tr(x)
global A;
global Af;
%les paramètres géométriques de la poche
%L01=94;
%L02=85;
%L03=80;
%
%alpha(1)=1.0091;%57.82;
%alpha(2)=0.9215;%52.80;
%alpha(3)=1.2109;%69.38;
L01=A(1);
L02=A(2);

```

vi

```

% le rayon de l'outil pour l'usinage des coins
% Lcoin=2*(R-Rl)*cot(alpha(i)/2);
LcoinT=0;
Lcoin=0;
i=1;
for i=1:3
    W(i)=(R-r(i))*(1/(sin(alpha(i)/2))-1);
    if W(i)<2*ro*Rl
        %Lcoin =2*(R-Rl)*cot(alpha(i)/2);
        if Rl:r(i)
            Lcoin =2*(R-Rl)*cot(alpha(i)/2);
        end
        if Rl<r(i)
            Lcoin =2*(R-Rl)*cot(alpha(i)/2)+(r(i)-Rl)*(pi-alpha(i));
        end
    end
    if W(i)>2*ro*Rl
        h=((R-Rl)/sin(alpha(i)/2))-(R+ro*Rl);
        g=h/(2*ro*Rl);
% % coefficient de correction
E=floor(g)/g;
% nombre d'incréments
if g-floor(g)==0
    nc=E*g;
else
    nc=E*g+1;
end
    k=1;
    L=0;
    Lm=0;
    Lc=0;
    Larc=0;
    % Lm:la longueur d'entre incréments pour un angle
    Lm=(R-Rl)*cot(alpha(i)/2);
    % Lc:la longueur du contour pour un angle
    Lc=2*Lm;
    if Rl:r(i)
        for k = 1:nc
            % L1:la longueur des arcs pour un angle
            L=L+((R+(2*k-1)*ro*Rl)*(pi-alpha(i)-2*acos((R-Rl)/(R+(2*k-1)*ro*Rl))));
        end
    end
    if Rl<r(i)
        Larc=(r(i)-Rl)*((pi-alpha(i))/2);
    end
    Lcoin=L+Lm+Lc+Larc;
end
%le temps d'usinage des coins
LcoinT=LcoinT+Lcoin;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% les contraintes d'optimisation pour la partie intérieure %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [co, coeq] = contraintesLpi_tr(x)
global A;
global Af;
L01=A(1);
L02=A(2);
L03=A(3);

```

```

alpha =Af;
% alpha1=1.0091;%57.82;
% alpha2=0.9215;%52.80;
co=[ 2*x(1)-L02+((L02/2)*sin(alpha(2))); 2*x(1)-L01+2*(cos(alpha(1)))*(L03-
(L01/2)*cos(alpha(1))))];
coeq = [];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Programme de rectangle

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%                               Programme d'optimisation du temps d'usinage                               %%
%%                               et choix de l'outil correspondant                                       %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
display '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%'
display '%%                               Programme d optimisation du temps d usinage                               %%'
display '                               et choix de l outil correspondant                                       %%'
display '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%'
global A;
global Af;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Définition des paramètres de la poche à usiner
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
L01=80;
L02=60;
L03=80;
L04=60;
af1=90*pi/180;%1.5707;
af2=90*pi/180;%1.5707;
af3=90*pi/180;%1.5707;
af4=90*pi/180;%1.5707;
A= [L01 L02 L03 L04];
Af=[af1 af2 af3 af4];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Profondeur de la poche
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
prof =20;
ap =3;
m=floor(prof/ap);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Jeu d'outls disponible
xd=[4 5 6 7 8 9 10 11 12.5 14 15 16 18 20];
% xd =4:0.1:20
% Ndx=161;
Ndx=14;
xdc = zeros(1,14); % le jeu d'outils vérifiant les contraintes
yc = zeros(2,14);
for i=1:14
yc(:,i)=contraintesLpi_rec(xd(i));
if (yc(1,i)<0&&yc(2,i)<0)
xdc(i)=xd(i);
else
xdc(i)=0;
end
end

x0 = xdc(11);                               % Les valeurs initiales
LB = min(xd) ;                               % Les bornes inférieures
UB = max(xdc);                               % Les bornes supérieure

```



