

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

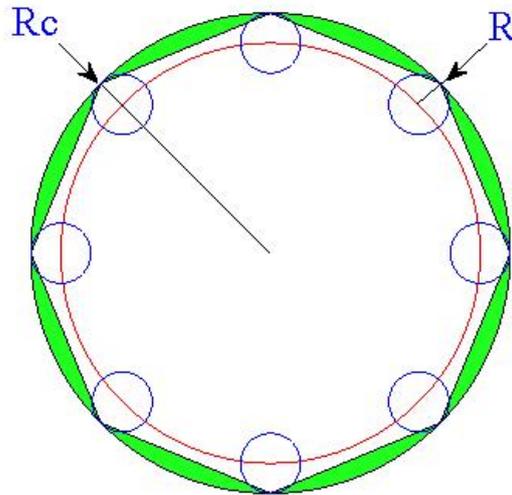


Figure II.22. Périmètre de contournage.

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 :

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

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

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

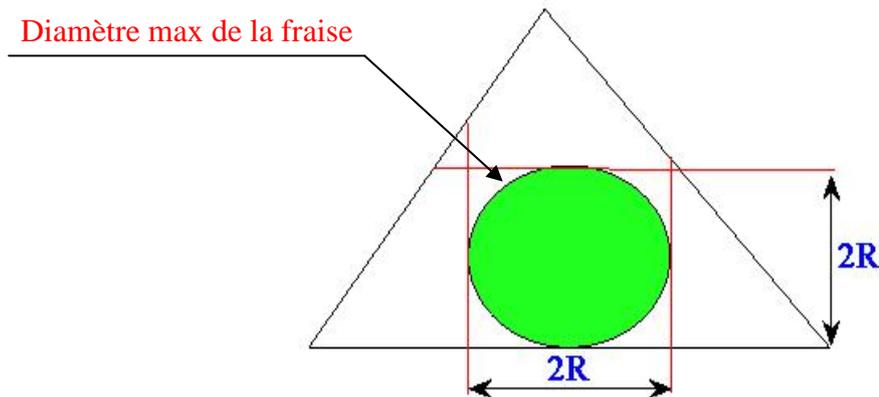


Figure III.1. Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche triangulaire.

Les jeux d'outils disponibles imposent une contrainte suivante :

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

- poches rectangulaires :

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

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

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

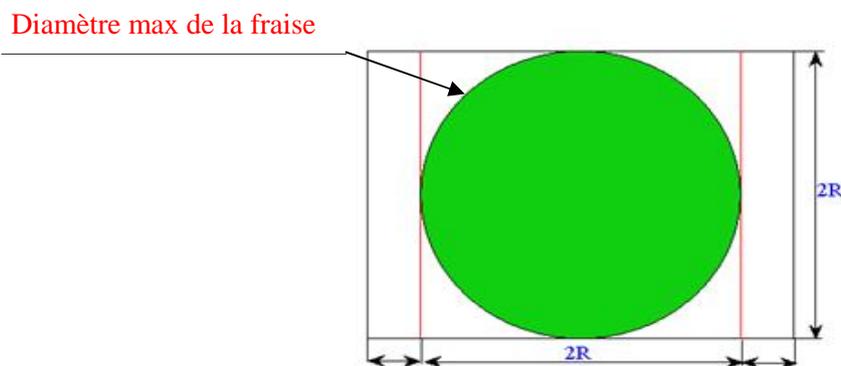


Figure III.2. Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche rectangulaire.

- poches circulaires :

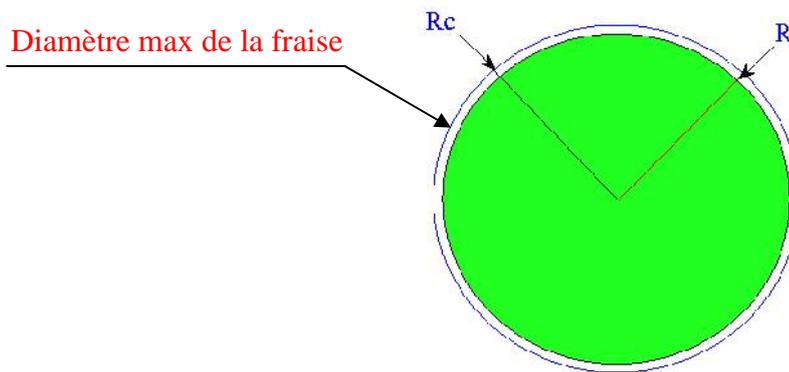


Figure III.3. Représentation des limites dues à la forme géométrique de la poche circulaire.

