

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Par :

Hamitouche Billal

Barache Faouzi

Thème

Optimisation des conditions de coupe en tournage d'ébauche multi-passes A L'aide d'un algorithme génétique

Soutenu le 28/10/2020 devant le jury composé de:

Dr. Adjouadi.N

Présidente

Dr. Sahali Md.Akli

Encadreur

Dr. Bouzidi.S

Examinatrice

Année Universitaire 2019-2020

Remerciement

Dieu merci pour la santé, la volonté, le courage et la détermination qui nous ont accompagnés tout au long de la préparation de ce mémoire de Master et qui nous ont permis d'achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur **Mr SAHALI Md.Akli** pour Son soutien, et ses conseils et surtout ses encouragements.

Et **Mr A. BELAMRI** pour ses précieuses orientations.

Nous remercions également les membres de jury d'avoir consacré leur temps pour l'évaluation notre modeste travail en ce moment précis.

Toutes nos pensées vont vers nos honorables parents en reconnaissance à leur esprit de sacrifice et de dévouement ainsi qu'à leur soutien constant –moral et matériel- et ce, pour nous avoir permis de construire un avenir certain et en même temps réaliser nos rêves. A la fin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Merci

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers frères : Yacine, Menad, Redouane. Et mes belles
sœurs : Amira, Cylia, Assia. Et mes très chères sœurs : Saadia,
Ouardia, Kaissa.

Que dieux vous donne santé, bonheur, et courage et surtout réussite.

A tous mes proches et mes amis du cœur

A celle qui me donne la volonté de continuer dans mon avenir à me
surpassé toujours m'as bien aimé B.Widad.

A mon cher ami et Binôme Billal

B.Faouzi

Dédicace

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude :

A mes chers parents pour l'éducation qui m'ont transmise, avec tous les moyens et au pris de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, afin d'atteindre mes objectifs et ce depuis mon enfance.

A mes chers frères Abdou, Aimad

A mes chères sœurs Massicilia, Sabrina, Souad, Nesrine

A celle qui me donne la volonté de continuer dans mon avenir à me surpassé toujours m'as bien aimé M.Hakima

A tous mes amis et à tous ceux que j'aime et à toutes les personnes qui m'ont prodigués des encouragements et qui se sont données de la peine pour me soutenir durant cette formation.

A toute la promotion de Fabrication Mécanique et Productique : 2019-2020

A mes chers enseignants sans exception

A mon cher ami et Binôme Faouzi

H.Billal

Sommaire

Introduction générale

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE TOURNAGE

I.1 Introduction.....	2
I.2 Principe de base.....	2
I.2.1 Surfaces de la pièce	2
I.2.2 Propriétés des matériaux usinés	3
I.3 Conditions de coupe	3
I.3.1 Vitesse de coupe V_C	4
I.3.2 Vitesse d'avance V_f et l'avance par tour f	5
I.3.3 Profondeur de passe « a »	5
I.4 Eléments de l'outil	6
I.4.1 Constituant apparent de l'outil	6
I.4.1.1 Faces et les arêtes de l'outil	6
I.4.1.2 Angles de l'outil	8
I.4.2 Différent types des outils	9
I.4.3 Matériaux de l'outil	10
I.5 Opérations de tournage	14
I.6 Paramètres de coupe	15
I.6.1 Mouvement de l'outil et de pièce	16
I.6.2 Paramètres géométriques de coupe	17
I.7 Formation de copeau	18
I.8 Mécanisme d'endommagement des outils.....	19
I.8.1 Phénomènes provoquant l'usure	20
I.8.1.1 Phénomènes mécanique	20
I.8.1.2 Phénomène physico-chimiques	23
I.8.2 Influence des différents paramètres sur l'usure des outils	24
I.8.2.1 Influence des conditions de coupe	24
I.8.2.2 Influence de lubrification	25
I.8.2.3 Influence du couple mouvement de pièce / mouvement d'outil	25
I.9 Identification des phénomènes vibratoires générés par la coupe.....	25
I.9.1 Les vibrations libres.....	25
I.9.2 Les vibrations forcées.....	26
I.9.2.1 Vibrations forcées externes	26
I.9.2.2 Vibrations forcées internes	27
I.9.3 Les vibrations auto-excitées (le broutage ou « chatter »)	32

CHAPITRE II : OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE EN TOURNAGE	
II.1 Introduction.....	36
II.2 Optimisation mono-objectif	36
II.2.1 Définition	36
II.2.2 Optimisation des systèmes linéaire	37
II.2.3 Optimisation des systèmes non linéaires.....	39
II.2.4 Techniques d'optimisation mono-objective.....	39
II.3 Optimisation multi-objectif	40
II.3.1 Définition	40
II.3.2 Méthodes d'optimisation multi-objective	41
II.3.2.1 Approche par ε -contraintes	41
II.3.2.2 Méthode min-max	41
II.3.2.3 But à atteindre	42
II.3.2.4 Agrégation des objectifs	43
II.4 Optimisation par algorithme génétique	43
II.4.1 AG pour l'optimisation multi-objectif	45
II.4.2 PSO pour les problèmes multi-objectifs	46
II.4.2.1 Extension du PSO	46
II.4.2.2 MOPSO	48
II.5 Optimisation des conditions de coupe	49
II.5.1 Variables d'optimisation	49
II.5.2 Fonctions -objectifs	50
II.5.3 Contraintes de problème	51
II.6 Cas d'application en tournage d'ébauche multi-passes	51
II.6.1 Modèles d'optimisations retenues	52
II.6.1.1 Fonctions « objectif »	52
II.6.1.2 Fonctions « contrainte »	52
II.6.2 Cas de l'obturation de l'espace de recherche	54
II.6.2.1 Formulation multi-objectifs non contrainte	54
II.7 Algorithme génétique de tri non-dominé NSGA-II	55
II.8 Résultats et discussion	56
Conclusion générale.....	60
Références Bibliographiques....	61

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure .I.1 surfaces de la pièce.....	3
Figure .I.2 Le choix des conditions de coupe.....	4
Figure .I.3 Vitesse de coupe V_c	4
Figure .I.4 Vitesse d'avance.....	5
Figure .I.5 Les profondeurs de passe.....	6
Figure .I.6 éléments de l'outil.....	7
Figure .I.7 Présentation les faces et arête appartenant au cours de travail.....	7
Figure .I.8 angles du taillant (outil en main).....	8
Figure .I.9 angle du taillant (outil en travail).....	9
Figure .I.10 types d'outils porte-plaquettes.....	10
Figure .I.11 Disposition des matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté.....	11
Figure .I.12 Céramiques.....	13
Figure .I.13 présentation de mouvement de coupe et le mouvement d'avance.....	16
Figure .I.14 La relation entre l'angle de direction et les paramètres de coupe.....	17
Figure .I.15 configuration de coupe.....	18
Figure .I.16 manifestation de la formation de copeau.....	19
Figure .I.17 Diagramme d'usure en l'usinage.....	20
Figure .I.18 Processus d'usure par adhésion mécanique.....	21
Figure .I.19 Processus d'usure par abrasion.....	22
Figure .I.20 Processus d'usure par diffusion.....	23
Figure .I.21 Processus d'usure par oxydation.....	24
Figure .I.22 Vibrations libres.....	26
Figure .I.23 Vibrations forcées.....	27
Figure .I.24 effet de la formation d'une arête rapportée sur l'angle effectif de coupe.....	28
Figure .I.25 Description des interactions pièce - outil – copeau.....	30
Figure .I.26 Différents types de copeaux rencontrés.....	31
Figure .I.27 Influences, en coupe stationnaire, de la pente δ de la surface à usiner sur l'angle de cisaillement ϕ	32
Figure .I.28 Représentation de la variation instantanée des angles de coupes γ' et α' . γ_0 et α_0 sont respectivement l'angle coupe nominal et l'angle de dépouille nominale dans le plan de section orthogonal P_0	33
Figure .I.29 Vibrations auto-excitées.....	33
Figure .I.30 Schématisation du phénomène de régénération de la surface.....	34
Figure .I.31 Effet du couplage des modes directionnels.....	35

CHAPITRE II

Figure .II.1 Schéma d'une algorithmique génétique.....	45
Figure .II.2 Voisinage formé des deux plus proches particules.....	49
Figure .II.3 Voisinage en niche.....	49
Figure .II.4.a – Optimum performant dans l'espace faisable déterministe classique pour (n=2).....	57
Figure .II.4.b – Optimum performant dans l'espace faisable déterministe classique pour (n=3).....	57
Figure .II.4.c - Optimum performant dans l'espace faisable déterministe classique pour (n=4).....	58

Nomenclature et symboles

Symboles

Désignations et unités

(o, x, y, z)	Référentiel d'usinage
F_z, F_r, F_θ	Effort de coupe axial, radial et tangentiel
N	Vitesse angulaire de la broche (<i>tour/min</i>)
R_{th}	Rugosité théorique de la surface usinée (μm)
R_a	Rugosité arithmétique de la surface usinée (μm)
F_c	Effort de coupe (<i>kgf</i>)
T_e	Température de coupe ($^{\circ}C$)
P_c	Puissance de coupe absorbée (<i>KW</i>)
T_{max}	Durée de vie maximale de l'outil (<i>min</i>)
T_{min}	Durée de vie minimale de l'outil (<i>min</i>)
F_{max}	L'effort de coupe maximal (<i>kgf</i>)
P_{max}	Puissance de la machine (<i>W</i>)
$T_{e\ max}$	Température maximale admissible ($^{\circ}C$)
L	Longueur à usiner pour une seule passe (<i>mm</i>)
D	Diamètre nominal de la pièce (<i>mm</i>)
r_ε	Rayon de bec nominal (<i>mm</i>)
h	Épaisseur du copeau (<i>mm</i>)
b	Largeur du copeau (<i>mm</i>)
P_r	Taux total de production (<i>pièce/min</i>)
$P_{r\ f}$	Taux de production en finition (<i>pièce/min</i>)
t_p	Temps total de production unitaire (<i>min/pièce</i>)

t_{pf}	Temps de production en opération de finition (<i>min/pièce</i>)
t_{pr}	Temps de production en opération d'ébauche (<i>min/pièce</i>)
C	Cout de production unitaire total (<i>\$/pièce</i>)
C_f	Cout de production en opération de finition (<i>\$/pièce</i>)
C_r	Cout de production en opération d'ébauche (<i>\$/pièce</i>)
t_m	Temps de coupe réel durant lequel le copeau est produit (<i>min</i>)
t_{mr}	Temps total de coupe pour n passes en ébauche (<i>min</i>)
t_{mf}	Temps de coupe par passe en finition (<i>min</i>)
t_l	Temps improductif sur le poste (<i>min</i>)
t_r	Temps de changement d'une arête de coupe (<i>min</i>)
K_t	Constantes dans l'équation généralisée de Taylor.
p, q, r	Exposant dans l'équation généralisée de Taylor.
\vec{x}	Vecteur des variables de décision
λ	Erreur de régression statistique
R_s	Stabilité de la coupe
N_p	Nombre de pièces usinées entre deux changements d'outil
(φ)	Angle de direction d'avance
a_p	Profondeur de coupe,
a_f	Engagement de l'arête
h	Epaisseur de coupe
b_D	Largeur nominale de coupe
K_r	Angle de direction d'arête
D	Point principal de l'arête
δ	La pente de la surface
γ', α'	L'angle coupe nominal
γ_o, α_o	L'angle dépouille nominale
ϕ	L'angle de cisaillement
P_o	Section orthogonal

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Valeurs numériques des constantes utilisées.....	54
Tableau II.2 : Valeurs paramétriques du P-NSGA-II.....	55
Tableau II.3 : Optima générés par la méthode NSGA-II dans les figures II.4(a,b, c).....	58

Introduction générale

Les différentes techniques de transformation de matière (fabrication) est un sujet important dans le domaine industriel. L'usinage par enlèvement de copeaux occupe un espace présumé dans la fabrication, c'est la méthode qui permet de produire des formes complexes et très précises sans changement des caractéristiques de la matière usinée.

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés, ses résultats dépendent initialement du choix des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par tour ou vitesse d'avance et la profondeur de passe). La réussite d'une opération de tournage est évaluée à l'aide des paramètres technologiques et économiques (productivité, coût, état de surface ...etc.) résultants. Les études expérimentales ont permis de modéliser le problème de la sélection des conditions de coupe. Les modèles trouvés sont en générale composés des relations empiriques reliant les paramètres d'usinage aux conditions de coupe.

L'optimisation est une science qui consiste à trouver une meilleure solution pour un problème mathématique. Dans notre cas d'application, la sélection optimale des conditions de coupe est basée sur l'amélioration de certains paramètres d'usinage dit objectif (temps d'usinage, coût d'usinage, taux de profit). Les conditions sélectionnées doivent respecter les limites de performances de la machine de l'outil et de la matière usinée. Ces limites d'usinage sont traduites par des équations d'inégalité dit contraintes doivent être satisfaites.

En réalité, le problème d'usinage est souvent présenté à l'aide d'un critère multiple. Les paramètres inclus dans ce critère sont dans la plus part des cas contradictoire ce qui nous conduit à un recours à l'optimisation multi-objectif.

Dans ce travail, nous allons tenter à résoudre un problème d'optimisation qu'est formulé autour de la minimisation du coût et temps de production. Cette tâche nécessite de choisir un modèle mathématique qui présente le problème en utilisant une méthode d'optimisation qui présente des performances acceptables.

Dans ce but, notre document est articulé sur deux chapitres :

Chapitre I : Présentation du procédé de tournage ainsi que les phénomènes inclus dans ce procédé et étude de l'influence des conditions de coupe sur les résultats de tournage.

Chapitre II : En premier lieu, la présentation de différentes méthodes d'optimisation existantes. Et en deuxième lieu, l'optimisation des conditions de coupe par l'algorithme génétique NSGA-II.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE 1 :

Généralités sur Le Tournage

I.1 Introduction

La mise en œuvre des opérations d'usinage pour réaliser une pièce ou une famille de pièces est un problème complexe du fait de la multiplicité des procédés disponibles et de la grande variété des spécifications des pièces et des matériaux constitutifs. Nous souhaitons par cette partie de l'étude fournir les éléments fondamentaux du problème en double objectif :

- Présenter les paramètres relatifs au procédé de coupe.
- Etudier l'influence de ces paramètres sur le bon déroulement du procédé et sur la qualité technologique et économique des produits réalisés par ce procédé.

Afin de bien viser l'objectif qui est l'optimisation des conditions de coupe, nous allons étudier dans ce travail un seul procédé d'usinage qui est le tournage.

I.2 Principe de base

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principale du procédé, L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non)appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce Dans ce chapitre, nous allons définir certaines notions de base concernant l'outil, la pièce et la machine-outil.

I.2.1 Surfaces de la pièce

Les principaux éléments d'une pièce à usiner, la surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc...) ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes. La surface engendrée (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée surface coupée (figure I.1).

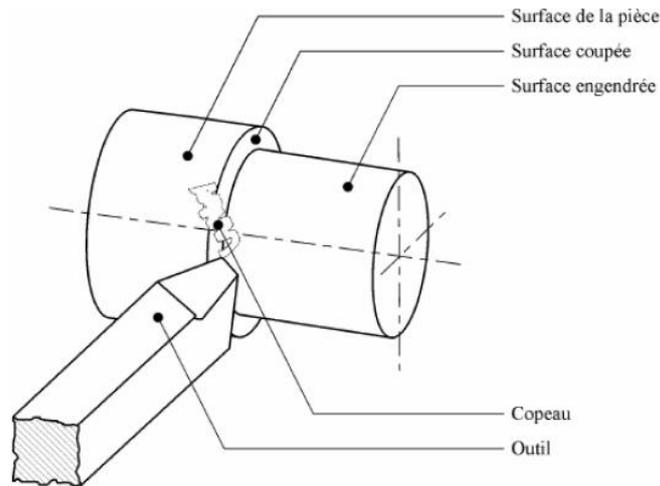


Figure .I.1 surfaces de la pièce. [1]

I.2.2 Propriétés des matériaux usinés

La matière des pièces à usiner est définie en nature généralement métallique. Toutefois cette matière est choisi en fonction de la destination finale de ces pièces, mais la constitution d'un acier, par exemple (structure, éléments d'addition) affecte son usinabilité. Aujourd'hui, cette propriété joue un rôle important dans le choix des matières de la pièce.

I.3 Conditions de coupe

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...) :

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...)
- La puissance de la machine
- La matière de l'outil (L'acier rapide Supérieurs (ARS), carbure...)