```

% l'avance par dent
fz1=[13 20 25 30 35 40 45 50 55 50 50 55 55 55];
fz=fz1*10^(-3);
%nombre de dents
z=[4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 5 6 6];
d=2*xd;
% la vitesse de coupe
vc=28;%m/min
% calcul de la vitesse d'avance
i=1;
while i<=14
N(i)=vc*1000/(pi*d(i));%tour/min
vf(i)=fz(i)*z(i)*N(i);%m/min
i=i+1;
end
lzi =zeros(1,Ndx); % Logueur zigzag interieur
lci =zeros(1,Ndx);% logueur contour interieur
lsi =zeros(1,Ndx);% logueur spirale interieur
lc =zeros(1,Ndx);% longueur des coins
tzig =zeros(1,Ndx); % temps d'usinage zigzg
tcont =zeros(1,Ndx);%temps d'usinage contour
tspir =zeros(1,Ndx);%temps d'usinage spirale
tcoin=zeros(1,Ndx); %temps d'usinage coin
for i=1:Ndx
x(1)=xd(i);
lci(i) = longueurpic_rec(x);
lc(i) = longueurcoin_rec(x);
lzi(i)= longueurzig(x);
lsi(i)= longueurpis_rec(x);
end%
for i=1:14
tzig(i) =m*(lzi(i)/vf(i)+lc(i)/vf(1));
tcont(i) =m*(lci(i)/vf(i)+lc(i)/vf(1));
tspir(i) =m*(lsi(i)/vf(i)+lc(i)/vf(1));
tcoin(i) = m*lc(i)/vf(i);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Optimisation de la stratégie zigzag
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
maxiter=1000000;
options = optimset('Algorithm','sqp','MaxFunEvals', maxiter);
% options = optimset('MaxFunEvals', maxiter);
%[x,Lpi]= ...
fmincon(@longueurzig(x),x0,[],[],[],[],LB,UB,@contraintesLpi_rec,options);
tz =tzig(1);
    for i=2:14
        if(xdc(i)>0)
            if(tz>tzig(i))
                tz=tzig(i);
                tzi=m*lzi(i)/vf(i);
                tcoin=m*lc(i)/vf(1);
                Rz=xd(i);
            end
        end
    end
    display 'Temps d usinage coin pour la stratégie zigzag:'
    tcoin=tcoin %Temps d'usinage coin pour la stratégie zigzag
    display 'minutes'
    display 'Temps d usinage interieur pour la stratégie zigzag:'
    tzi=tzi %Temps d'usinage interieur pour la stratégie zigzag
    display 'minutes'

```

```

display 'Temps d usinage totale pour la stratégie zigzag:'
tz=tz %Temps d'usinage totale pour la stratégie zigzag
display 'minutes'
display 'Rayon doutil optimal pour la stratégie zigzag:'
Rz=Rz % Rayon d'outil optimal pour la stratégie zigzag
display 'mm'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Optimisation de la stratégie contour
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[x,Lpi_rec]= ...
fmincon(@longueurpic_rec,x0,[],[],[],[],LB,UB,@contraintesLpi_rec,options);
tc =tcont(1);
for i=2:14
    if(xdc(i)>0)
        if(tc>tcont(i))
            tc=tcont(i);
            tci=m*lci(i)/vf(i);
            tcoin=m*lc(i)/vf(1);
            Rc=xd(i);
        end
    end
end
display 'Temps d usinage coin pour la stratégie contour:'
tcoin=tcoin %Temps d'usinage coin pour la stratégie contour
display 'minutes'
display 'Temps d usinage interieur pour la stratégie contour:'
tci=tci %Temps d'usinage interieur pour la stratégie contour
display 'minutes'
display 'Temps d usinage totale pour la stratégie contour:'
tc=tc %Temps d'usinage totale pour la stratégie contour
display 'minutes'
display 'Rayon doutil optimal pour la stratégie contour:'
Rc=Rc %Rayon d'outil optimal pour la stratégie contour
display 'mm'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Optimisation de la stratégie spirale
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[x,Lpi_rec]= ...
fmincon(@longueurpis_rec,x0,[],[],[],[],LB,UB,@contraintesLpi_rec,options);
ts =tspir(1);
for i=2:14
    if(xdc(i)>0)
        if(ts>tspir(i))
            ts=tspir(i);
            tsi=m*lsi(i)/vf(i);
            tcoin=m*lc(i)/vf(1);
            Rs=xd(i);
        end
    end
end
display 'Temps d usinage coin pour la stratégie spirale:'
tcoin=tcoin %Temps d'usinage coin pour la stratégie spirale
display 'minutes'
display 'Temps d usinage interieur pour la stratégie spirale:'
tsi=tsi %Temps d'usinage interieur pour la stratégie spirale
display 'minutes'
display 'Temps d usinage totale pour la stratégie spirale:'
ts=ts %Temps d'usinage totale pour la stratégie spirale
display 'minutes'
display 'Rayon doutil optimal pour la stratégie spirale:'
Rs=Rs %Rayon d'outil optimal pour la stratégie spirale

```