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 :

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

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 être utilisée une recherche linéaire de large itérations pour calculer un pas d'optimisation.

III.5 Méthodologie d'optimisation

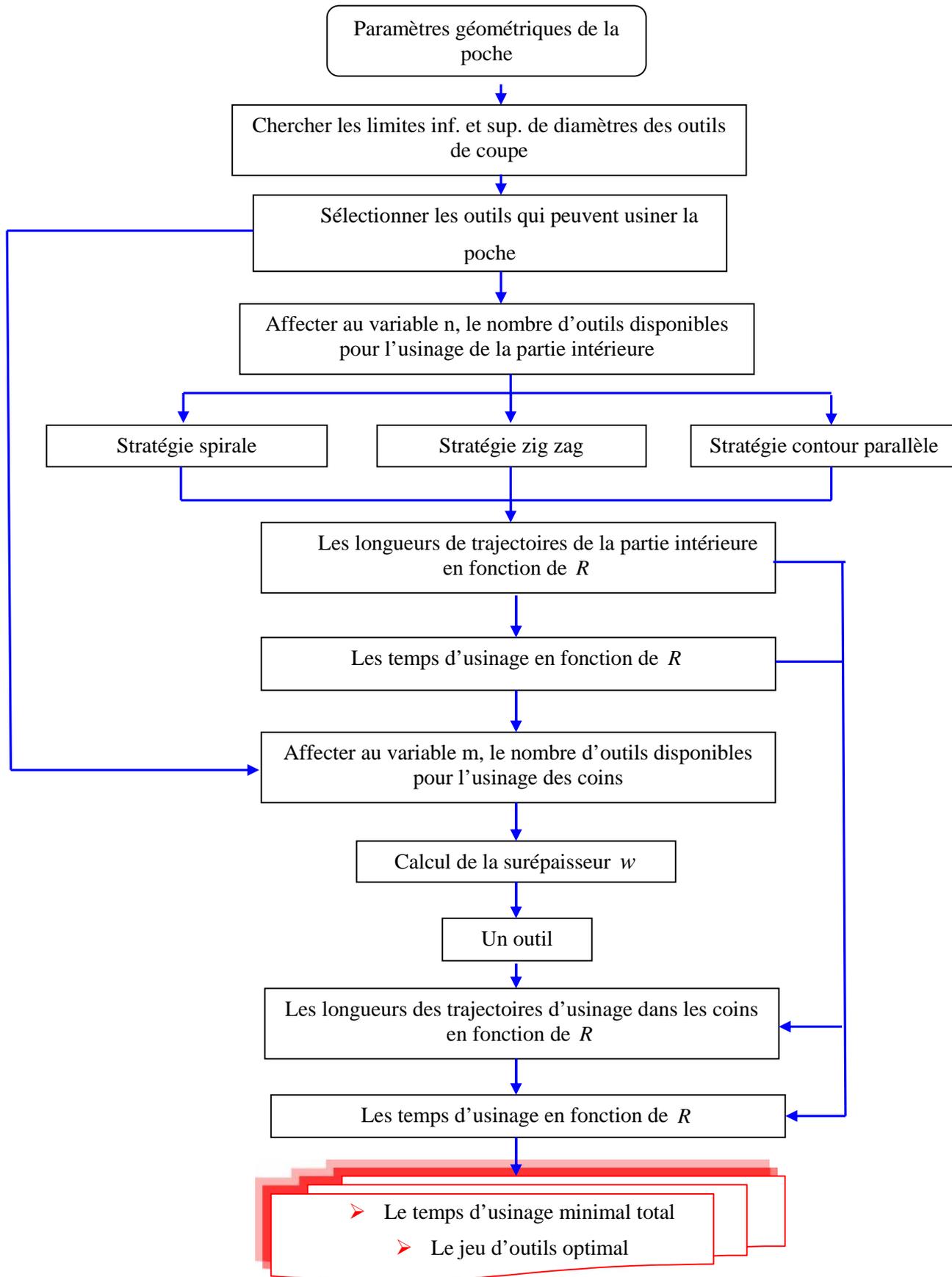