- La matière usinée (acier, aluminium...)
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage...)
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement)

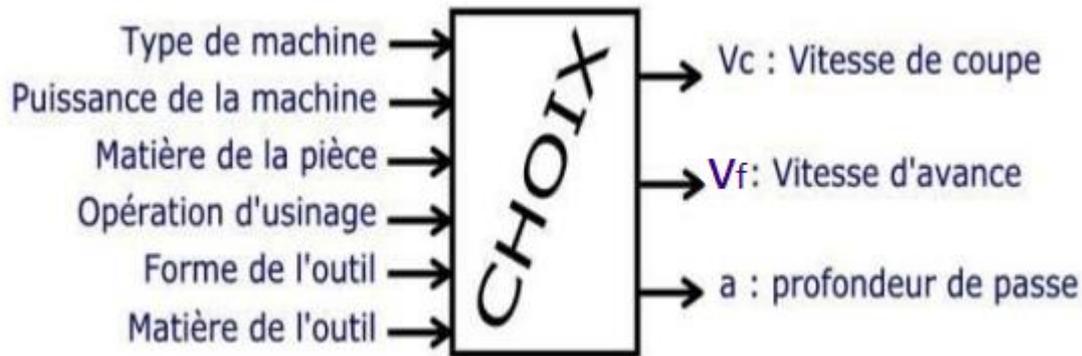


Figure I.2 Le choix des conditions de coupe. [2]

I.3.1 Vitesse de coupe Vc

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse angulaire ω en (rad/min), cette vitesse étant communiquée par la broche de la machine vers la porte pièce, La vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil est donnée par la formule suivante :

$$Vc = \frac{D}{2} \times \omega \quad (I.1)$$

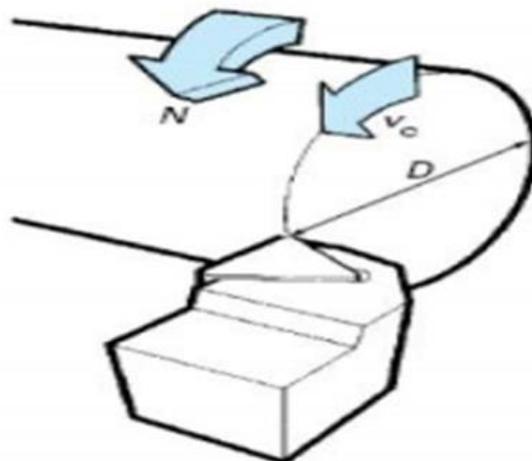


Figure .I.3 Vitesse de coupe Vc [2].

La vitesse de la broche est donnée par l'expression suivante

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi D} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

V_c vitesse de coupe $m \times mn^{-1}$;

D diamètre de la pièce exprimée en mm .

I.3.2 Vitesse d'avance V_f et l'avance par tour f :

La vitesse d'avance (mm/min), que la figure (I.4) montre, est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. [2]

$$V_f = f \times N \quad (\text{I.3})$$

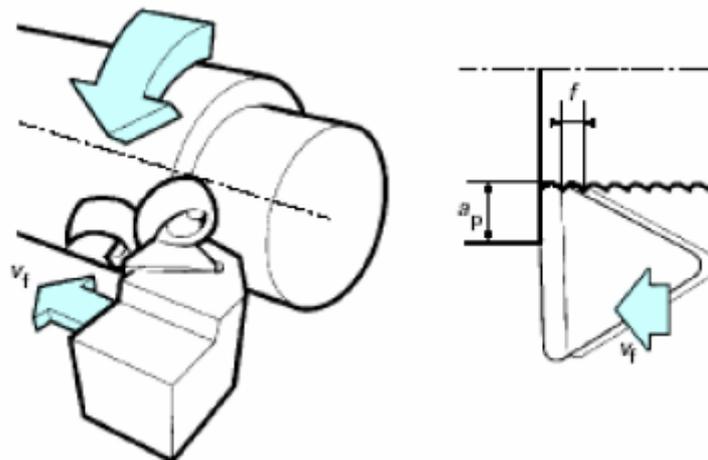


Figure I.4 Vitesse d'avance [2].

I.3.3 Profondeur de passe « a »

La profondeur de passe notée a en (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [2].

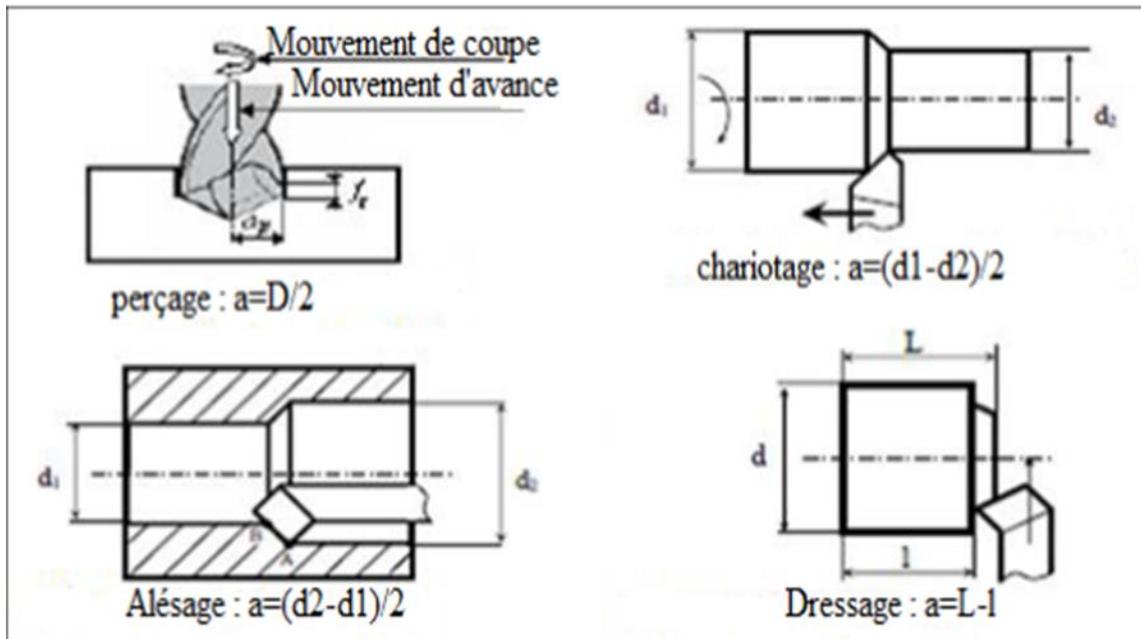


Figure I.5 : Les profondeurs de passe [2].

I.4 Éléments de l'outil

Les outils permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables de la pièce. Il existe une grande diversité d'outils de coupe mais les principaux éléments des différents outils sont semblables en ce titre nous définissons les constituants d'outil et son type de matériaux.

I.4.1 Constituants apparents de l'outil

I.4.1.1 Faces et les arêtes de l'outil

Un outil de coupe consiste en un corps et une queue ; ce dernier élément est fixé au porte-outil, mais le premier élément est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Les faces sont les plans constituant le corps d'un outil. Les arêtes sont l'intersection des faces. La partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille) est appelée partie active. Les différentes faces et arêtes sont illustrées sur la figure (I.6) (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille).

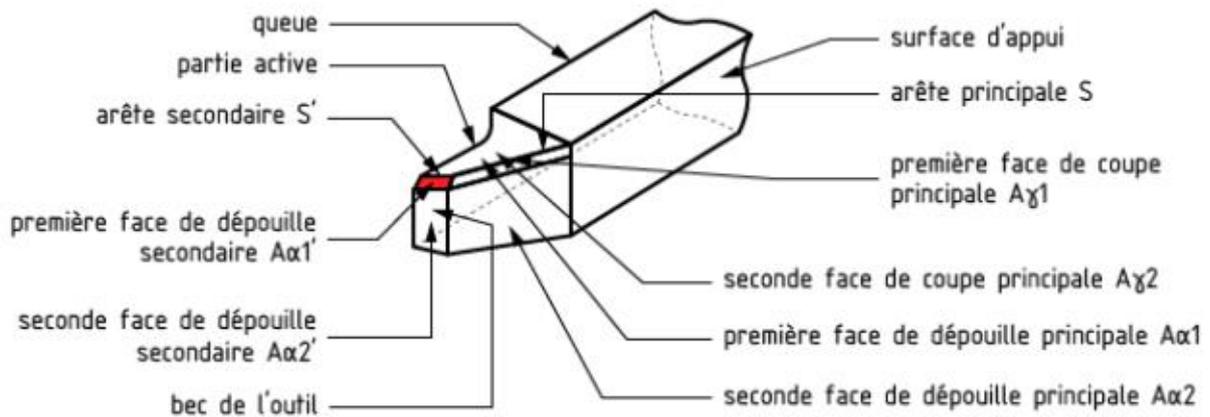


Figure I.6 Eléments de l'outil. [3]

La face de coupe (A_γ) - surface le long de laquelle glisse le copeau.

La face de dépouille (A_α) - surface le long de laquelle passent les surfaces engendrées.

La figure (I.7) illustre les éléments pour un outil en travail.

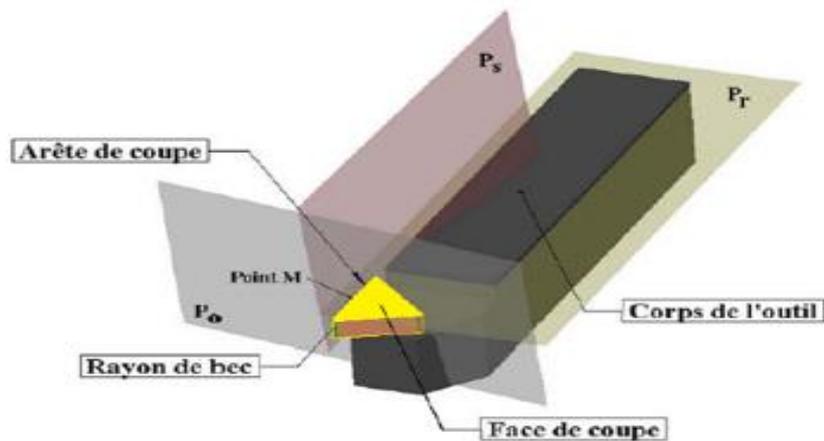


Figure I.7 Présentation les faces et arête appariant au cour travail. [4]

P_r = Plan de référence. C'est un plan perpendiculaire au vecteur V_c (vitesse de coupe) et passant par le point considéré M de l'arête de coupe. Pour un outil rotatif, P_r passe aussi par l'axe de rotation. .

P_s = Plan d'arête. C'est le plan perpendiculaire au plan de référence P_r , qui contient la tangente à l'arête de coupe, au point considéré M .

P_o = Plan orthogonal. C'est le plan perpendiculaire au plan de référence P_r et au plan d'arête P_s , passant par le point M considéré de l'arête de coupe.

La partie de l'outil impliquée directement dans la coupe est appelée taillant. Elle est limitée par trois faces : la face de coupe le long de laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) le long desquelles passent les surfaces coupée et engendrée. On appelle une arête un bord de la face de coupe destiné à l'enlèvement de matière. Dans un outil de tournage simple, on peut distinguer une arête principale, intersection entre la Face de coupe et la face de dépouille principale, et une arête secondaire, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille secondaire. La jonction des arêtes principale et secondaire forme le bec de l'outil. Il peut être droit, arrondi ou représenter l'intersection vive des deux arêtes.

I.4.1.2 Angles de l'outil

La nécessité des angles d'outil présente à travers la facilité d'opération de coupe. Selon chaque base des coordonnées il y a des angles spéciaux, on définit les angles principaux du taillant. Elles sont comme suit : l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ et représente en figure (I.8) :

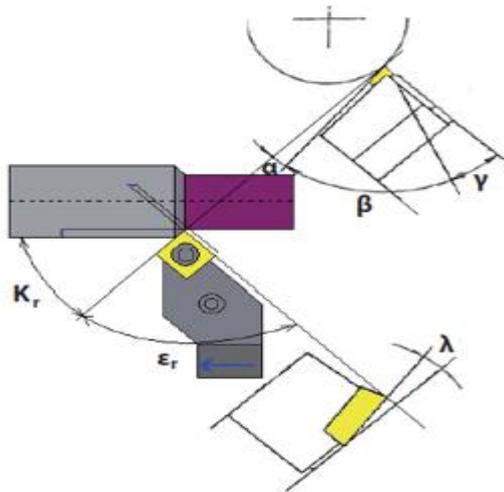


Figure .I.8 Angles du taillant (outil en main)

K_r : Angle d'attaque

λ : Angle d'inclinaison d'arête

ϵ_r : Angle de pointe

La figure (I.9) illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en travail : outil à taille en bout figure (I.9.a) et outil à taille de côté ou latérale figure (I.9.b).

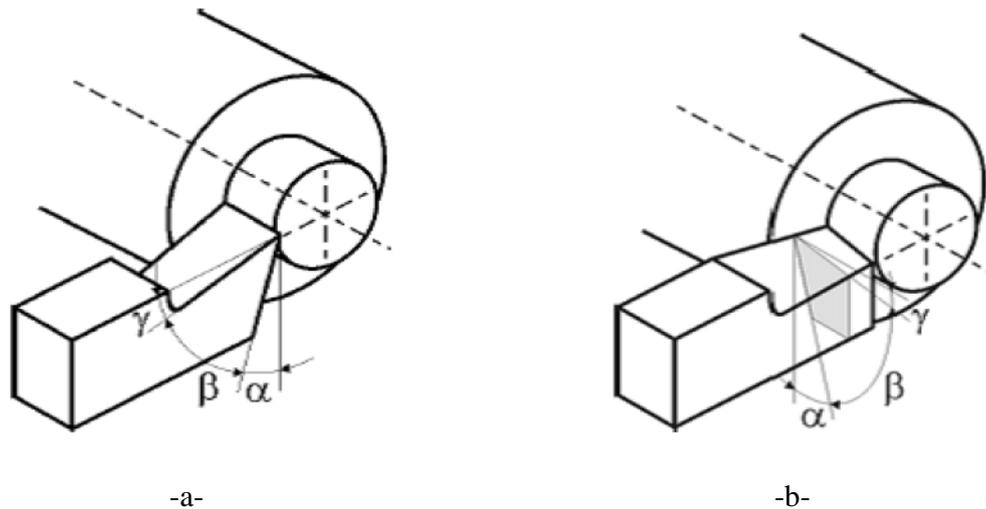


Figure I.9 Angle du taillant (outil en travail). [1]

.La somme de ces trois angles est toujours égale à 90°

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (\text{I.1})$$

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant.

I.4.2 Différent types des outils

Les outils de coupe en tournage sont classés selon la forme en trois types, ils sont :

- Les forets pour l'alésage ;
- Les outils monoblocs : le corps et la partie active sont de même matériau ;
- Les outils à plaquette.

Les outils de tournage actuels sont constitués, dans la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe. La figure(I.10) illustre les divers types d'outil porte- plaquette.

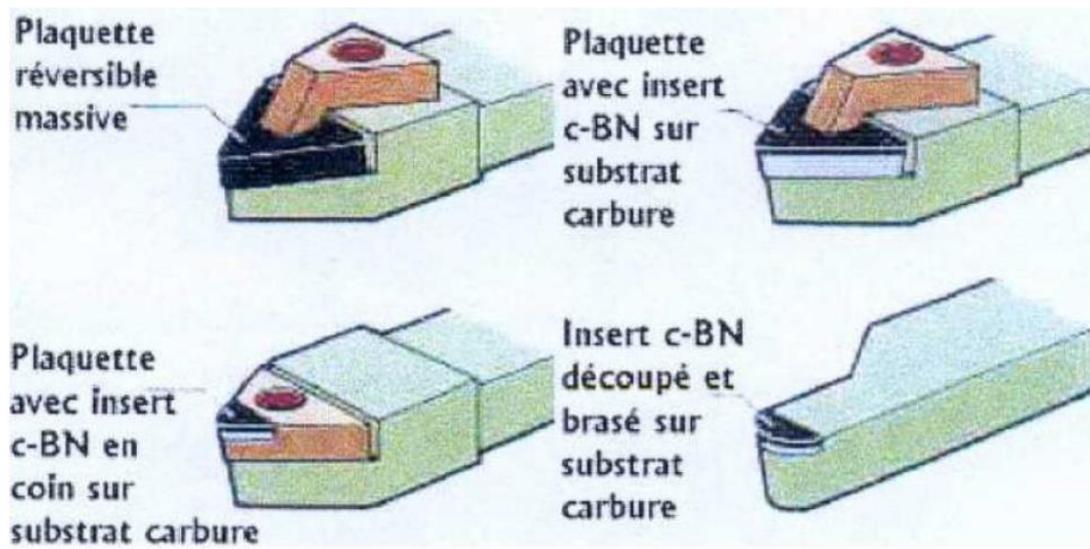


Figure I.10 Types d'outils porte-plaquettes. [5]

On retrouve ainsi plusieurs type de plaquettes commercialisée, elles se distinguent en fonction du type d'usinage (figure I.10) :

- les outils massifs plus robustes et résistants aux chocs : ils sont destinés aux opérations débauches.
- les outils revêtus de CBN (nitrure de bore cubique) sur une face sont brasés à un substrat de carbure de tungstène : ils résistent moins bien aux chocs et ils sont destinés à des opérations de semi-finition ou finition.
- les outils revêtus de CBN en coin : ils ont qu'une arête de coupe et sont moins chers, Ils résistent moins à la chaleur, Dans le cas de températures de coupe très élevée, un débrasage se produit entre le CBN et le substrat.
- Les outils avec des inserts de CBN dans les coins sur toute l'épaisseur de la plaquette.

I.4.3 Matériaux de l'outil

Le tournage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro Grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie. Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont illustré en figure(I.11).