```

display 'mm'
figure(1)
plot(xd,tzig,'b.-',xd,tcont,'r+-',xd,tspir,'g-*');
xlabel 'Rayon d outils (mm)'
ylabel 'Temps usinage (mn)'
grid on
figure(2)
plot(xd,(lzi+lc)*m,'b-',xd,(lci+lc)*m,'r-',xd,(lsi+lc)*m,'g-');
grid on
xlabel ' Rayon d outils (mm)'
ylabel 'Longueur partie int+coin (mm)'
display 'pas de rectangulaire'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% la longueur de trajectoires d'outils de coupe pour la partie intérieure%
%                               stratégie zigzag                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Lpi =longueurzig(x)%les paramètres géométriques de la poche
global A;
global Af;
%
% L01=80;
% L02=60;
% L03=80;
% L04=60;%
% alpha(1)=1.5707;%90;
% alpha(2)=1.5707;%90;
% alpha(3)=2.5707;%90;
% alpha(4)=1.5707;%90;
L01=A(1);
L02=A(2);
L03=A(3);
L04=A(4);
alpha =Af;
ro=0.9;
lh=(L02/2)-x(1);
h=L02-(2*x(1));
g=h/(2*ro*x(1));
% % coefficient de correction
E=floor(g)/g;
% nombre d'incréments
if g-floor(g)==0
    n=E*g;
else
    n=E*g+1;
end
% l'incrément
p=h/n;
g1=lh/p;
n1=floor(g1);
n2=(n-n1);
lh1=0;
lh1=0;
lh2=0;
lm=0;
lc=0;
for i=1:n1+1
    % longueur de segments horizontaux (zone 1)
    lh1=lh1+(i-1)*(L01-2*x(1));
end
l2=(L01-2*x(1));

```

```

lh2=0;
j=1;
while(j<n2)
    %longueure de segments horizontaux (zone 2)
    lh2=lh2+(j-1)*(l2);
    j=j+1;
end
% la longueur entre incréments
lm=1/2*(L04-2*x(1))+1/2*(L02-2*x(1));
% la longueur de contournage
lc=L01+L02+L03+L04-8*x(1)+cos(alpha(1));
% % la longueur de la partie intérieure
Lpi=(lh1+lh2+lm+lc);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% la longueur de trajectoire d'usinage de la partie intérieure
% stratégie CONTOURS PARALLELES %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Lpic = longueurpic_rec(x)
global A;
global Af;
%les paramètres géométriques de la poche
% L01=80;
% L02=60;
% L03=80;
% L04=60;%
% alpha(1)=1.5707;%90.0;
% alpha(2)=1.5707;%90.0;
% alpha(3)=1.5707;%90.0;
% alpha(4)=1.5707;%90.0;
L01=A(1);
L02=A(2);
L03=A(3);
L04=A(4);
alpha =Af;
%ro:le coefficient de recouvrement d'usinage
ro=0.9;
% Calcul des longueurs des segments des contours
L11=L01-2*x(1);
L12=L02-2*x(1);
L13=L03-2*x(1);
L14=L04-2*x(1);
Ltemp = L11+L12+L13+L14;
Lcont=0;
nbr=0;
while (Ltemp>0)
    % pause
    if (Ltemp >=0)
        Lcont =Lcont+Ltemp ;
        Ltemp = Ltemp-16*ro*x(1);
        nbr=nbr+1;
    end
end
nbr=nbr;
%La longueur totale d'usinage de la partie intérieur en fonction de rayon
Lpic=Lcont+(nbr-1)*2*ro*x(1)/sin(alpha(1)/2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% la longueur de trajectoire d'usinage de la partie intérieure
% stratégie SPIRALE %