Figure III.4. Organigramme d'optimisation du choix des outils.

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)		
L01	L02	L03	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

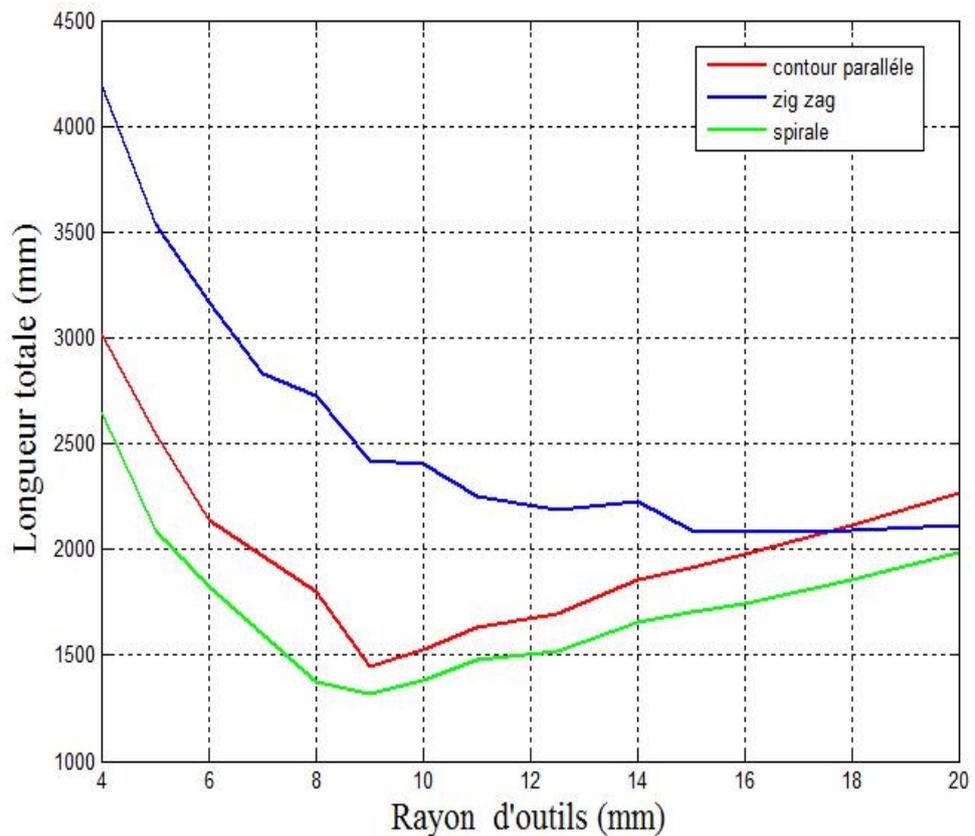


Figure III.5. Longueurs de la trajectoires de l'outil de coupe pour une poche triangulaire

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.