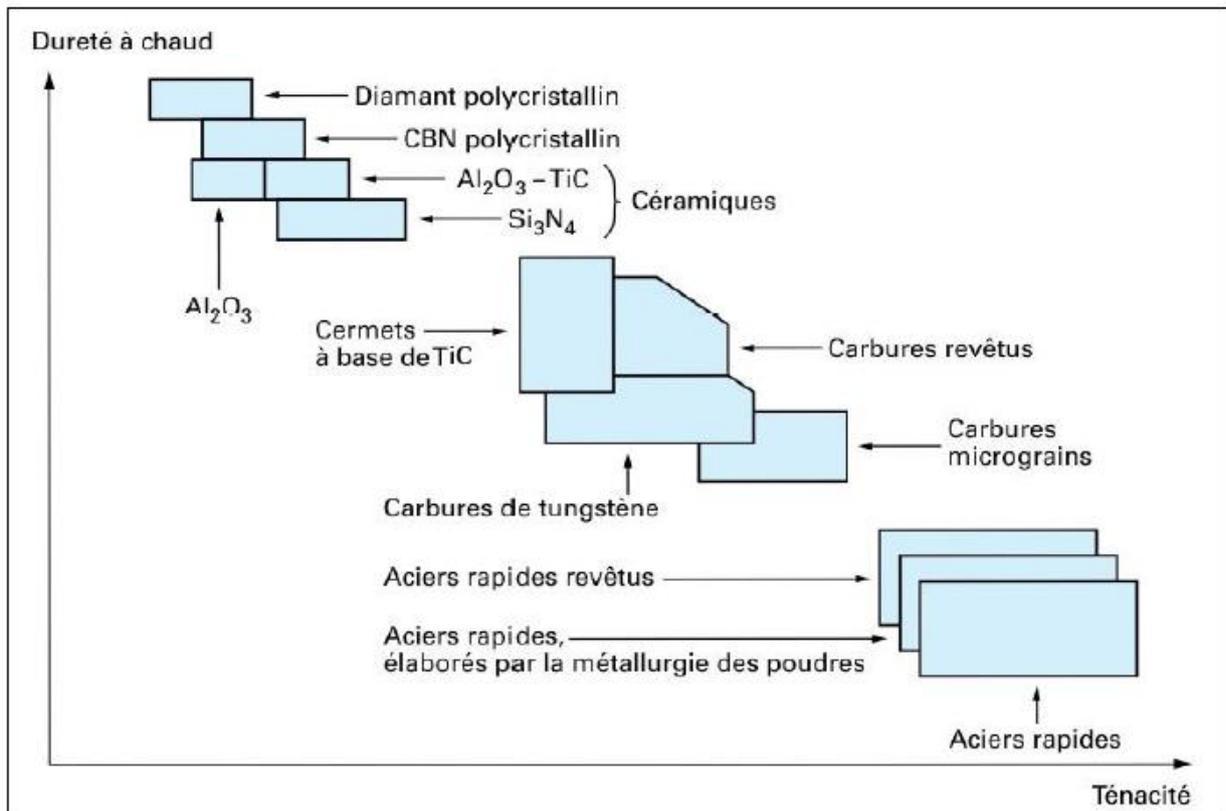


Figure I.11. Disposition des matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté. [6]

▪ Acier Rapides Supérieures (ARS)

Les outils ARS (acier rapides supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique, il est toujours utilisé pour certains types comme les forets. On utilise en vitesse de coupe très basse pour éviter l'échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, généralement ils sont des outils monobloc. Il y a plusieurs types d'outil est nommée selon le pourcentage de substance le plus grande en cas générale les compositions comme suivant : 0,7 à 1,6% de carbone, 12 à 20 % tungstène ou 3,5 à 10% molybdène, vanadium cobalt est des traces pour les plus durs, dureté, fabrication par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres.

▪ Carbure

Les outils en carbures sont les plus utilisés en cas de porte plaquette, il existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage, Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en aciers ordinaires, la partie active de ces outils étant raffûtée au fur et à mesure de son usure. Il y a deux types de carbure revêtus et non revêtus :

- Les carbures revêtus : sont recouverts d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium.
- Les carbures non revêtus : sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène, de titane ...) et de substance liante (cobalt) qui confère sa ténacité à la plaquette.

▪ **Cermets**

Cermet, un terme formé de deux syllabes : *cer* vient de céramique et *met* de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co. Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN, et TiCN et du rapport N/(C+N) qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques. Les cermets présentent, en outre, une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est utilisée uniquement, lorsque la précision de la finition l'exige.

▪ **Céramiques**

Les céramiques (figure I.12) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Les céramiques sont couramment utilisées.

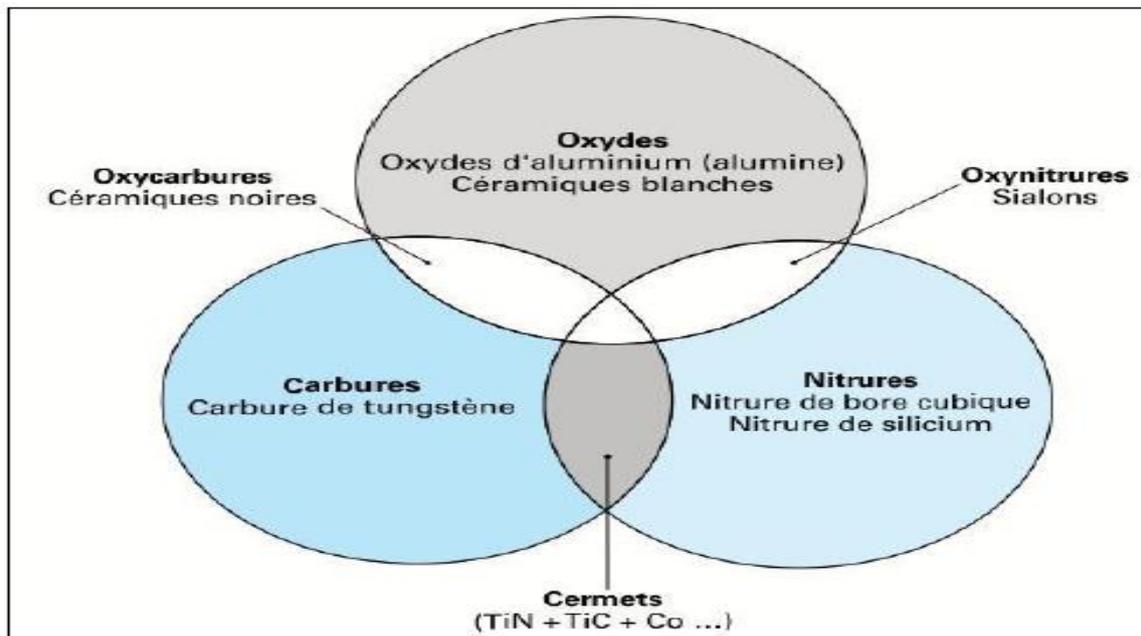


Figure I.12 Céramiques. [6]

La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3 . L'apparition de ce matériau sur le marché remonte aux années 1960. Dès l'origine, il s'est révélé intéressant pour la finition des fontes, à condition de disposer de machines robustes et à grandes vitesses.

Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à HRC 60 (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la caractérisation. D'autres céramiques sont également employées. Les céramiques noires sont des mélanges d' Al_2O_3 et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircon (ZrO₂). Elles sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al_2O_3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe.

Le nitrure de silicium Si_3N_4 permet dans certains matériaux des vitesses de coupe une fois et demie à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides ...) il s'emploie à sec.

Les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leur confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.

Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes. Un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

- **Nitrure de bore cubique**

CBN est une matière très dure adaptée au tournage d'acier trempé, de fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions coupe et de l'arête de coupe. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure, lorsqu'elles sont utilisées correctement. Les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition.

- **Diamant**

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffutage des meules. Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650° se transforme en un morceau de graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Mais, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : Alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables....etc.

I.5 Opérations de tournage

Dans le tournage, on peut classer, selon le profil de la pièce demandé les opérations en deux classes principales :

- Tournage intérieur.
- Tournage extérieur.

Pour les deux classes, on peut distinguer suivant les formes obtenues, les opérations suivantes :

- **Chariotage**

Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle ou oblique à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.

- **Alésage**

Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure. Le mouvement d'avance est similaire à celui en chariotage.

- **Dressage**

Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure, ce qui diminue la longueur

- **Contournage**

On donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque, on peut obtenir une forme de révolution quelconque

- **Gorgeage**

Opération qui consiste à usiner une gorge intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple.

- **Chanfreinage**

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.

- **Tronçonnage**

Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon

- **Filetage**

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieure ou intérieure, le mouvement d'avance est combine avec le mouvement de coupe.

I.6 Paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont, d'une part, des valeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques). Les conditions de coupe sont une notion plus large qui inclut les paramètres géométriques et

cinématiques de coupe en plus d'autres facteurs qui influencent l'usinage tels que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, les fluides de coupe, l'état de la machine-outil, etc.

I.6.1 Mouvement de l'outil et de pièce

Afin d'enlever de la matière en cours d'usinage, il y a deux mouvements nécessaires, mouvement de coupe et mouvement d'avance.

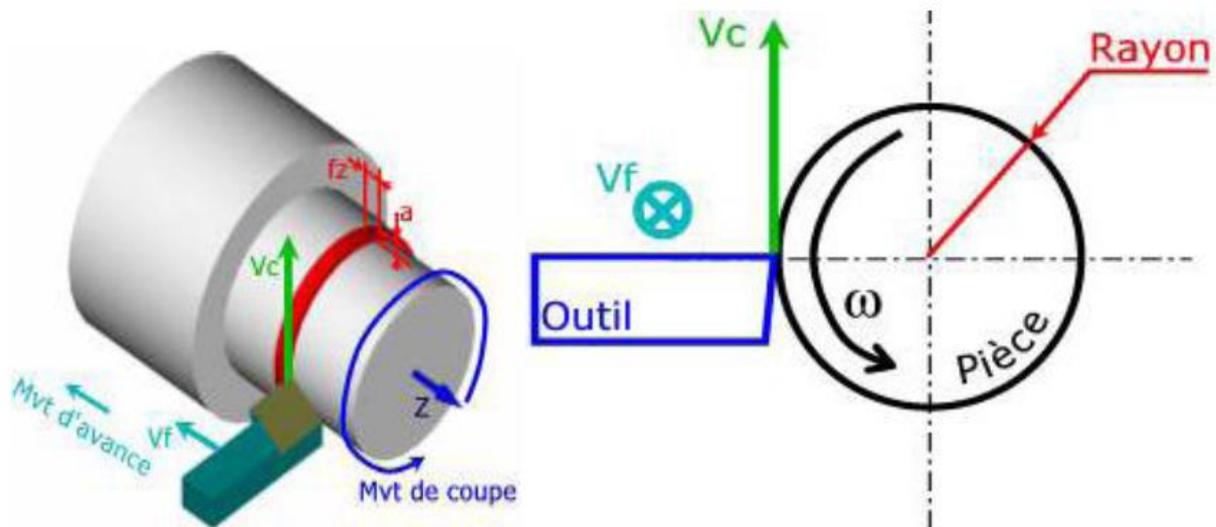


Figure I.13 Présentation de mouvement de coupe et le mouvement d'avance. [7]

▪ Mouvement de coupe

Le mouvement de coupe appliqué à la pièce avec une trajectoire circulaire, c'est un mouvement relatif entre l'outil et la pièce. Il est caractérisé par la vitesse de coupe V_c qui est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce. Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation N et du diamètre D de pièce de l'élément en rotation.

▪ Mouvement d'avance

Le mouvement d'avance est un mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance est caractérisé par la vitesse d'avance V_f qui est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce.

Il est exprimé en [mm/min], il peut être exprimé par l'avance par tour [mm/tr]. Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance combinés constituent le mouvement résultant de coupe (v_e), alors que l'angle contenu entre ces deux mouvements est appelé angle de direction d'avance (φ).

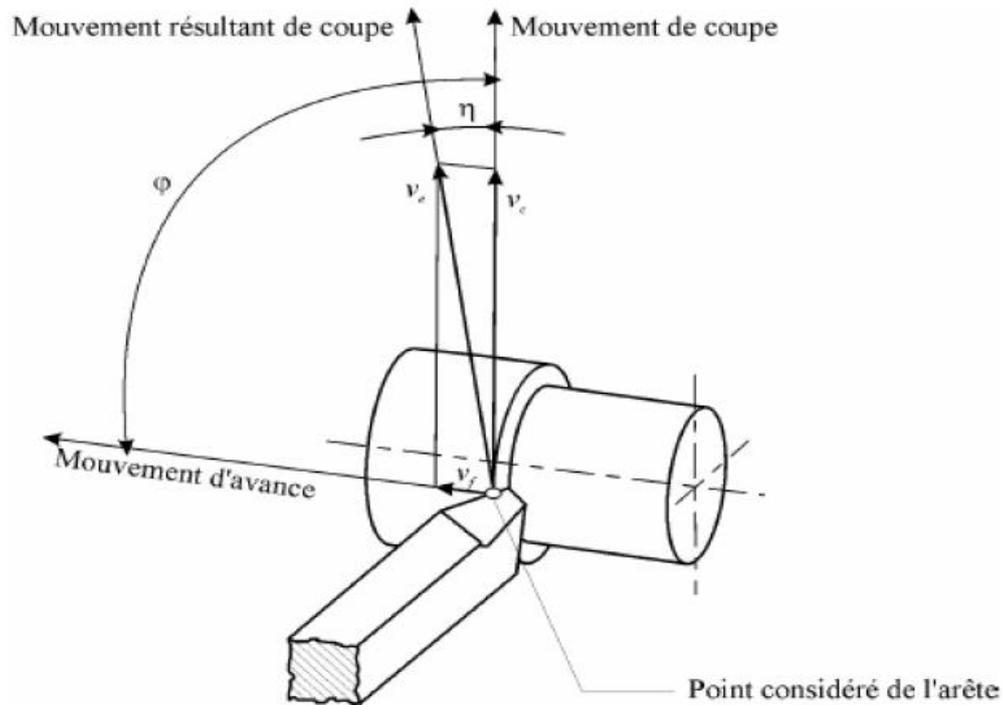


Figure I.14 La relation entre l'angle de direction et les paramètres de coupe. [8]

I.6.2 Paramètres géométriques de coupe

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée profondeur de coupe a_p . Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée surépaisseur d'usinage. On appelle la coupe, la couche de matière qui est enlevée par une action unique de la partie active et transformée en copeaux. Ces différents paramètres sont illustrés par la figure (I.15).

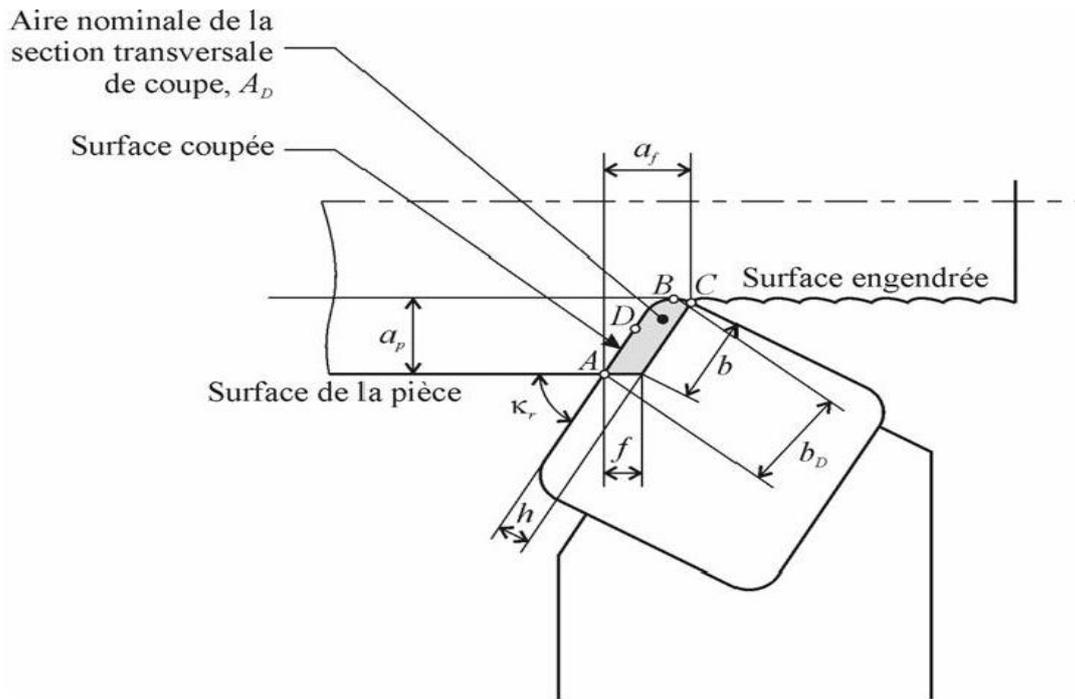


Figure I.15 Configuration de coupe. [1]

Où :

a_p Profondeur de coupe (mm) ;

a_f Engagement de l'arête (mm) ;

f avance (mm/tr) ;

h épaisseur de coupe (mm) ;

b_D Largeur nominale de coupe (mm) ;

K_r angle de direction d'arête ;

D point principal de l'arête.

I.7 Formation de copeau

Plusieurs études ont été effectuées sur le mécanisme de formation et d'écoulement de copeau. Dans certaines études, les chercheurs ont réussi d'obtenir une photo instantanée de la formation du copeau pendant la coupe (figure I.16).