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Lpis = longueurpis_rec(x)
global A;
global Af;
%les paramètres géométriques de la poche
% L01=80;
% L02=60;
% L03=80;
% L04=60;%
% alpha(1)=1.5707;%90.0;
% alpha(2)=1.5707;%90.0;
% alpha(3)=1.5707;%90.0;
% alpha(4)=1.5707;%90.0;
L01=A(1);
L02=A(2);
L03=A(3);
L04=A(4);
alpha =Af;
%
ro=0.9;
% Calcul des longueurs des segments des contours
L11=L01-2*x(1);
L12=L02-2*x(1);
L13=L03-2*x(1);
L14=L04-2*x(1)-2*ro*x(1);
Ltemp = L11+L12+L13+L14;
Lcont=0;
nbr=0;
while (Ltemp>0)
    % pause
    if (Ltemp >=0)
        Lcont =Lcont+Ltemp ;
        Ltemp = Ltemp-16*ro*x(1);
        nbr=nbr+1;
    end
end
nbr=nbr;
%La longueur totale d'usinage de la partie intérieur en fonction de rayon
Lpis=Lcont-(nbr-1)*2*ro*x(1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%          les contraintes d'optimisation pour la partie intérieure
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [c, ceq] = contraintesLpi_rec(x)
global A;
global Af;
L01=A(1);
L02=A(2);
L04=A(4);
alpha =Af;
% alpha1=1.5707;%90.0;
% alpha2=1.5707;%90.0;
c = [2*x(1)-L01+(L04/6)*sin(alpha(1))+(L02/6)*sin(alpha(2)); 2*x(1)-L02];
ceq = [];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Programme de cercle

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%                               Programme d'optimisation du temps d'usinage                               %%
%%                               et choix de l'outil correspondant                                         %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
display '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%'
display '%%                               Programme d optimisation du temps d usinage                               %%'
display '                               et choix de l outil correspondant                                         %%'
display '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%'
global A;
global Af;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Définition des paramètres de la poche à usiner
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Rc=30;
af=45.0*pi/180;%0.7853;
A= Rc;
Af=af;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Profondeur de la poche
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
prof =20;
ap =3;
m=prof/ap;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Jeu d'outls disponible
xd=[4 5 6 7 8 9 10 11 12.5 14 15 16 18 20];
% xd =4:0.1:20
% Ndx=161;
Ndx=14;
xdc = zeros(1,14); % le jeu d'outils vérifiant les contraintes
yc = zeros(2,14);
for i=1:14
    yc(:,i)=contraintesLpi_cir(xd(i));
    if (yc(1,i)<0&&yc(2,i)<0)
        xdc(i)=xd(i);
    else
        xdc(i)=0;
    end
end
x0 = xdc(11); % Les valeurs initiales
LB = min(xd) ; % Les bornes inférieures
UB = max(xdc); % Les bornes supérieure
% l'avance par dent
fz1=[13 20 25 30 35 40 45 50 55 50 50 55 55 55];
fz=fz1*10^(-3);
%nombre de dents
z=[4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 5 6 6];
d=2*xd;
% la vitesse de coupe
vc=28;%m/min
% calcul de la vitesse d'avance
i=1;
while i<=14
    N(i)=vc*1000/(pi*d(i));%tour/min
    vf(i)=fz(i)*z(i)*N(i);%m/min
    i=i+1;
end
lci =zeros(1,Ndx);% logueur contour interieur

```

```

tcont =zeros(1,Ndx);%temps d'usinage contour
for i=1:Ndx
    x(1)=xd(i);
    lci(i) = longueurpic_cir(x);
end%
for i=1:14
    tcont(i) =m*(lci(i)/vf(i));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Optimisation de la stratégie contour
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[x,Lpi]= ...
fmincon(@longueurpic_cir,x0,[],[],[],[],LB,UB,@contraintesLpi_cir,options)
tc =tcont(1);
for i=2:14
    if(xdc(i)>0)
        if(tc>tcont(i))
            tc=m*lci(i)/vf(i);
            Rco=xd(i);
        end
    end
end
display 'Temps d usinage pour la stratégie contour:'
tc=tc %Temps d'usinage pour la stratégie contour
display 'minutes'
display 'Rayon doutil optimal pour la stratégie contour:'
Rco=Rco% Rayon d'outil optimal pour la stratégie contour
display 'mm'
figure(1)
plot(xd,tcont,'r*-');
xlabel 'Rayon d outils (mm)'
ylabel 'Temps usinage (mn)'
grid on
figure(2)
plot(xd,(lci)*m,'r-');
grid on
xlabel 'Rayon d outils (mm)'
ylabel 'Longueur interieure (mm)'
display 'pas de circulaire'