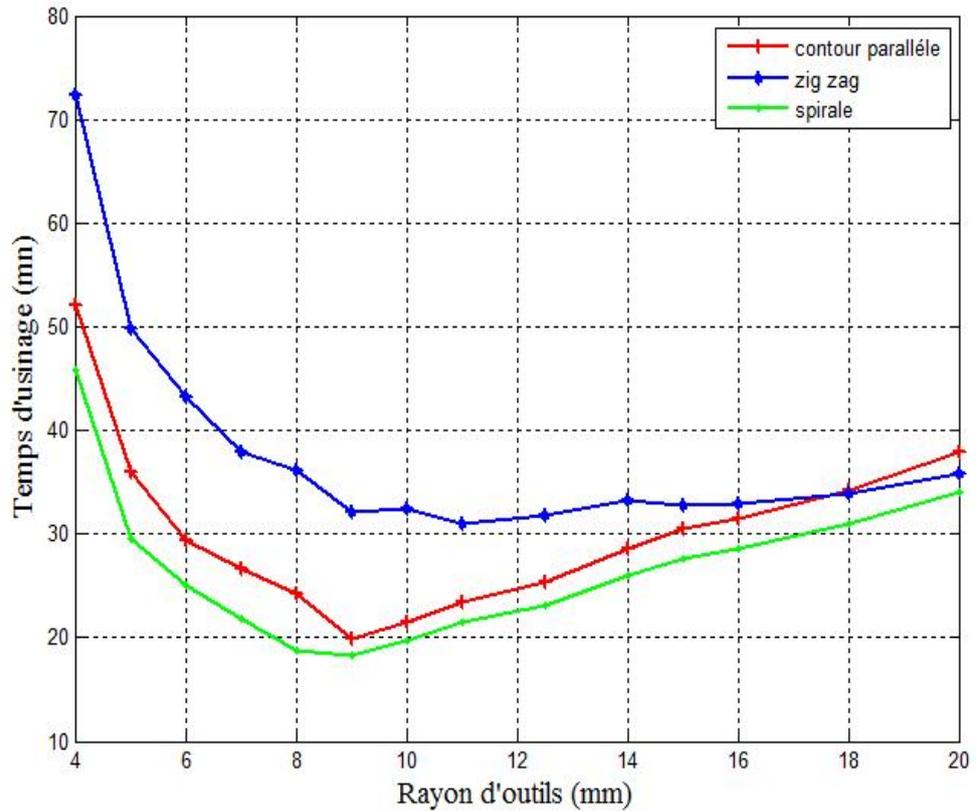


Figure III.6. Temps d'usinage de la poche triangulaire.

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 mêmes conditions de la poche triangulaire.