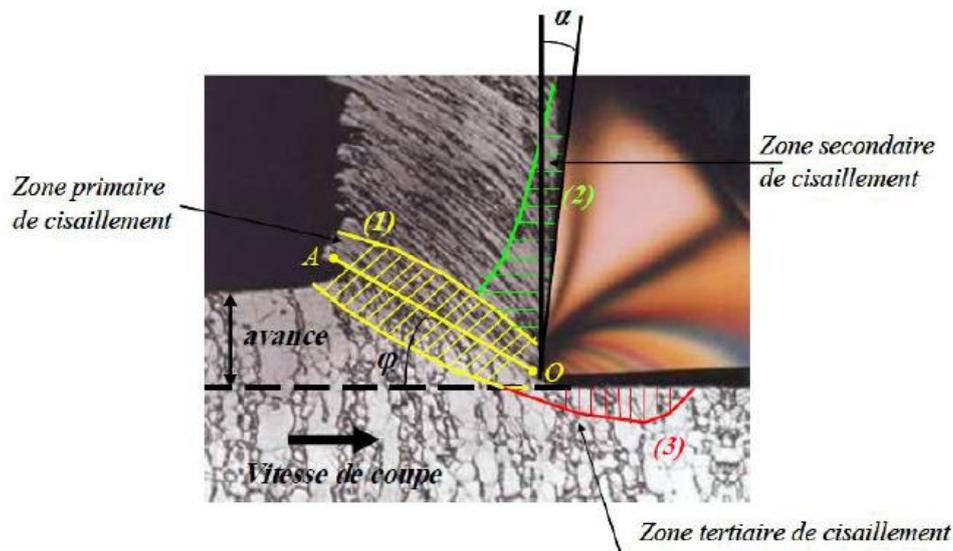


Figure I.16 Manifestation la formation de copeau. [4]

Il a été observé que le copeau se forme par un cisaillement intense dans la zone primaire de cisaillement (1). Il est soumis à des niveaux de déformation et de température très élevés du fait du changement brutal de direction d'écoulement de la matière dans un temps très court. Le copeau s'écoulant le long de la face de coupe est soumis à un second cisaillement (2). Dans la zone secondaire de cisaillement, la vitesse d'écoulement, quasiment nulle au contact de l'outil, croît rapidement pour atteindre la valeur de la vitesse du copeau en dehors de la zone (2). Les pressions et températures à l'interface outil-copeau sont très importantes. Elles peuvent atteindre respectivement des valeurs de l'ordre du GPa à la pointe de l'outil et de la température de fusion du matériau usiné. La zone en dépouille (3) correspond à la zone de contact entre l'outil et la pièce usinée. Il a été montré que la valeur de pression dans cette zone est sensiblement plus faible que dans la zone secondaire. Il est à noter que la qualité de surface de la pièce finale est fortement influencée par le contact dans cette zone. [4]

I.8 Mécanisme d'endommagement des outils

Si l'on fait un inventaire des configurations de coupe que l'on rencontre dans un atelier d'usinage, on observe une très grande diversité des vitesses de coupe (entre 10 et plusieurs milliers de (m/min), de la géométrie des copeaux et de leurs conditions d'évacuation, de la rigidité du contact pièce usinée/outil, de la nature et de la géométrie des outils. Dans une telle variété de configurations de coupe, il n'est pas surprenant d'observer une grande variété de faciès de dégradation. [8]

I.8.1 Phénomènes provoquant l'usure

D'une façon générale l'usure de deux matériaux en contact est due à des phénomènes d'ordre mécanique et physico-chimique. Ces phénomènes dépendent essentiellement de la température de coupe et selon professeur Konig l'usure se manifeste suivant le diagramme de la figure (I.17). [8]

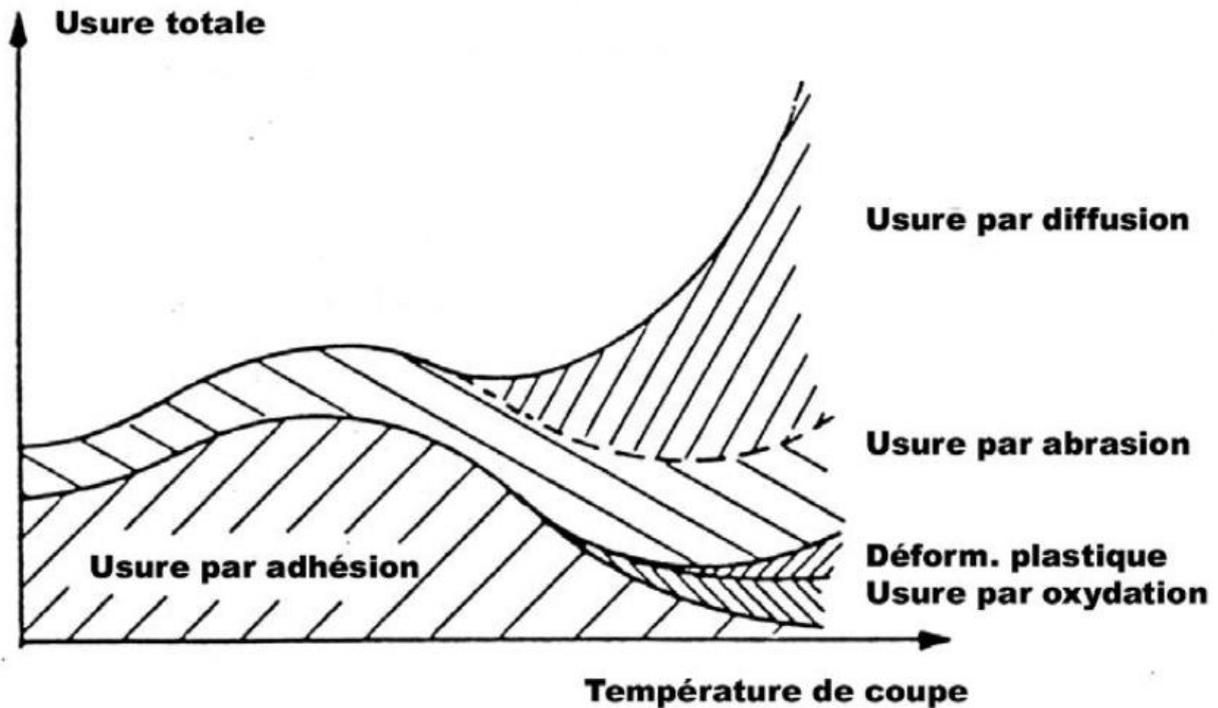


Figure I.17 Diagramme d'usure en l'usinage. [8]

I.8.1.1 Phénomènes mécaniques

- **Usure par adhésion mécanique**

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. En effet lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Or les rugosités et micro-rugosités de ces surfaces, par contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des microsoudures. (Figure I.18)

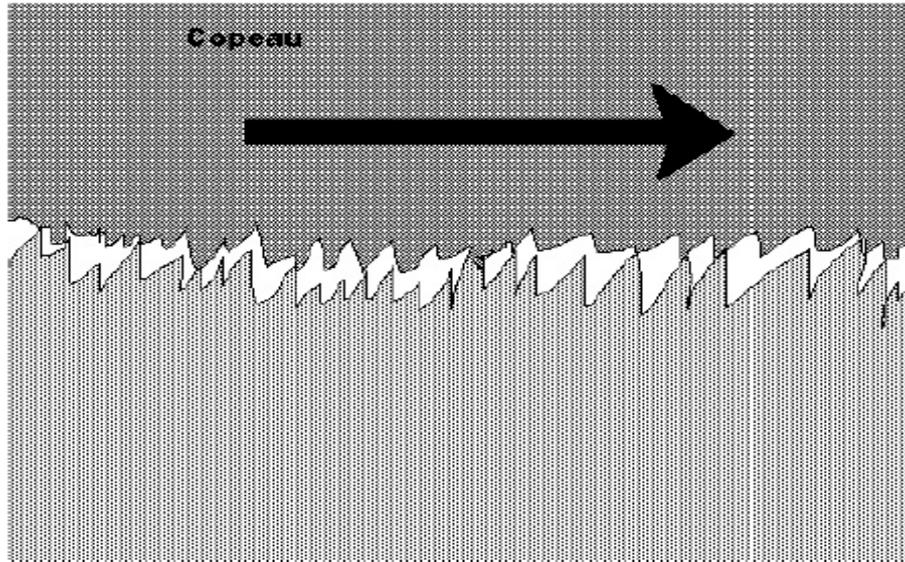


Figure I.18 Processus d'usure par adhésion mécanique. [8]

Ces micro-soudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage, ce processus continu génère :

- l'apparition d'arêtes rapportées si les micro-soudures sur l'outil sont plus résistantes que celles du copeau.
 - l'usure de l'outil si la micro-soudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil.
- Cette usure est très faible et généralement négligeable.

▪ **Usure par abrasion mécanique**

Lors de l'usinage, la matière (pièce usinée et copeau) frotte avec des pressions de contacts importantes sur l'outil. Suivant la constitution physico-chimique (nombre, nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition et agencement des composants de l'alliage : forme, dimension, arrangement) la matière est plus ou moins abrasive par rapport à l'outil (figure I.19). Si la matière comporte des constituants durs (écrouissage, aluminate, nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil. [8]

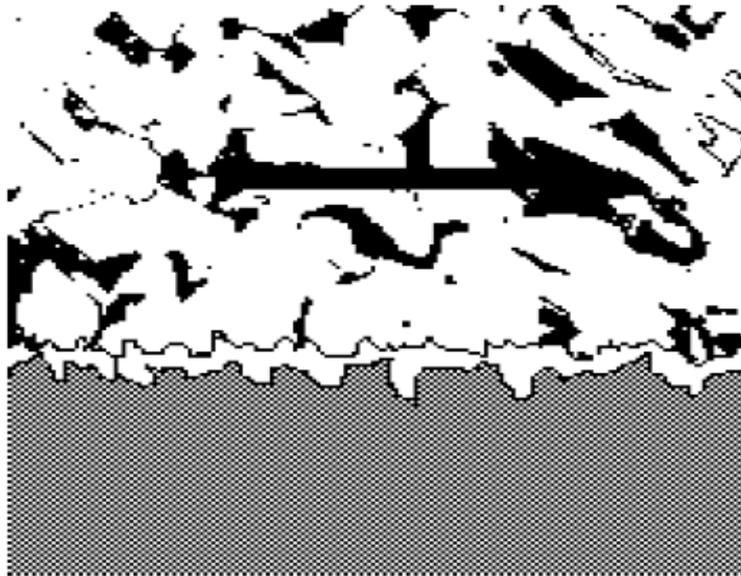


Figure I.19 Processus d'usure par abrasion. [8]

Cette usure pourra être :

- homogène : dans le cas d'une matière où les constituants sont homogènement répartis.
- localisée : dans le cas de conditions de coupe particulières : écrouissage, apparition d'oxyde lors de l'usinage.

▪ **Usure par déformation plastique**

Si l'on caractérise un usinage en prenant comme paramètres la température (interface outil/copeau) et la pression exercée sur l'outil, on obtient un domaine de fonctionnement. Lorsque ces paramètres prennent des valeurs très importantes, on se trouve dans le domaine de déformation plastique de l'arête de coupe. Il y a donc transformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe). [8]

▪ **Usure par fissuration**

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent les flexions et les vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase), il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil. [8]

I.8.1.2 Phénomène physico-chimiques

▪ Usure par diffusion

La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de forte pression car le copeau applique des contraintes sur l'outil. Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil. [8]

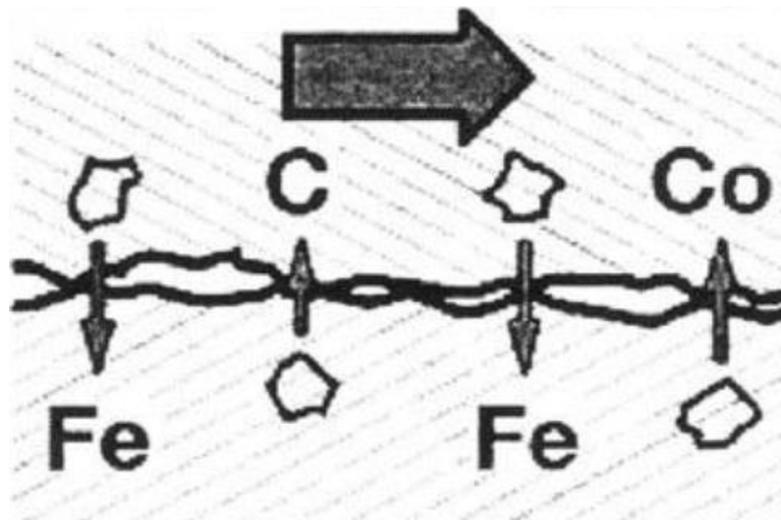


Figure I.20 Processus d'usure par diffusion. [8]

▪ Usure par corrosion

Le milieu de l'usinage est caractérisé par :

- de l'oxygène dans l'air
- des hautes températures
- de l'eau dans les huiles de coupe solubles

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoquent localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (figure I.21). De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.

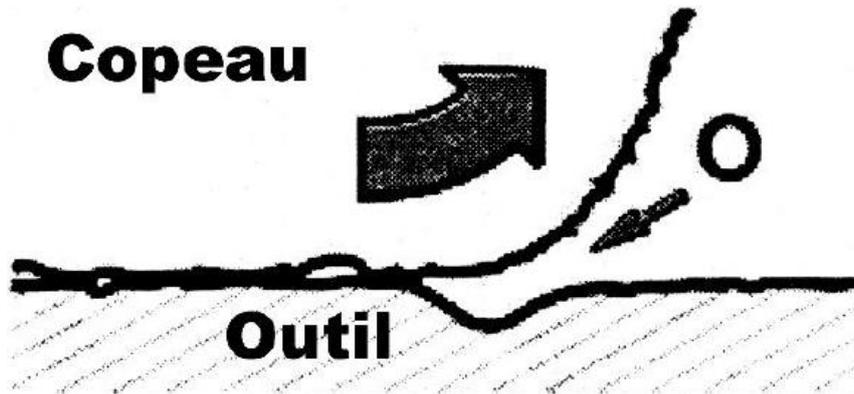


Figure I.21. Processus d'usure par oxydation. [8]

I.8.2 Influence des différents paramètres sur l'usure des outils

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et le deuxième les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification).

I.8.2.1 Influence des conditions de coupe

- Vitesse de coupe : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure.
- Avance : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil.
- Profondeur de passe : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure.

I.8.2.2 Influence de lubrification

L'influence de la lubrification étant assez complexe, on la caractérise souvent par l'absence ou la présence de lubrification lors des essais. Dans le cas où il y a présence de lubrification, on spécifie si le lubrifiant employé est un lubrifiant de graissage pour faciliter le glissement du copeau sur la face de coupe de l'outil, ou si le lubrifiant est de refroidissement pour diminuer la température dans la région du bec de l'outil. Son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil.

I.8.2.3 Influence du couple mouvement de pièce / mouvement d'outil

Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition), le matériau de l'outil intervient, lui aussi par ses propriétés mécaniques, mais aussi par ses propriétés physico-chimiques, entre autres par ses propriétés thermiques.

I.9 Identification des phénomènes vibratoires générés par la coupe

I.9.1 Les vibrations libres

Les sources des vibrations libres se caractérisent par leur impulsivité et leur non périodicité. C'est pourquoi, elles sont très difficiles à identifier. Un système suffisamment amorti, sera presque insensible à ce genre d'excitations, ce qui est le cas de toutes machines-outils correctement conçues. Comme sources possibles, on peut citer, les irrégularités géométriques aperiodiques de la pièce à usiner, des entrées en matière brusques, ou encore des erreurs dans les consignes de déplacements des axes mobiles (mauvaise programmation ou problèmes d'asservissements) voir (Figure I.22).

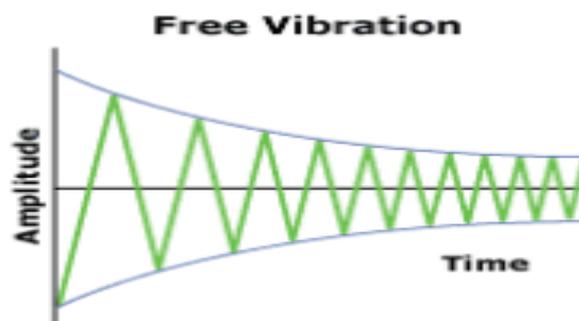


Figure I.22 Vibrations libres. [9]

I.9.2 Les vibrations forcées

Les vibrations forcées généralement considérées dans les problèmes d'usinage, sont celles dues à la discontinuité de la coupe (cas de pièces n'ayant pas de symétrie de révolution, en tournage). Dans le cas de la super finition, d'autres sources, souvent considérées de second ordre, doivent être prises en compte voir la (Figure I.23).

L'utilisation d'un modèle dynamique de la coupe nécessite de séparer les vibrations forcées en deux sous-familles [9] : celles qui affectent directement la dynamique de la machine (dites vibrations forcées externes) et celles qui affectent le processus de coupe lui-même (dites vibrations forcées internes).

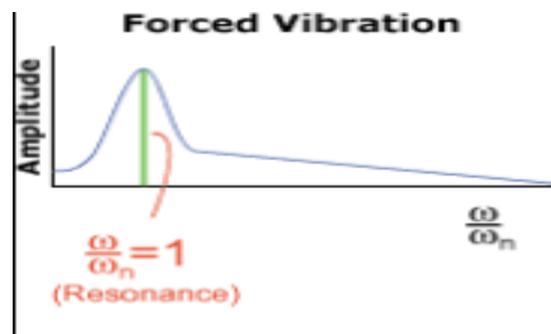


Figure I.23 Vibrations forcées. [9]

I.9.2.1 Vibrations forcées externes

Ce type d'excitation trouve comme sources la présence et le fonctionnement de mécanisme dans un environnement proche de la machine, comme par exemple un groupe hydraulique, la défaillance d'un élément constituant de la machine-outil (roulements, axes) ou bien, la présence d'un balourd sur un élément tournant de la machine. Dans tous les cas, la machine vibre à la même fréquence que l'excitation et l'amplitude des vibrations dépend de la réponse de la structure, à la fréquence imposée par la source.