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      FIN      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      la longueur de trajectoire d'usinage de la partie intérieure
%      stratégie CONTOURS PARALLELES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Lpici = longueurpic_cir(x)
global A;
global Af;
%les paramètres géométriques de la poche
% Rc=30;
% alpha =0.7853;%45.0;
Rc=A;
alpha =Af;
%ro:le coefficient de recouvrement d'usinage
ro=0.9;
%L0:la longueur de première segments
L0=2*(Rc*sin(alpha/2));
%K:Nombre des segments du contour
K=8;

```

```

% Calcul des longueurs des segments des contours
L1= K*(L0-2*x(1)*sin(alpha/2));
Ltemp = L1;
Lcont=0;
nbr=0;
while (Ltemp>0)
    % pause
    if (Ltemp >=0)
        Lcont =Lcont+Ltemp ;
        Ltemp = Ltemp-K*(2*ro*x(1)*sin(alpha/2));
        nbr=nbr+1;
    end
end
% la longueur de contournage
lc=2*(Rc-x(1))*pi;
%La longueur totale d'usinage de la partie intérieur en fonction de rayon
Lpici=((Lcont+(nbr-1)*2*ro*x(1))+lc);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%          FIN          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%          les contraintes d'optimisation pour la partie intérieure
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [c, ceq] = contraintesLpi_cir(x)
global A;
global Af;
Rc=A;
alpha =Af;
% alpha=0.7853;%45.0;
c = [2*x(1)-2*Rc];
ceq = [];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%          FIN          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```


Résumé

La minimisation du temps de fabrication est un objectif qui doit être pris en compte dès le choix des paramètres d'usinage. Le diamètre de l'outil de coupe est un des paramètres qui influent énormément sur le temps d'usinage des différentes formes géométriques, en particulier les poches. Dans cette étude, nous proposons une méthodologie d'optimisation du choix des outils de coupe pour l'usinage des poches triangulaires, rectangulaires et circulaires.

Pour ce faire, nous avons développé trois modèles analytiques exprimant la longueur des trajets d'outils de coupe. Ensuite, nous avons structuré une méthode d'optimisation basée sur la programmation quadratique séquentielle. Pour valider notre approche, nous avons traité trois exemple d'application pour la validation de cette méthode .

Mots-clés: Poche, Optimisation, Trajectoire d'outil de coupe, Temps d'usinage .

Abstract

Minimizing the production time is a goal that must be taken into account in the selection of machining parameters. The diameter of the cutting tool is one of the parameters that greatly influence the machining time of different geometric shapes, especially the pockets. In this study, we propose a methodology to optimize the choice of cutting tools for the machining of pockets triangular, rectangular and circular.

To do this, we developed three analytical models expressing the length of the paths of cutting tools. Then, we have structured an optimization method based on sequential quadratic programming. To validate our approach, we treated three application examples for the validation of this method

Key words: Pocket, Optimization, Trajectory cutting tool, machining time .

يعتبر تخفيض زمن التصنيع من أهم الأهداف التي يجب أخذها بعين الاعتبار عند اختيار شروط القطع .
القطع من أهم الخصائص التي تؤثر على زمن تصنيع مختلف الأشكال الهندسية وبالأخص الجيوب. في هذه الدراسة قمنا
باقترح منهجية أمثلة لاختيار أدوات القطع الموجهة لتصنيع الجيوب المثلثة والمستطيلة والدائرية.
هذا قمنا بتطوير ثلاث نماذج تحليلية لطول مسار أداة القطع. بعد ذلك قمنا باستعمال البرمجة الترييبعية التعاقبية لحل
مع استعانتنا بثلاث أشكال تطبيقية بغرض إثبات طريقتنا.

الكلمات المفتاحية : وقت التصنيع.