III.6.2.3 Graphes et commentaires

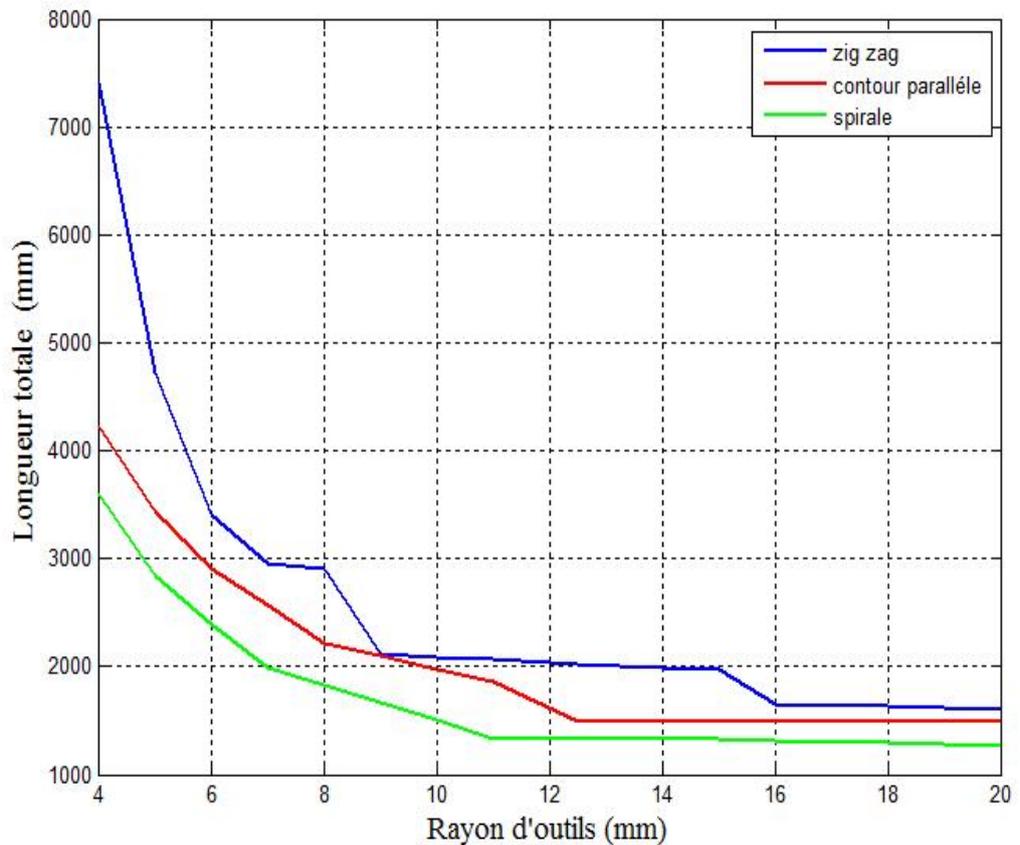


Figure III.7. Longueurs de la trajectoires de l'outil de coupe pour une poche rectangulaire.

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.

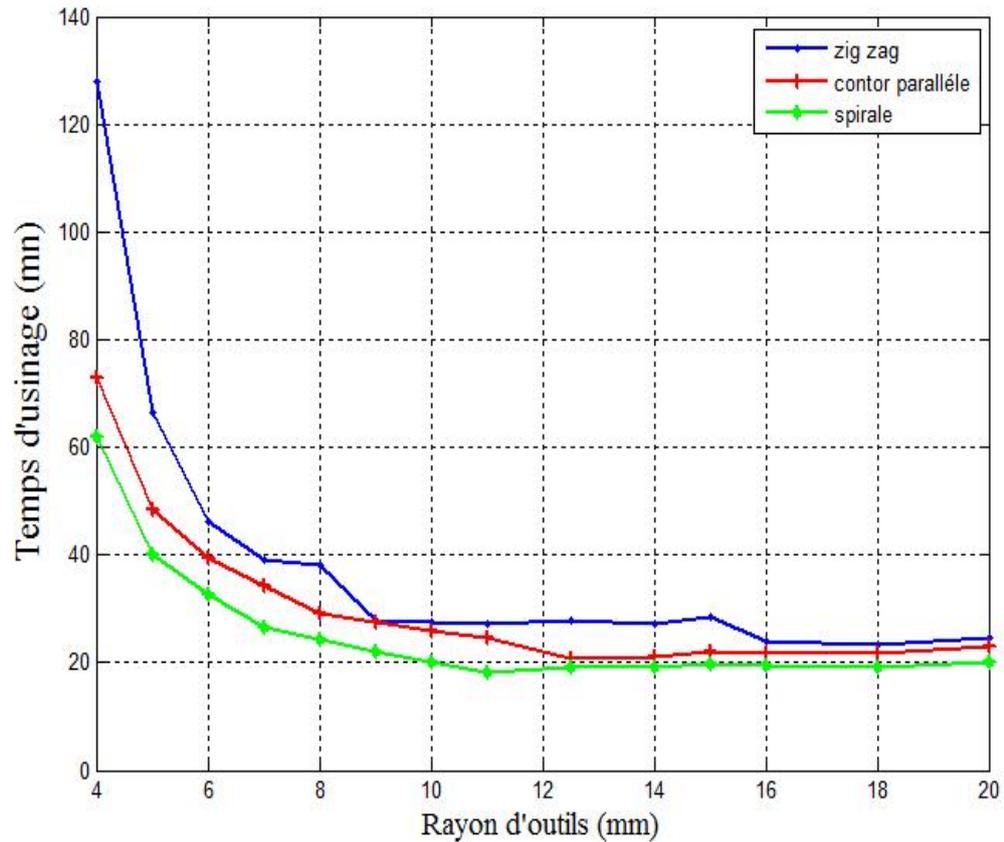


Figure III.8. Temps d'usinage de la poche rectangulaire.