Les vibrations forcées externes, sont souvent simples à identifier dans la mesure où elles sont liées à la rotation d'un élément de la machine. La fréquence d'excitation est donc la fréquence de rotation de cet élément ou une de ses harmoniques. Par exemple, la fissuration d'un arbre se détecte, dans la plupart des cas, par une fréquence d'excitation égale à deux fois la fréquence de rotation de ce dernier.

I.9.2.2 Vibrations forcées internes

A la différence des vibrations forcées externes, les vibrations forcées internes ne peuvent apparaître que lors du processus d'enlèvement de matière. En effet, le phénomène de coupe est le siège de nombreuses sources vibratoires, que nous allons recenser :

- **la formation d'arête rapportée (B.U.E.= Built Up Edge).**

Une de ces sources est la formation d'arête rapportée [9, 10], qui a été mise en évidence par Kuznetsov en 1966 [11]. La présence d'une arête rapportée modifie la géométrie de coupe instantanée. L'angle de coupe effectif $\lambda_{o\text{effectif}}$ augmente au fur et à mesure de la formation et du développement de l'arête rapportée, comme le montre la (Figure I.24).

Cette variation génère des efforts de coupe qui varient au cours de l'usinage. Les études de Kuznetsov [11] ont montrées que l'arête rapportée s'évacue périodiquement soit avec le copeau, soit en restant collée sur la pièce. Cette périodicité peut constituer une excitation forcée pour le système POM.

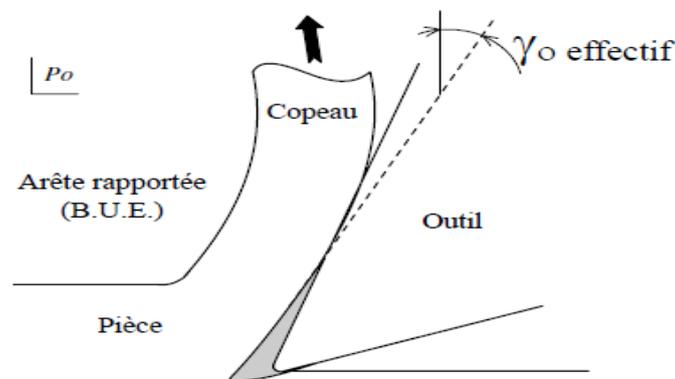


Figure I.24 Effet de la formation d'une arête rapportée sur l'angle effectif de coupe. [9]

Plus récemment, Thomas et Beauchamp [12], constatent que dans les conditions de formation d'arêtes rapportées (faible vitesse d'avance et faible vitesse de coupe), l'amplitude des vibrations, mesurées au niveau de l'outil, augmente.

- **la formation du copeau.**

La formation du copeau est également une source possible de phénomènes vibratoires [25, 28]. Dans le cas de la coupe orthogonale en régime établie, l'interaction entre l'outil, la pièce et le copeau peut se décrire de manière relativement simple [13] : l'avance de l'outil dans

la couche superficielle de la pièce comprime fortement la matière et génère un cisaillement interne entre la pointe de l'outil et la surface libre de la pièce (Figure I.25). Cette zone de formation du copeau est appelée zone primaire de cisaillement (Z1). Le copeau ainsi formé, frotte sur la face de coupe de l'outil.

Cette zone de frottement de glissement entre l'outil et le copeau est appelée zone secondaire de cisaillement (Z2). Une troisième zone, que l'on nomme zone tertiaire de déformation (Z3), est le résultat du frottement entre la nouvelle surface usinée et la face en dépouille de l'outil. Ces trois zones de déformation, sont le siège de phénomènes mécaniques (déformations élastiques et/ou plastiques) et thermiques (génération de chaleur) très importants qui dépendent de plusieurs paramètres tels que la rhéologie du matériau usiné, la nature du contact et les propriétés thermo-physiques du couple outil / matière.

Le phénomène fondamental, de la formation du copeau en coupe stationnaire, est un glissement plan unidirectionnel pseudopériodique.

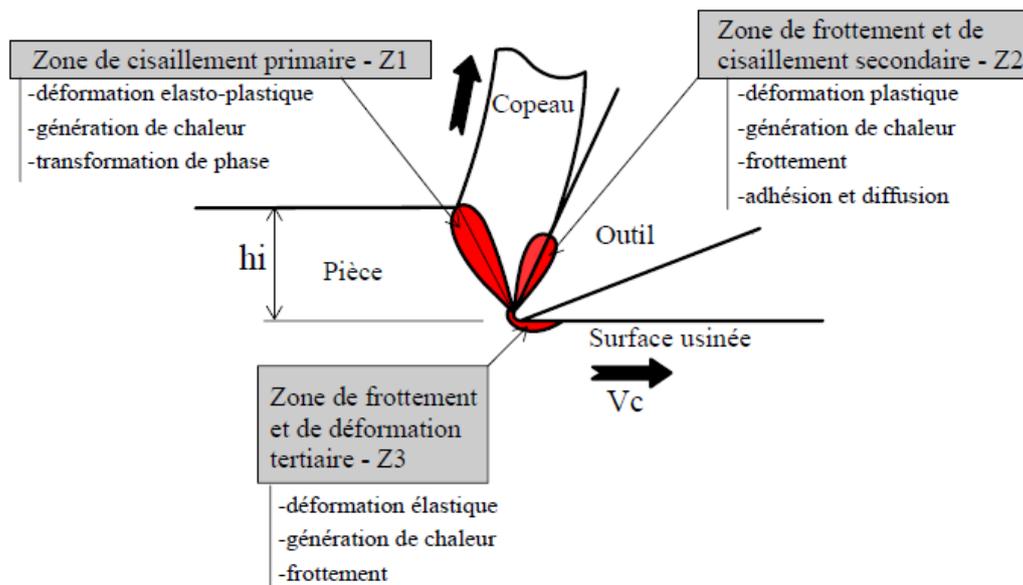
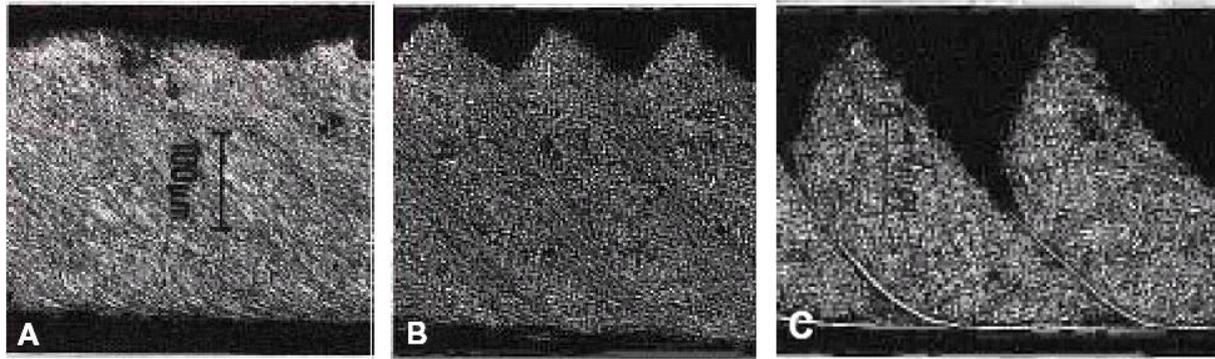


Figure I.25 Description des interactions pièce - outil – copeau. [13]

Pour les métaux, le processus de formation du copeau est essentiellement basé, sur des déformations plastiques. Selon les conditions de coupe et le couple outil/matière considéré, on rencontre trois familles de copeaux [10, 14]. Le Calvez propose la classification suivante (Figure I.26) :



A : copeau continu

B : copeau segmenté

C : copeau dentelé

Figure I.26 Différents types de copeaux rencontrés. [10]

– Le copeau continu. Ce copeau s’observe dans des conditions de coupe stationnaire (ou quasi-stationnaire) (Figure. I.26-A).

– Le copeau segmenté, composé d’éléments plus ou moins connectés entre eux, résultant de la variation périodique de la couche superficielle ; ce qui conduit à des zones alternées de déformations locales très peu cisillées. On l’appelle également, copeau de transition [13] (Figure. I.26-B).

– Le copeau dentelé ou festonné. Il se forme par déformation plastique jusqu’à ce que la contrainte de cisaillement dans la zone primaire de déformation (Figure 1.12) atteigne la limite à la rupture du matériau. Les discontinuités apparaissent sous l’effet de la rupture du matériau (Figure. I.26-C).

Le phénomène de formation du copeau, par le caractère variable et périodique de la contrainte de cisaillement dans les zones de déformation plastique, est donc une source possible d’excitation.

• l’effet friction le talonnement

Des études récentes, dans le domaine de la dynamique non linéaire des machines, montrent l’importance des frottements secs et des contacts intermittents entre l’outil, le copeau et la pièce, sur le comportement dynamique du système pièce/outil/machine [15, 16].

L’effet friction se caractérise par une énergie d’excitation qui est due, à la fois, aux frottements entre la pièce et la face en dépouille de l’outil (c’est le talonnement), et aux frottements entre le copeau et la face de coupe de l’outil. Ces deux phénomènes de contact font

apparaître des vibrations au sein de la coupe, mais n'ont pas les mêmes influences sur son comportement dynamique.

Le talonnement est dû à l'interférence entre la face en dépouille de l'outil et les ondulations de la surface nouvellement usinée. Ce concept a été introduit, pour la première fois, par Albrecht [17], observé par Cook [18] et expérimentalement prouvé par Bailey [19].

Les efforts de talonnement, sont généralement localisés aux environs de la pointe de l'outil et jouent un rôle important dans le processus de coupe dynamique. En effet, la composante de cette force possède un caractère amortissant et stabilisant sur le processus de coupe [20].

• la variation de la géométrie de coupe instantanée.

En coupe stationnaire, il est admis que la pente de la surface à usiner a une influence sur l'angle de cisaillement (Figure. I.27) et donc sur le processus de formation du copeau. En effet, pour un angle de coupe donné, l'angle de cisaillement augmente avec l'augmentation de la pente. [21, 22]

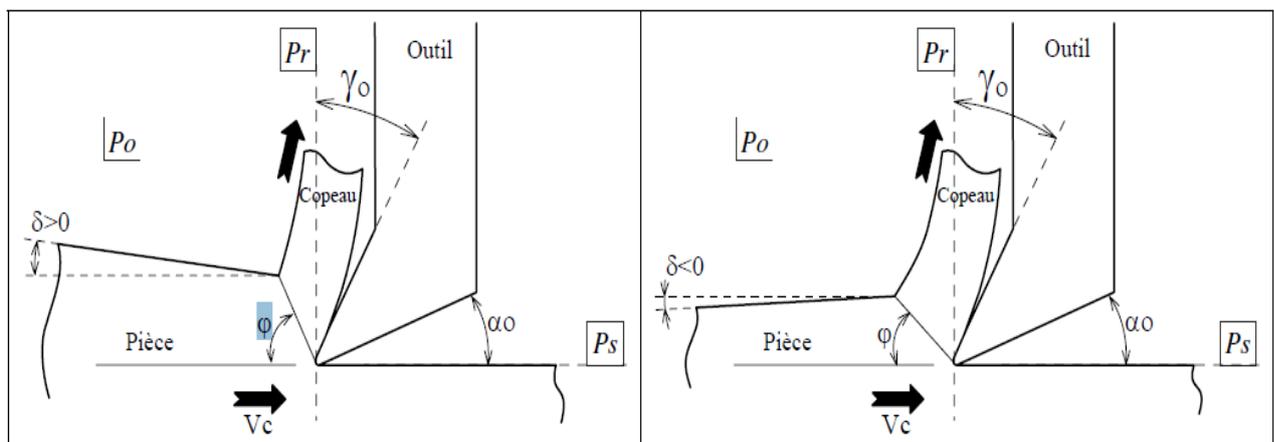


Figure I.27 Influences, en coupe stationnaire, de la pente δ de la surface à usiner sur l'angle de cisaillement ϕ [21].

On connaît aussi l'influence de l'angle de coupe γ_o et de l'angle de dépouille α_o sur l'angle de cisaillement ϕ , en coupe stationnaire, par la formule de Merchant suivant :

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_0 - \alpha_0}{2} \quad (\text{I.4})$$

En coupe dynamique, les vibrations génèrent une surface ondulée, de ce fait, la pièce se présente devant l'outil avec une pente variable par rapport à la direction de coupe. La matière aborde la face de coupe avec un angle d'attaque instantané γ' qui varie autour de l'angle de coupe nominal γ_0 . De la même manière, l'angle de dépouille instantané α' oscille autour de sa valeur nominale α_0 (Figure. I.28). La variation de ces angles provoque des oscillations de la bande de cisaillement et donc des variations des efforts de coupe [22, 23].

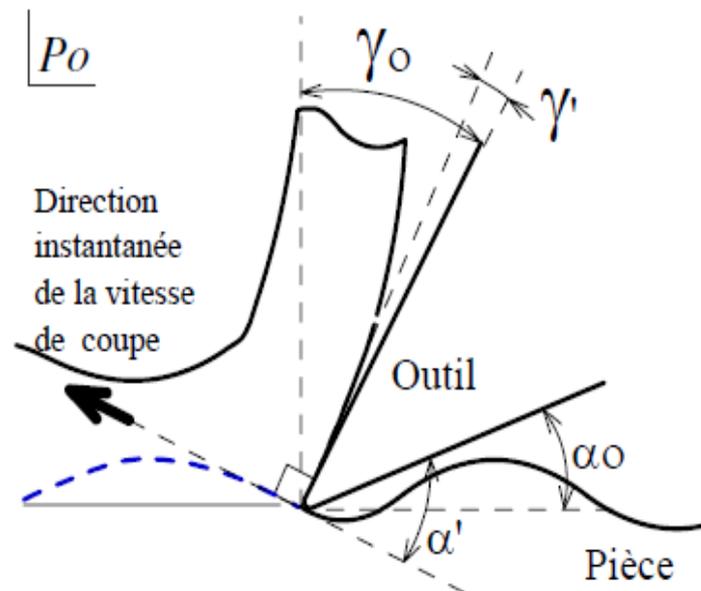


Figure I.28 Représentation de la variation instantanée des angles de coupes γ' et α' . γ_0 et α_0 sont respectivement l'angle coupe nominal et l'angle de dépouille nominal dans le plan de section orthogonal P_o [22, 23].

I.9.3 Les vibrations auto-excitées (le broutage ou « chatter »)

Nous avons pu voir précédemment que de nombreux phénomènes ont été étudiés comme étant sources de vibrations et d'instabilités lors des opérations d'usinage. Cependant, la plupart des auteurs semblent s'accorder sur le fait que les vibrations auto-excitées ou broutage constitue le phénomène le plus critique que l'on puisse rencontrer voir la (Figure I.29). C'est pourquoi les

vibrations auto-excitées ont été sources de nombreuses études au siècle dernier et le sont encore actuellement. Ces études mettent en avant deux causes de vibrations auto-excitées : la régénération de la surface et le couplage des modes. [24, 25].



Figure I.29 Vibrations auto-excitées.

• La régénération de la surface

Au cours d'une phase d'usinage, la matière est enlevée par des passes successives (correspondant, en tournage, à chaque tour de la pièce).

Durant chaque passe, de nombreux phénomènes, dont nous venons de dresser la liste, perturbent la coupe. Ces phénomènes, par les variations des efforts de coupe qu'ils provoquent, excitent les vibrations du système Pièce/Outil/Machine (POM) (Figure. I.30). Puis, elles sont entretenues par les ondulations laissées sur la surface usinée à la passe précédente $y(t-T)$. Le déphasage ε , qui existe entre les ondulations laissées par ces deux passes successives, induit une épaisseur de copeau non déformée instantanée $h(t)$ variable dont dépend le niveau des efforts de coupe. Le système est ainsi auto-excité.

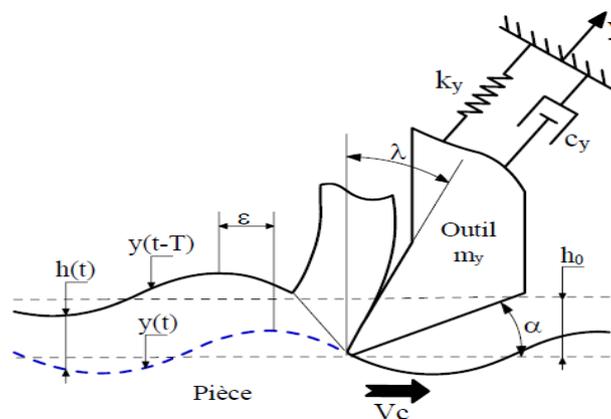


Figure I.30 Schématisation du phénomène de régénération de la surface.

h_0 : épaisseur de copeau non déformée initiale.

$y(t-T)$: surface générée lors de la passe précédente.

$y(t)$: surface générée lors de la passe en cours instantanée.

$h(t)$: épaisseur de copeau non déformée.

ε : déphasage entre la passe en cours et la passe précédente.

k_y, c_y, m_y : raideur, amortissement et masse équivalente du système à 1 dll.

• Le couplage des modes directionnels

L'effet du couplage des modes, introduit par Tlustý [24], qui considère le broutement comme un couplage entre deux modes orthogonaux de l'outil, ou de la pièce, sous l'effet des efforts de coupe. Ce couplage engendre un mouvement relatif elliptique de l'extrémité de l'outil par rapport à la pièce, provoquant ainsi un déséquilibre des conditions d'usinage pouvant entraîner une instabilité [20] (Figure. I.31).

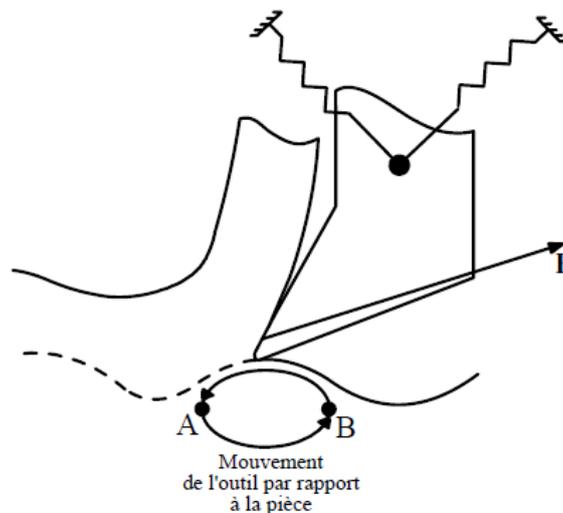


Figure I.31 Effet du couplage des modes directionnels. [26, 27]

La Figure I.31 montre un outil possédant deux modes vibratoires

La partie BA de la trajectoire correspond à une dissipation d'énergie de l'outil dans la coupe, car l'outil « avance » dans la matière et assiste le processus de coupe. En revanche, la partie AB correspond à une dissipation d'énergie de la coupe dans l'outil. La profondeur de coupe au cours de la partie AB est supérieure à la profondeur de coupe au cours de la partie BA. Il en résulte une accumulation d'énergie dans l'outil. En fonction de la forme de l'ellipse

(donc des conditions de coupe), l'outil dissipera l'énergie superflue en vibrant à la fréquence à laquelle il peut en amortir le plus (c'est à dire à sa fréquence naturelle). Si l'amortissement est suffisant, l'usinage sera stable sinon il sera instable [26, 27].

Conclusion

Dans ce chapitre on a mis en évidence l'importance de procédé de fabrication dans l'industrie, nous avons donné une description des paramètres de coupe (profondeur de passe, l'avance, vitesse de rotation) et les outils et leurs géométries, à la fin on a décrit des notions sur matériaux de l'outil et leurs désignations ainsi que le domaine d'utilisation, et l'influence des paramétrés de coupe sur l'état de surface autrement dit le comportement des phénomènes mécaniques sur le couple pièce-outil.

Chapitre II :

Optimisations des

conditions de coupe

II.1 Introduction

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération. Donc, l'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation des différentes méthodes d'optimisation.

Deux types d'optimisation ont été exploités dans ce chapitre :

- Optimisation mono-objectif : En illustrant différentes méthodes (Méthode du simplexe, Méthode du gradient et Méthode de pénalité).
- Optimisation multi-objectif : En utilisant la méthode de l'optimisation par algorithme génétique.

II.2 Optimisation mono-objectif

II.2.1 Définition

L'optimisation mono-objectif consiste à résoudre un problème d'optimisation à une seule fonction-objectif sous l'ensemble des contraintes. Ces problèmes peuvent être multi variable ou seul variable. La modélisation générale est tel que [30]:

$$\begin{cases} \text{Minimiser ou Maximiser } (\vec{x}) \\ \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \iff \vec{g}(\vec{x}) = g_j(\vec{x}). \\ \vec{h}(\vec{x}) = 0 \iff \vec{h}(\vec{x}) = h_k(\vec{x}) \end{cases} \quad (\text{II .1})$$

$$\text{Min} \leq \vec{x} \leq \text{Max}$$

avec : $\vec{x} = (x_i)$

$$x \in R^i, (x) \in R^j, h(x) \in R^k$$

(\vec{x}) : Fonction objective ou critère d'optimisation.

$g_j(\vec{x})$: Contrainte d'inégalité, (j) : c'est le nombre d'inégalité.

$h_k(\vec{x})$: Contrainte d'égalité, (k) : c'est le nombre d'égalité.

\vec{x} : La valeur de variable, (i) : c'est le nombre de variable.

On peut classer les problèmes d'optimisation selon leurs caractéristiques (par exemple la présence et l'absence des contraintes ou la nature des équations) comme suite [30] :

- Système linéaire.
- Système non linéaire.

II.2.2 Optimisation des systèmes linéaire

Cette optimisation correspond aux problèmes formés par des équations linéaires, elle est exprimée tel que [30] :

$$[A] \cdot \vec{x} - \vec{b} = \vec{0} \quad (\text{II.2})$$

Toutes les équations soit la fonction objective ou les contraintes sont linéaires.

- **Sans contrainte**

Elle est l'équation de fonction objective c'est tout, Nous recherchons des solutions approchées pour des systèmes impossibles en résolvant un problème d'approximation des moindres carrés ainsi que conserve les conditions de limitation de variable [30].

- **Avec contrainte**

La modélisation de problème est telle que [30] :

(\vec{x}) Fonction objective

$$[A] \cdot \vec{x} - \vec{b} \leq 0 \quad (1)$$

$$[A^*] \cdot \vec{x} - \vec{b}^* = 0 \quad (2)$$

$$\vec{x}_{min} \leq \vec{x} \leq \vec{x}_{max} \quad (\text{II.3})$$

(1) contrainte linéaire (inégalité)

(2) contrainte linéaire (égalité)

Lorsque nous avons un système linéaire avec contraintes à optimiser bien souvent, et de manière quasi immédiate, nous recourons à la méthode du simplexe. Cette méthode a vu le jour durant la seconde guerre mondiale par Georges Dantzig au sein de l'U.S. Air Force, mais pour des raisons évidentes, il ne publia ses travaux qu'en 1947. Le point d'origine du simplexe est la méthode de Gauss, où Dantzig y applique une stratégie de pivot assez particulière [30].

II.2.3 Optimisation des systèmes non linéaires

Étudie le cas général dans lequel l'objectif ou les contraintes (ou les deux) contiennent des parties non-linéaires, éventuellement non-convexes.

La forme générale d'un problème d'optimisation est la suivante [31] :

$$\min f(x)$$

$$x \in \mathbb{R}^n$$

Sous des contraintes

$$g(x) \leq 0$$

$$h(x) = 0 \tag{II.4}$$

Où les fonctions f , g et h sont typiquement non-linéaires.

L'équation désigne ce que nous appellerons des contraintes d'inégalité et l'équation des contraintes d'égalité.

Il va de soi que la plupart des problèmes réels ou industriels ne sont pas initialement sous une des formes proposées. C'est pourquoi un des premiers travaux consiste en général à mettre le problème initial sous une forme standard.

Pour résoudre les problèmes non linéaires nous utilisons les méthodes d'approximation les plus populaires surtout les méthodes déterministes comme la méthode du gradient, méthode de la pénalité intérieur etc [31].

II.2.4 Techniques d'optimisation mono-objective

Il y a plusieurs méthodes d'optimisation mono-objective, telles les méthodes déterministes [30] :

- **Méthode du simplexe**

L'intérêt principale de la méthode du simplexe par rapport aux autres méthodes est qu'elle ne nécessite pas de calcul de gradient, elle est uniquement basée sur l'évolution de fonction, cela rend utilisable pour des fonctions bruitées.

Soit une fonction à minimiser. On appelle simplexe de \mathbb{R}^n un ensemble (x_0, x_1, \dots, x_n) de point de \mathbb{R}^n tel que $f(x_0) \leq f(x_i) \forall i \in [1, \dots, n]$, donc x_0 est le meilleur élément et $f(x_0)$ est la valeur optimale.

- **Méthode du gradient**

Historiquement, les méthodes de gradient sont les plus anciennes, elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires et sont basées sur une hypothèse forte ;

La connaissance de la dérivée de la fonction-objectif en chacun des points de l'espace. Cette famille des méthodes procède de la façon suivante : On choisit un point de départ x_0 et on calcule le gradient $\nabla f(x_0)$ en x_0 . Ce gradient indique la direction de plus grande augmentation de f . On se déplace d'une quantité λ_0 dans le sens opposé au gradient et on définit le point x_1 :

$$x_1 = x_0 - \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|}$$

Cette procédure est répétée et engendre les points x_0, x_1, \dots, x_k ainsi pas à pas la distance entre le point d'indice k et l'optimum diminue.

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|}$$

λ_k est le pas de déplacement à chaque itération.

- **Méthode de pénalité**

Le but des méthodes de pénalité est de résoudre un problème d'optimisation mono-objectif de façon approchée. L'algorithme de cette méthode est comme suit :

Soit le problème P :

$$\text{Min } f(x)$$

Sous contrainte :

$$g(x) \leq 0$$

Pour $k=1,2, 3, \dots$ On défini

$$F^k(x) = f(x) + \frac{k}{2} \|g(x)\|^2 \tag{III.6}$$

On a :

x^* est minimum local du problème

Le terme $\frac{k}{2} \|g(x)\|^2$ est le terme de pénalité.

La suite :

$$\nabla F^k(x^k) \rightarrow x^*$$

$$\forall f(x^k) + k \nabla g(x^k) g(x^k)$$

x^k est à l'intérieur de S pour k suffisamment grand.

Donc x^k est solution du problème avec contrainte pour k suffisamment grand.

II.3 Optimisation multi-objectif

II.3.1 Définition

Un problème multi objectif ou multicritère peut être défini comme un problème dont, on recherche l'action qui satisfait un ensemble des contraintes et optimise un vecteur de fonction-objectifs [29].

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Avec x_i les variables du problème et n est le nombre de ces variables.

Les contraintes seront notées :

$$g_i(x) \text{ avec } i=1 \dots\dots\dots m, \text{ avec } m \text{ le nombre des contraintes.}$$

Le vecteur de fonction objectif sera noté f :

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots\dots\dots f_k(x))$$

Avec f_i les objectifs ou critères de décision et k le nombre d'objectif. Nous considérons que les objectifs sont des fonctions à minimiser, Un problème d'optimisation recherche l'action x^* telle que les contraintes $g_i(x^*)$ soient satisfaites pour $i= 1 \dots\dots\dots m$, et qu'elle optimise la fonction f :

$$f(x^*) = (f_1(x^*), f_2(x^*) \dots\dots\dots f_k(x^*))$$

II.3.2 Méthodes d'optimisation multi-objective

II.3.2.1 Approche par ϵ -contraintes

Cette méthode est basée sur la minimisation d'un objectif f_i en considérant que les autres objectifs f_j avec j différent de i doivent être inférieurs à une valeur ϵ_j . En générale, l'objectif choisi est celui que le décideur souhaite optimiser en priorité [28].

$$\text{Min } f_i(x) \text{ avec}$$

$$f_j(x) \leq \epsilon_j, \forall j \neq i$$

De cette manière, le problème multi objectif sera traduit par un problème simple objectif sous contraintes qu'on peut le résoudre. Le décideur peut ensuite réitérer ce processus sur un objectif différent jusqu'à ce qu'il trouve une solution satisfaisante.

II.3.2.2 Méthode min-max

Cette méthode consiste à transformer le problème multi objectif en un problème à un seul objectif où l'on cherche à minimiser le maximum de l'écart relatif entre le point de référence appelé but et un autre point but associé par le décideur, on peut écrire la distance entre le but et l'autre point comme suit [28] :

$$L_r(\vec{f}(\vec{x})) = \left[\sum_{i=1}^m |B_i - f_i(\vec{x})|^r \right]^{\frac{1}{r}} \tag{II.5}$$

Avec $i=1 \dots \dots \dots m$

B_i Le but à pour le $i^{ème}$ objectif

Selon l'indice r il y a plusieurs normes, le plus utiliser en méthode min-max est :

$$L_\infty = \max_{i \in \{1, \dots, m\}} [B_i - f_i(\vec{x})] \tag{II.6}$$

II.3.2.3 But à atteindre

Cette approche, comme celle de min-max, utilise un point de référence pour guider la recherche. Mais elle introduit aussi une direction de recherche, si bien que le processus de résolution devra suivre cette direction. A la différence de l'approche min-max, qui utilise des normes pour formaliser la distance au point de référence, l'approche du but à atteindre utilise des contraintes, à l'instar de l'approche ϵ -contrainte, pour déterminer la position du point de référence (aussi appelé le but). L'écart par rapport à ce but est contrôlé grâce à la variable λ introduite à cet effet [28] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } \lambda \\ \text{tel que } f_i(\vec{x}) - \alpha_i \lambda \leq B_i \text{ (II.9)} \\ \text{et que } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \end{array} \right.$$

Ainsi en minimisant λ et en vérifiant toutes les contraintes, la recherche va s'orienter vers le but B et s'arrêter sur un point faisant partie de la surface de compromis. Cependant, cette approche, comme les précédentes, doit être itérée plusieurs fois dans le but d'obtenir un ensemble de points optimaux. Les paramètres α_i et B_i doivent être bien choisis par l'utilisateur. Bien que ces paramètres permettent une grande flexibilité de la recherche (orientation et but), s'ils sont mal choisis, ils peuvent, dans certains cas extrêmes, donner des résultats non cohérents.

II.3.2.4 Agrégation des objectifs

Cette méthode consiste à ramener le problème multicritère à un problème d’optimisation d’une combinaison linéaire des objectifs initiaux, en affectant un coefficient de poids, Les coefficients sont généralement choisis en fonction de l’importance relative des objectifs [28].

Soit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } f_{eq}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(\vec{x}) \\ \text{et } g(\vec{x}) \leq 0 \\ h(\vec{x}) = 0 \end{array} \right. \quad (II.7)$$

On a $\vec{x} \in R^n$, $(\vec{x}) \in R^m$ et $h(x) \in R^p$

Fréquemment les coefficients de pondération respectent la relation suivante :

$$w_i \geq 0 \text{ Pour tout les } i \in \{1, 2, \dots, k\}$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (II.8)$$

II.4 Optimisation par algorithme génétique

Selon les caractéristiques du critère d’optimisation, des contraintes et des variables du système, on peut trouver différents types de problèmes d’optimisation [33] :

Optimisation linéaire sous contraintes (programmation linéaire), optimisation non linéaire sous contraintes (programmation non linéaire), optimisation multicritères (programmation multi-objectif), optimisation non-linéaire à variables entières ou mixtes,...

On peut facilement remarquer que le modèle d’optimisation présenté est hautement non linéaire. Les variables de décision se multiplient entre elles autant dans les fonctions objectives que dans les contraintes.

Les méthodes de base en optimisation : résolution graphique, programmation linéaire, quadratique ou dynamique, sont difficilement applicables à ce modèle. Il ne reste donc que les techniques numériques pour résoudre ce problème. Nous avons choisi d’utiliser un code

d'algorithme génétique (AG) de base capable de résoudre ce problème dans un temps raisonnable intégré sous Matlab. Les algorithmes génétiques cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle et de la génétique dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C. Darwin (1859). Dans un environnement, « les individus » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître.

La tâche la plus importante pour l'élaboration d'un AG est la détermination du génome. Ce génome est en général un vecteur de valeurs (binaires, entières, réelles, etc.) contenant la représentation des variables de décision. En fait, chaque individu contient une solution plus ou moins faisable selon les contraintes et plus ou moins performante selon la ou les fonctions objectifs.

L'algorithme génétique de base comprend sept étapes. La FigureII.1 illustre schématiquement l'algorithme. Pour commencer l'algorithme génère une population initiale aléatoirement [33].

1- Dès l'initialisation, l'algorithme rejette les individus qui sont trop loin hors contraintes, mais il tolère les individus qui ne sont pas trop hors contraintes parce que ceux-ci peuvent être près de la solution optimale. Plus la taille est grande, plus les itérations demandent de temps de calcul, il convient donc de bien ajuster ce paramètre.

2- Pour déterminer quels individus sont plus enclins à obtenir les meilleurs résultats, une sélection est opérée. Ce processus est analogue à un processus de sélection naturelle, les individus les plus adaptés gagnent la compétition de la reproduction tandis que les moins adaptés meurent avant la reproduction, ce qui améliore globalement l'adaptation.

3- La reproduction, ou croisement, permet de mélanger le génome des parents pour produire la prochaine génération.

4- La mutation, comme dans la nature, on introduit une perturbation d'une ou plusieurs variables de l'enfant produit au croisement. La mutation sert à éviter une convergence prématurée de l'algorithme. Par exemple lors d'une recherche d'extremum la mutation sert à éviter la convergence vers un extremum local.

5- On évalue ensuite la valeur des fonctions objectives et de la fonction d'adaptation de chaque enfant produit. La vérification des critères d'arrêt détermine si on arrête l'algorithme ou si on passe à une autre itération.

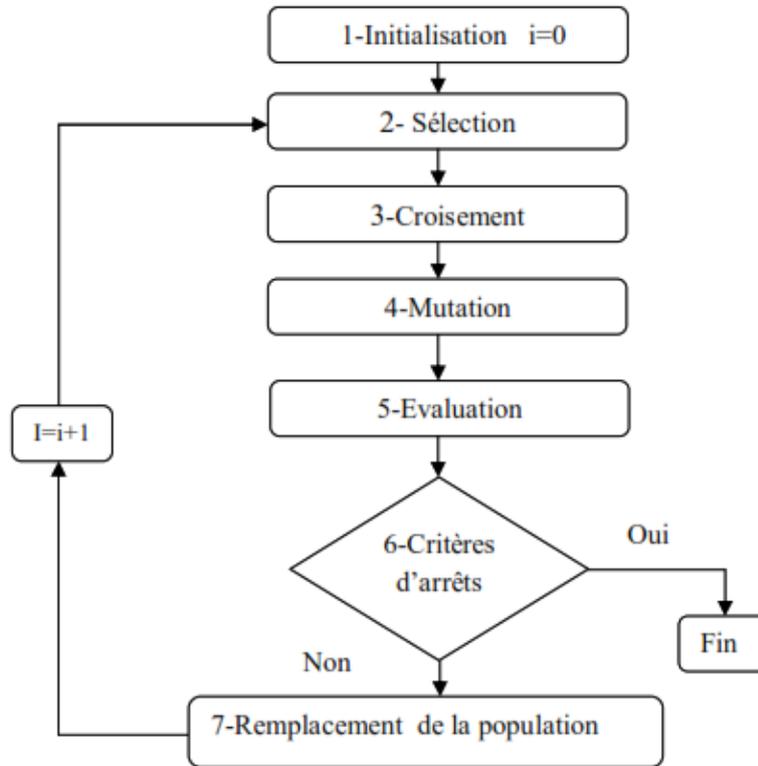


Figure II.1 Schéma d’une algorithmique génétique [33].