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

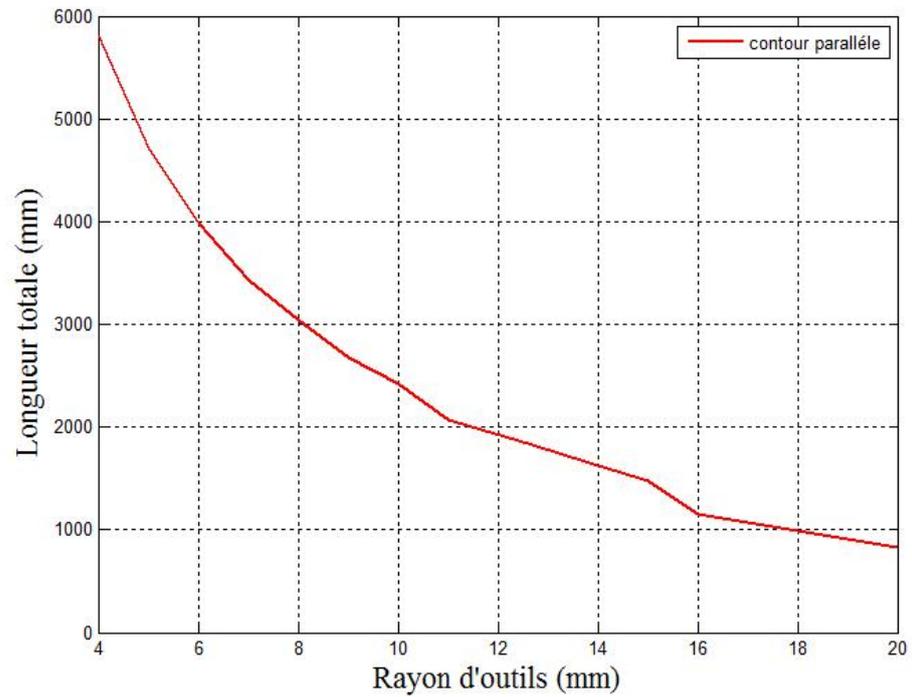


Figure III.9. Longueurs de la trajectoires de l'outil de coup pour une poche circulaire.

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..

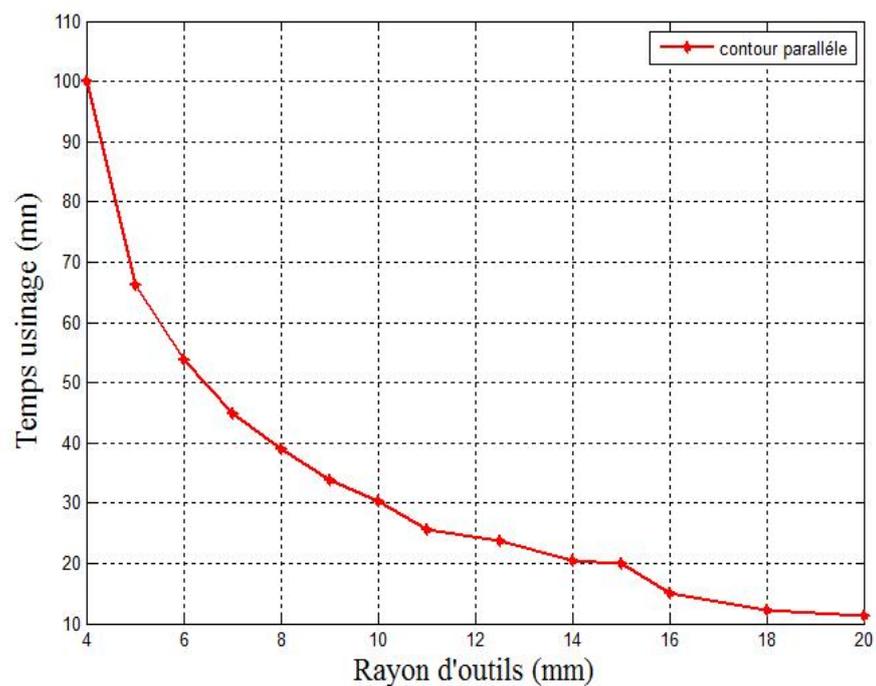


Figure III.10. Temps d'usinage de la poche circulaire.