6- Si aucun des critères n'est atteint, on fait une autre itération à partir de l'étape de la sélection. Il y a trois critères d'arrêt que l'on peut ajuster, deux absolus et un relatif. Les critères absolus sont le temps de calcul et le nombre d'itération maximum que l'on donne à l'algorithme pour résoudre le problème. Le critère relatif est le nombre maximum d'itération que l'on fait sans qu'il n'y ait d'amélioration de la meilleure solution.

7- En effet, si la meilleure solution ne s'améliore pas pendant un certain nombre d'itération, c'est que l'algorithme a convergé vers une solution. Celle-ci est généralement très près de l'optimum.

II.4.1 AG pour l’optimisation multi-objectif

Dans la plupart des AG d’optimisation multi-objectif développés, il s’agira de satisfaire les deux points suivants[33]:

1) trouver des solutions aussi proches que possible des vraies solutions Pareto optimales, c'est-à-dire converger le plus possible vers le front de Pareto.

2) trouver un ensemble de solutions très variées, tout le long du front.

Le tout premier algorithme évolutionnaire d'optimisation multi-objectif s'appelle VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm), AGEV : Algorithme Génétique à Évaluation Vectorielle) et a été présenté par Schaffer en 1985 [Coello Coello, 2001]. Cet algorithme considère une population de N individus. Ces individus sont répartis en k sous populations, chaque valeur de k représentant un objectif à optimiser. À chaque génération, un nombre de sous populations est généré par sélection en fonction de l'objectif k. Ensuite, ces sous-populations sont regroupées pour former une nouvelle population de N individus et les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués.

L'avantage de cet algorithme est qu'il est facile à implanter mais son inconvénient majeur est qu'il a tendance à générer des solutions qui excellent dans un seul objectif, sans tenir compte des autres objectifs. Toutes les solutions de moyenne performance, qui peuvent être de très bons compromis, risquent de disparaître avec ce type de sélection [Dridi, 2005].

II.4.2 PSO pour les problèmes multi-objectifs

Afin d'appliquer le PSO dans la résolution d'un problème d'optimisation multi objectif, il est évident que son algorithme standard (originale) doit être modifié. Comme nous avons vu dans le premier chapitre, la résolution d'un problème à critère multiple ne consiste pas la recherche d'une solution unique (comme dans l'optimisation mono-objectif). Au lieu de cela, on cherche, pour un problème multi-objectif, à trouver un ensemble de solutions optimales (ensemble de solutions Pareto optimales) [33].

II.4.2.1 Extension du PSO

Puisque le PSO est un algorithme basé sur la recherche par population (groupe), il est souhaitable de l'utiliser afin d'obtenir plusieurs solutions non dominées à une seule exécution. Ainsi, tout comme les algorithmes évolutionnaires, trois questions principales doivent être prises en considération, lors de l'extension du PSO pour les problèmes multi-objectifs [33] :

1. Comment sélectionner les particules utilisées comme guide (leader) pour d'autres particules afin de favoriser les solutions non dominées ?

2. Comment conserver les solutions non dominées trouvées par le processus de recherche, en tenant compte de toutes les itérations précédentes ? En outre, il est préférable que ces solutions soient bien réparties le long du front de Pareto.

3. Comment maintenir la diversité dans l'essaim afin d'éviter la convergence vers une solution unique ? Comme nous avons vu dans la section précédente, lors de la résolution d'un problème d'optimisation non-objectif, le leader que chaque particule utilise pour mettre à jour sa position est complètement déterminé suivant la topologie du voisinage de cette particule. Cependant, dans le cas d'un problème multi-objectif, chaque particule pourrait avoir un ensemble de leaders dont un seul peut être choisi. Un tel ensemble peut être composé des particules de l'essaim. Dans d'autres situations, il peut être stocké dans un répertoire séparé, que l'on appelle archive externe. Il s'agit d'un répertoire qui contient les solutions non dominées trouvées par le processus de recherche. En outre, le contenu de cet archive est souvent présenté comme un résultat final de l'algorithme.

De cette manière, l'exécution du PSO multi-objectif (MOPSO) débute d'abord par l'initialisation de l'essaim. Ensuite, l'archive des solutions non dominées doit être initialisé séparément de l'archive de l'essaim. Plus tard, un mécanisme de sélection d'un leader pour chaque particule est appliqué. Enfin, cet archive des solutions non dominées doit être ajusté. Ce processus est répété pour un nombre déterminé d'itérations.

Comme nous pouvons le voir, et compte tenu des caractéristiques de l'algorithme du PSO, les questions qui se posent lorsqu'il s'agit d'un problème multi-objectif sont liés à deux mécanismes principales :

➤ Sélection et mise à jour des solutions non dominées :

- Comment sélectionner, à partir de l'essaim, les particules qui peuvent être considérées comme solution non dominé ?
- Comment sélectionner les solutions qui doivent rester dans l'archive externe d'une itération à une autre ?

➤ Création de nouvelles solutions :

Comment promouvoir la diversité par la mise à jour du record personnel et de leader pour chaque particule.

Ces aspects sont discutés en plus de détail dans les prochaines sections.

II.4.2.2 MOPSO

Puisque la solution d'un problème d'optimisation multi-objectif se compose d'un ensemble de solutions optimales (non dominées au sens de Pareto), il est évident que la notion du leader utilisée dans le PSO standard doit être changée [33].

Peu de recherches ont évité la définition d'un nouveau concept de leader pour les problèmes multi-objectifs en adoptant des fonctions agrégées, sous forme d'une somme pondérée par exemple, ou des approches non Pareto et non agrégées qui optimisent chaque objectif séparément. Cependant, il est important de préciser que la majorité des approches présentées dans ce domaine redéfinissent le concept du leader. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le choix des leaders est un composant clé dans la conception d'une MOPSO.

La plupart des approches consistent directement à considérer toute solution non dominée, localement ou globalement, comme nouveau leader. Ensuite, une de ces solutions doit être choisie. De cette façon, une mesure de qualité est nécessaire pour la sélection des leaders. Evidemment, une telle caractéristique peut être définie de plusieurs manières différentes. L'une des méthodes qui peuvent être utilisées dans ce but est la mesure de densité de voisinage. Afin de garder la diversité, un mécanisme basé sur la mesure de qualité indiquant la proximité de particule dans l'essaim peut être utilisé. Plusieurs auteurs ont proposé des techniques de sélection des leaders basées sur des mesures de densité. Afin de comprendre les approches spécifiques qui vont être décrites par la suite, nous présentons deux des plus importantes mesures de densité utilisées dans le domaine d'optimisation multi-objectif [33]:

• Estimateur de densité à voisinage quadrilatère

Cette technique est donnée comme une idée qui présente le plus proche voisinage d'une particule, dans l'espace des solutions réalisables. Cette mesure évalue le périmètre du quadrilatère formé en utilisant les plus proches voisins comme sommets (figure II.2).

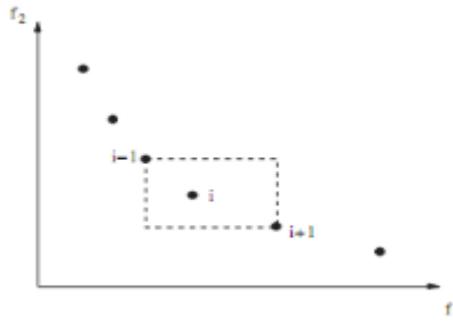


Figure II.2 : Voisinage formé des deux plus proches particules [33].

• Estimateur de densité à noyau

Quand une particule partage les ressources avec les autres, la dégradation de son aptitude est proportionnelle au nombre des particules dans son voisinage qui l'entoure. De ce fait, un voisinage de particule peut être défini par le rayon de la région avoisinante. Ces voisinages sont appelés niche.

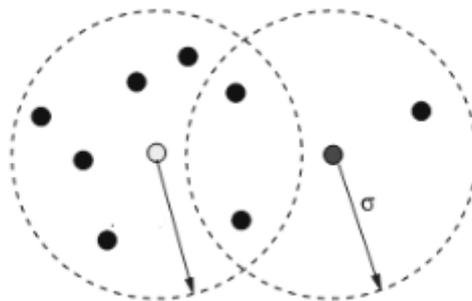


Figure II.3 : Voisinage en niche [33].

La figure 2.4 présente le voisinage de deux particules définis comme une niche. Les particules qui ont une niche plane sont préférées.

II.5 Optimisation des conditions de coupe

II.5.1 Variables d'optimisation

Les variables définissant les conditions de coupe en tournage sont des grandeurs géométriques et cinématique intervenant dans la dynamique de coupe et la nature du milieu

dans lequel est effectuée la coupe (lubrification). Les variables retenues pour une opération de tournage sont [33] :

- Pour les grandeurs géométriques :

La profondeur de passe a (en mm).

- Pour la grandeur cinématiques :

La vitesse de coupe V_c en (m/min).

L'avance par tour f (en mm /tr).

Le problème de choix des conditions de coupe consiste à déterminer les valeurs des variables de coupe (f , a , V_c) pour chaque opération élémentaire d'usinage en prenant en compte les limites de performance des éléments de la cellule élémentaire d'usinage que se traduisent par des contraintes établies à partir de lois de coupe et qui font intervenir les variables de coupe avec lesquelles le domaine des solutions réalisables est borné. D'une manière générale, la détermination des paramètres de coupe nécessite une bonne connaissance des facteurs d'incidence relatifs au couple outil-matière à l'opération d'usinage et à l'environnement.

II.5.2 Fonctions –objectifs

- **Temps d'usinage**

La production maximale sera atteinte lorsque le temps de fabrication unitaire sera minimal. Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. C'est la somme des temps machine, temps de changement de l'arête, temps retour de l'outil et le temps de montage et démontage de la pièce.

- **Coût d'usinage**

Le coût d'usinage unitaire est le coût nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. Généralement on peut définir le coût d'usinage totale comme suit :

Coût total = frais fixes + coût machine + coût outil

II.4.3 Contraintes de problème

- L'avance par tour f doit être comprise entre deux valeurs extrêmes programmables sur la machine-outil.

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$$

- La vitesse de coupe V_c doit être comprise dans les limites de validité du modèle de la loi de la durée de vie établie pour la couple outil-machine.

$$V_{c\min} \leq V_c \leq V_{c\max}$$

- **Limitation sur la puissance de coupe**

La puissance nécessaire à la coupe doit être inférieure à la puissance de la machine.

- **Limitation sur l'état de surface**

L'état de surface résultante d'usinage doit être inférieur à une rugosité maximale imposé par constructeur selon l'état de service

- **Limitation sur la température de coupe**

Le facteur de contrôle est la température d'interface outil-coupeau qui doit être inférieur à une température θ_{\max} , pour réduire l'usure de l'outil.

- **Limitation sur l'effort de coupe**

L'effort de coupe doit être inférieur à une force de coupe limite, pour la réalisation de la coupe, et l'optimisation de cette dernière.

II.6 Cas d'application en tournage d'ébauche multi-passes

Afin d'examiner un cas d'application en tournage dont l'aspect est aussi bien algorithmique que mathématique, deux applications numériques sont proposées à travers de deux problèmes d'optimisation de référence :

- la première application, inhérente au tournage d'ébauche multi-passes,
- la seconde application en tournage de finition.

La base de données pour cet exemple concerne le tournage d'une pièce en acier doux avec un outil en carbure [32].

II.6.1 Modèles d'optimisation retenus

Dans les deux applications, les modèles d'optimisation retenus sont les mêmes que ceux utilisés en tournage d'ébauche multi-passes.

II.6.1.1 Fonctions « objectif »

- **Le taux de production**

Le taux total de production est l'inverse du temps total de production et peut être donc décomposé en un taux de production en ébauche multi-passes (P_r) et en finition à une seule passe (P_{r_f})

$$P_r = 1/t_p = 1/t_{p_f} + 1/t_{p_r} \quad (\text{II.9})$$

Où (t_{p_f}) et (t_{p_r}) sont respectivement le temps de production en opération de finition et d'ébauche [32].

- **Le coût de production**

De même, le coût de production total (C) est égal à la somme du coût de production en ébauche multi-passes (C_r) et en finition (C_f), [32].

Pour multi-passe en ébauche :

$$C_r = c_m (t_l + (t_{ln}(n-1))) + c_m n t_m + p_0 \left(\frac{n t_m}{t} \right) + c_m \left(t_r \frac{n t_m}{t} \right) \quad (\text{II.10})$$

Et pour une seule passe en finition :

$$C_f = c_m t_l + c_m t_m + p_0 \left(\frac{t_m}{t} \right) + c_m \left(t_r \frac{t_m}{t} \right) \quad (\text{II.11})$$

II.6.1.2 Fonctions « contrainte »

- **La durée de vie de l'outil**

Lors de l'usinage, on ne doit pas dépasser la durée de vie maximale (t_{max}) fixé pour l'outil de coupe pour éviter tout bris imprévu. En outre, l'utilisation de l'outil pendant une durée

inférieure à (t_{min}) pénalisera systématiquement le temps de production et par conséquent le coût de production. Soit donc :

$$T_{min} \leq T \leq T_{max} \quad (II.12)$$

- **L'effort de coupe**

Cette restriction est imposée pour limiter la déflexion de l'outil et de la pièce ainsi que pour garantir la stabilité de la coupe. L'expression de l'effort de coupe est donnée :

$$F_c = a f (28.10 V_c^{0.07} - 0.525 V_c^{0.5}) * \left(1.590 + 0.946 \left((1 + e) / \sqrt{(1 - e)^2 + e} \right) \right) \leq F_{max} \quad (II.13)$$

Où (e) est une variable dépendante de la vitesse de coupe et l'avance.

- **La puissance de coupe**

Au cours de l'usinage, il est impératif que la puissance absorbée par la coupe ne dépasse pas la puissance de la machine (P_{max}), d'où l'inégalité suivante :

$$P_c = (0.746 F V_c) / (4500 \eta) \leq P_{max} \quad (II.14)$$

- **La température de coupe**

Pour limiter les erreurs d'usinage qui sont dues à la dilatation thermique de l'outil et de la pièce, la température à l'interface outil-copeau T_e doit être inférieure à une température maximale admissible ($T_{e_{max}}$) [32] :

$$T_e = \beta_0 V_c^{\beta_1} f^{\beta_2} a^{\beta_3} \leq T_{e_{max}} \quad (II.15)$$

- **La qualité de la pièce**

La relation qui exprime la contrainte sur la rugosité de la surface en finition d'usinage est donnée par la relation suivante :

$$R_{th} = 1000 \frac{f^2}{8r\epsilon} \leq R_{th_{max}} \quad (II.16)$$

II.6.2 Cas de l'obturation de l'espace de recherche

Le problème d'optimisation est formulé autour du minimum du coup et du temps de production. Ce problème d'optimisation est complexe puisqu'il présente plusieurs contraintes et objectifs non linéaires. Les mêmes données numériques (Tab. II.1) sont reconsidérées ici pour tenter de résoudre ce problème à l'aide de la formulation mathématique multi-objectif et « non-contrainte » où les variables de décision sont les trois paramètres de coupe.

Tableau II.1– Valeurs numériques des constantes utilisées [32].

$a_{pmin}=1.2mm$	$a_{pmax}=2.75mm$	$f_{min}=0.3mm/tr$	$f_{max}=0.75mm/tr$	$V_{cmin}=50m/min$	$V_{cmax}=400m/min$
$t_{in}=0.2min$	$K_t = 6.10^{11}$	$t_r = 0.5min$	$D = 100mm$	$\eta = 90 \%$	$\beta_1 = 0.4$
$T_{min}=25min$	$T_{max}= 45min$	$P_{max}= 2.5kw$	$F_{max} = 85kgf$	$Te_{max}=1000^{\circ}C$	$R_{thmax}=10 \mu m$
$\beta_0 = 132$	$r = 0.75$	$\beta_2 = 0.2$	$\beta_3 = 0.105$	$p_1 = 50$	$p_0 = 10$

II.6.2.1 Formulation multi-objectifs non contrainte

Le problème d'optimisation posé ici est formulé mathématiquement(Eq.II.17) autour de la minimisation du coût C_r et du temps de d'usinage P_{r_s} , tout en tenant compte des limitations de production citées précédemment :

$$\left. \begin{aligned}
 & \text{Minimiser } E(\bar{C}_r) \text{ et Maximiser } E(\bar{P}_{r_s}) \\
 & \text{telque} \\
 & t \leq t_{max} \\
 & t \geq t_{min} \\
 & F_C \leq F_{max} \\
 & P_C \leq P_{max} \\
 & Te \leq Te_{max} \\
 & V_{Cmin} \leq V_C \leq V_{Cmax} \\
 & f_{min} \leq f \leq f_{max} \\
 & a_{pmin} \leq a_p \leq a_{pmax}
 \end{aligned} \right\} \quad (II.17)$$

Le problème présenté ci-dessus est implémenté sous MATLAB™ est résolu par l'algorithme développé NSGA-II, dont les valeurs paramétriques principales figurent ci-dessous (Tab. II.2).