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 CASTEILLA, 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 zigzag
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 outil 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 outil 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);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      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);

```

```

L03=A(3);
alpha =Af;
%ro:le coefficient de recouvrement d'usinage
ro=0.9;
% Calcul des longueurs des segments des spirale
L13=L03-x(1)*cot(alpha(1)/2)-x(1)*cot(alpha(3)/2);
L12=L02-x(1)*cot(alpha(3)/2)-x(1)*cot(alpha(2)/2);
L11=L01-x(1)*cot(alpha(1)/2)-x(1)*cot(alpha(2)/2);
Ltemp = L13+L12+L11;
Lspir=0;
nbr=0;
while (Ltemp>0)
    % pause
    if (Ltemp >=0)
        Lspir =Lspir+Ltemp ;
        Ltemp = Ltemp-2*x(1)*cot(alpha(1)/2)-x(1)*cot(alpha(3)/2)...
                -2*x(1)*cot(alpha(3)/2)-x(1)*cot(alpha(2)/2)...
                -2*x(1)*cot(alpha(1)/2)-x(1)*cot(alpha(2)/2);
        nbr=nbr+1;
    end
end
nbr = nbr;
%La longueur totale d'usinage de la partie intérieure en fonction de rayon
Lpis=Lspir-(nbr-1)*2*ro*x(1)/sin(alpha(1)/2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% la longueur de trajectoire d'usinage de l'outil de coupe dans
% les coins
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function LcoinT = longueurcoin_tr(x)
%les paramètres géométriques de la poche
%
%L01=94;
%L02=85;
%L03=80;
global A ;
global Af ;
%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;
r(1)=4;
r(2)=4;
r(3)=4;
% j=1;
% rmin=r(j);
% while j<=3
%     if rmin>r(j)
%         rmin=r(j);
%     end
%     j=j+1;
% end
%ro:le coefficient de recouvrement d'usinage
ro=0.9;
% le rayon optimale pour l'usinage de la partie intérieure
R1=4;
R=x(1);

```

```

% le rayon de l'outil pour l'usinage des coins
% Lcoin=2*(R-R1)*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*R1
        %Lcoin =2*(R-R1)*cot(alpha(i)/2);
        if R1:r(i)
            Lcoin =2*(R-R1)*cot(alpha(i)/2);
        end
        if R1<r(i)
            Lcoin =2*(R-R1)*cot(alpha(i)/2)+(r(i)-R1)*(pi-alpha(i));
        end
    end
    if W(i)>2*ro*R1
        h=((R-R1)/sin(alpha(i)/2))-(R+ro*R1);
        g=h/(2*ro*R1);
% % coefficient de correction
E=floor(g)/g;
% nombre d'incrémentes
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-R1)*cot(alpha(i)/2);
    % Lc:la longueur du contour pour un angle
    Lc=2*Lm;
    if R1:r(i)
        for k = 1:nc
            % L1:la longueur des arcs pour un angle
            L=L+((R+(2*k-1)*ro*R1)*(pi-alpha(i)-2*acos((R-R1)/(R+(2*k-1)*ro*R1))));
        end
    end
    if R1<r(i)
        Larc=(r(i)-R1)*((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 supérieures

```

```

% 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 zigzag
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 outil 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 outil 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 outil 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 rectengulaire'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 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 longueure entre incréments
lm=1/2*(L04-2*x(1))+1/2*(L02-2*x(1));
% la longueure de contournage
lc=L01+L02+L03+L04-8*x(1)+cos(alpha(1));
% % la longueure de la partie intérieure
Lpi=(lh1+lh2+lm+lc);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%     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);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%     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
end
display 'Temps d usinage pour la stratégie contour:'
tc=tc %Temps d'usinage pour la stratégie contour
display 'minutes'
display 'Rayon outil 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 longeure 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 التريبيعية التعاقبية لحل
مع استعانتنا بثلاث أشكال تطبيقية بغرض إثبات طريقتنا.

الكلمات المفتاحية : وقت التصنيع.