Tableau II.2– Valeurs paramétriques du P-NSGA-II.

Taille de la population	Sélection	Taux du croisement	Taux de mutation	Nombre maximal de générations
100	Par tournoi	0.8	0.01	300

II.7 Algorithme génétique de tri non-dominé NSGA-II

Dans la mesure où nous avons proposé une formulation multi-objective du problème d'optimisation fiabiliste, nous devons également proposer une technique d'optimisation adaptée. Ainsi, notre choix s'est porté sur le NSGA-II.

En effet, plusieurs techniques conventionnelles, modernes et hybrides ont été utilisées dans le passé pour résoudre des problèmes d'optimisation fiabilistes mono-objectif en usinage, la méthode SUMT employée par Hati et Rao entre autre, combinée à la méthode de Newton-Raphson par Iwata et al. et récemment la technique d'essai particulière à objectif dynamique (DO-PSO) qui a été développée et appliquée par Hippalgaonkar et Shin [32].

D'autre part, la puissante variante de l'algorithme génétique NSGA-II, est une technique infaillible pour résoudre des problèmes d'optimisation multi-objectifs contraints et non contraints. En effet, cet algorithme maintient une très bonne diffusion des solutions non dominées malgré la complexité du problème traité et il converge beaucoup mieux dans l'obtention du front de Pareto par rapport à d'autres méthodes élitistes, comme la « Pareto-Archived Evolution Strategy (PAES) » et « Strength-Pareto Evolution Strategy (SPES) » Yusoff et al. Ont réalisé une revue exhaustive des travaux impliquant le NSGA-II dans l'optimisation des procédés d'usinages traditionnels et modernes. Dans certains de ces travaux, le NSGA-II a été comparé à d'autres techniques d'optimisation multi-objectifs comme l'algorithme évolutionnaire différentiel (DE), la programmation quadratique séquentielle (SQP), GA, PSO,

la recherche en nuage de points (SS) et ACO. Il a été constaté que le NSGA-II est plus efficace que les autres méthodes en termes du nombre de solutions et du rapport des individus non dominés. Enfin, Yusoff et al. ont conclu que le NSGA-II est une technique fiable et efficace pour l'optimisation multi-objective des conditions de coupe[32].

II.8 Résultats et discussion

Les figures ci-dessous montrent les solutions classiques générées par l'algorithme NSGA-II pour le problème d'optimisation multi-objectif en tournage d'ébauche multi-passes.

Les figures II.4 (a, b, c) montrent l'espace faisable pour (n=2, 3 et 4) passes de coupe et des solutions optimales possibles au problème d'optimisation posé. Ces figures montrent également les contraintes impliquées activement dans la définition de l'espace faisable.

Dans les figures [II.4 (a, b, c)] nous constatons plus que le nombre de passes n élevé en fonction de vitesse de coupe et l'avance par tour de l'outil. Le taux de production diminue et le coût de production augmente.

La comparaison des courbes de chaque graphe des figures, nous remarquons dans la figure (II.4.a) de passe n=2 le coût et le taux de production sont respectivement $C_{r_{\min}}=154.906$ (\$/pièce), $Pr_{\max}=0.075994$ (pièce/min) sont plus élevés par rapport aux résultats trouvés dans les figures (II.4.b et II.4.c) pour des passes (n=3, n=4). Nous trouvons dans la figure(II.4.b) une diminution de taux à 6,6% et une augmentation de coût à 5.8% qui engendre automatiquement l'augmentation du temps d'usinage, et dans la figure(II.4.c) pour n=4 marque à nouveau une dégradation de productivités.

Bien que les fonctions contraintes constatées sont les mêmes dans les trois cas c'est-à-dire, toutes les solutions choisies pour (n=2,n=3,n=4) n'impliquent pas un risque de violations sur la température de coupe maximale (1000 °C) et sur autre contrainte de limitation (P_{\max} , t_{\max} , F_{\max} , t_{\min}) sont respectivement (2.5kw , 45min , 85kgf , 25min).

Après présentation et critique des solutions générées par l'algorithme NSGA-II en résultant que la solution qui réalise un équilibre entre les niveaux de fiabilité des limitations de production pour n passes de coupe est bien la première solution figure(II.4.a) pour n=2 .

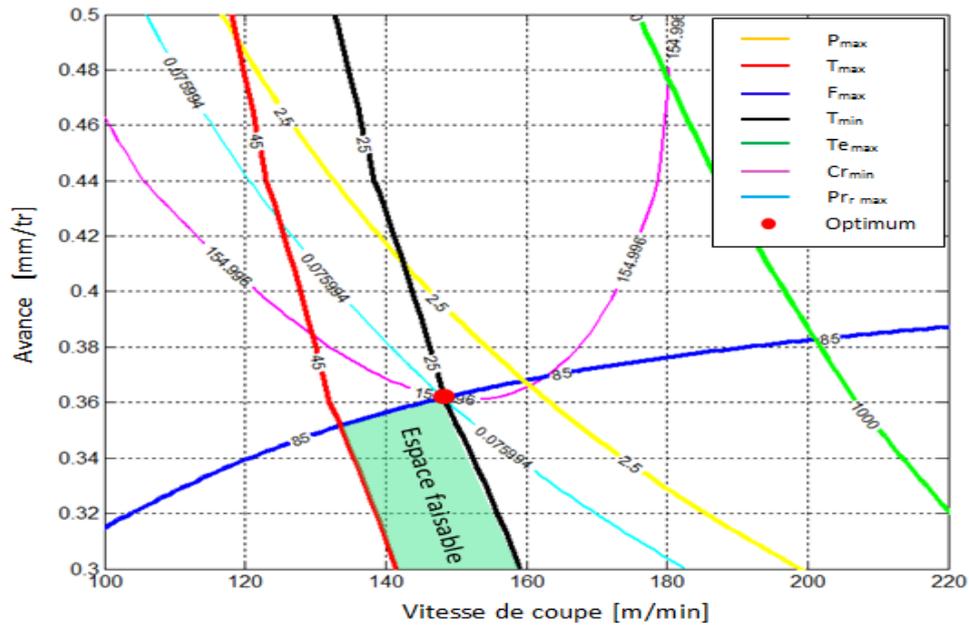


Figure II.4.a – Optimum performant dans l’espace faisable déterministe classique pour (n=2).

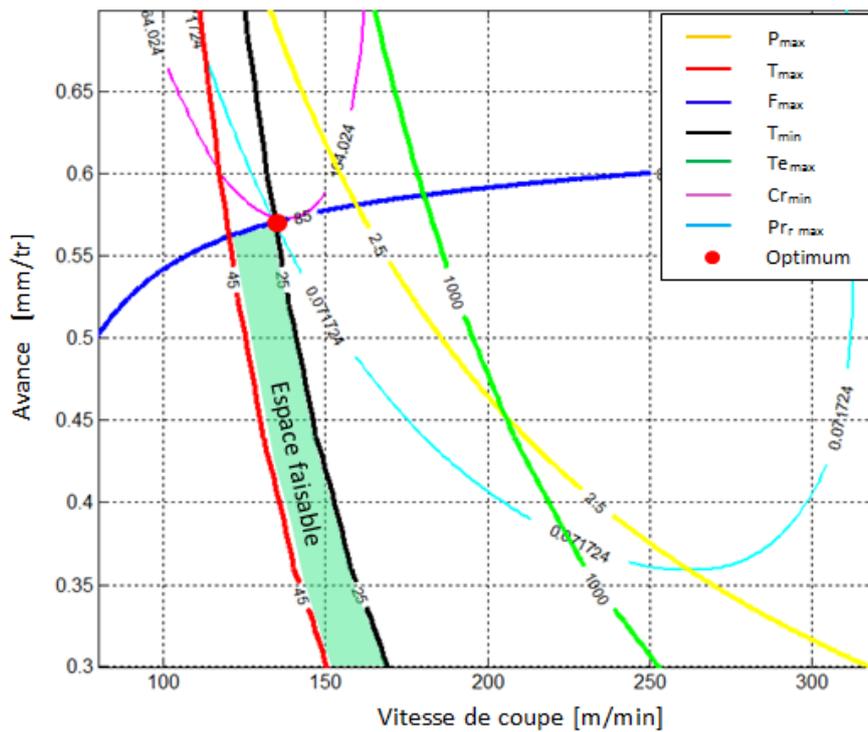


Figure II.4.b – Optimum performant dans l’espace faisable déterministe classique pour (n=3).

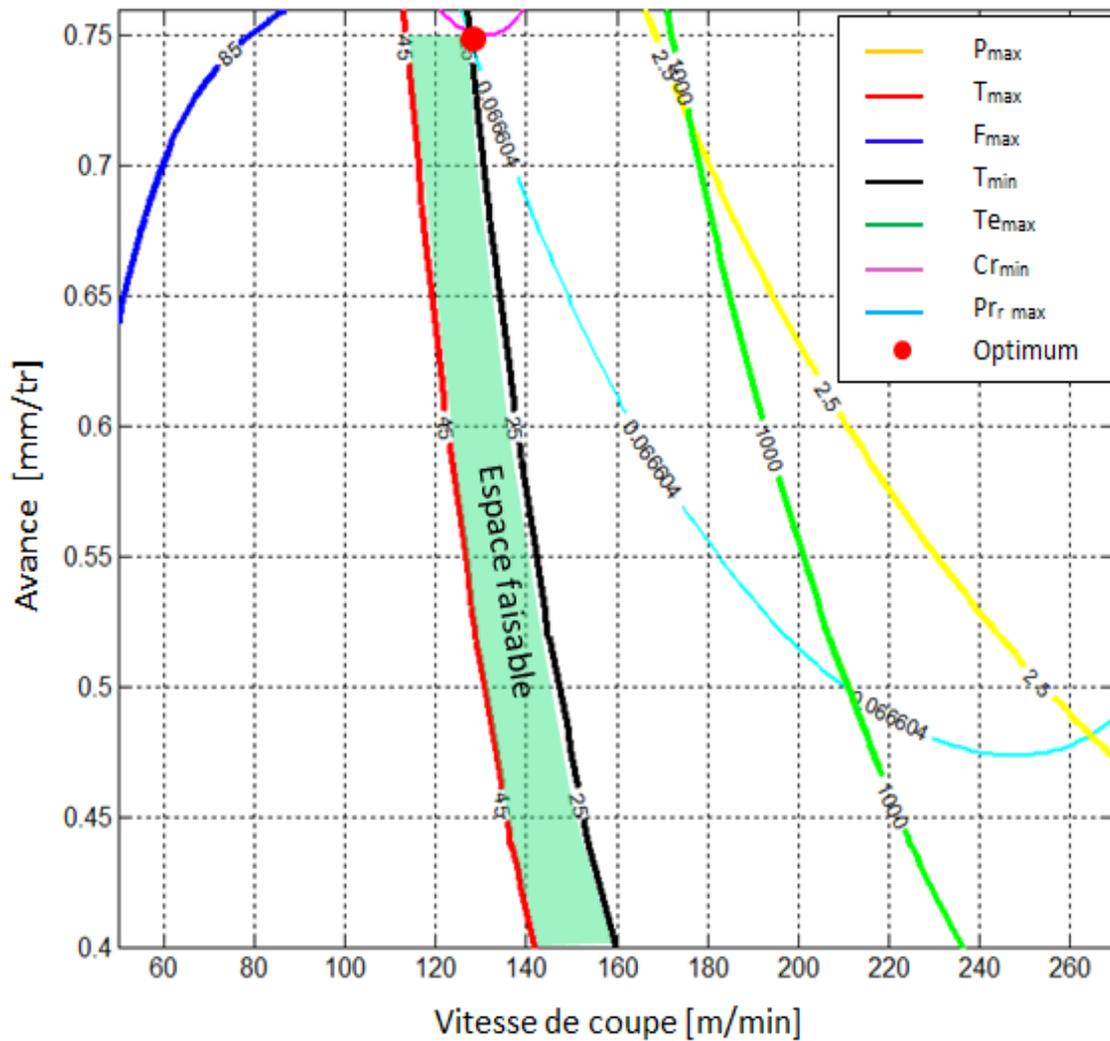


Figure II.4.c : Optimum performant dans l’espace faisable déterministe classique pour (n=4).

Les données ont été réorganisées par bloc dans le but d’une meilleure interprétation des résultats comme le montre le tableau II.3

Tableau II.3 - Optima générés par la méthode NSGA-II dans les figures II.4 (a, b, c).

	Vc (m/min)	F (mm/tr)	ap (mm)	Prr max (pièce/min)	Cr min (\$/pièce)
n=2	148	0.36	2.5	0.075	154.99
n=3	140	0.57	1.67	0.071	164.02
n=4	128	0.75	1.25	0.066	174

Conclusion

Les algorithmes génétiques (AG's) semblent être une solution intéressante pour résoudre le problème d'optimisation multi-objectifs. Ce chapitre montre les principes et l'intérêt des AG's à la recherche du Pareto optimale pour un problème d'optimisation multi-objectifs.

La qualité des solutions obtenues laisse entrevoir de réelles possibilités d'application industrielle pour l'optimisation multi-objectif des opérations de tournage multi-passes de produits à forte valeur ajoutée, et la détermination du « Couple Outil-Matière » optimal. Les performances du modèle proposé demeurent perfectibles au niveau notamment de la précision et la rapidité de l'algorithme génétique lui-même par un choix plus affiné des paramètres de départ, par une parallélisations des calculs lors de l'évaluation des fonctions objectifs et des contraintes d'usinage pour chaque individu, et par une prise en compte d'autres contraintes d'usinage liées à l'interaction « Matière Outil-Machine », basées sur des modèles géométriques plus fiables par la méthode Algorithme génétique de tri non-dominé NSGA-II.

Après la discussion et la comparaison des figures II.4 (a ; b ; c) le modèle nous a permis d'obtenir dans La figure (II.4.a) une bonne existence d'un espace faisable pour deux passes de coupe ($n=2$) et d'une solution possible au problème classique contrairement aux solutions trouvées dans les figures II.4 (b ; c).

Notre travail a été consisté sur optimisation des conditions de coupe en tournage par un algorithme génétique afin d'établir les solutions classiques générées par l'algorithme NSGA-II pour le problème d'optimisation multi-objectif en tournage d'ébauche multi-passes .

Le premier chapitre (la partie technologique) nous a met en évidence l'importance des procédés de fabrication dans l'industrie mécanique et connaitre mieux les termes de tournage de matériaux en particulier les matériaux fragiles (leurs caractéristiques, avantages, applications, leurs mis en forme), en suite une description des paramètres de coupe (profondeur de passe, l'avance, vitesse de rotation) et les outils et leurs géométries, et à la fin des notions sur les alliages et leurs désignations ainsi que le domaine d'utilisation.

Le Deuxième chapitre nous avons étudié l'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine d'optimisation mono et multi-objectif qu'est les algorithmes génétiques. D'abord nous avons présenté les AG,s dans leur forme la plus simple afin de donner une idée générale sur la méthode, puis on a entamé le sujet de l'optimisation multi-objectif où on a donné la description mathématique d'un problème d'optimisation multi-objectif. Dans la partie principale de notre travail, on a décrit d'une manière détaillé l'algorithme génétique NSGAI et les différents facteurs influents sur le déroulement et les résultats d'un procédé de tournage afin de choisir un modèle d'optimisation des conditions de coupe en minimisant le coût et le temps de production simultanément. En étudiant les approches élaborées pour le traitement des problèmes d'optimisation multicritère et nous avons fait la comparaison des résultats trouvés par NSGA-II dans les trois solutions trouvé, nous résolvons que la première solution pour deux passes de coupe ($n=2$) est plus efficace par rapport aux autres solutions avec un effort et un coût réduit.

Nous pouvons constater que la méthode évolutionnaire a apporté une nette amélioration à la résolution des problèmes d'optimisation multicritère des conditions de coupe.

En général, nous pouvons dire que malgré les études effectuées dans le domaine des AG,s ce domaine reste très vaste pour des nouvelles recherches.

Références Bibliographiques

- [1] **J.Vergnas** : « Usinage Technologie et Pratique, Génie Mécanique », Dunod. 1982.
- [2] **Michael F.Ashby, David R. H. Jones, Matériaux 1**. Propriétés et applications, éd. Dunod, chap. 3 « Les constantes d'élasticité » p 28. (2000-2001)
- [3] **G. Levallant et al** : « Usinage par enlèvement de copeaux », Groupe Eyrolles, 2005.
- [4] **XAVIER SOLDANI** : « modélisation analytique de l'usinage a grande vitesse et étude de l'usure en cratère – application au tournage », Thèse de doctorat en mécanique, L'université Paul Verlaine – Metz 2008.
- [5] **B. HAMADI** : « étude des revêtements durs et applications sur outil de coupe », thèse de magister en mécanique, université Mentouri Constantine, 2010.
- [6] **A. Berro** : « optimisation multi-objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique », thèse de doctorat université Toulouse, décembre 2001.
- [7] **B. Ould Med lamine** : « notes de cours de production mécanique », institut supérieur d'enseignement technologique de Rosso ,2009.
- [8] **P. CHRISTAN** : « comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec finition », Ecole centrale de Lyon, 2003.
- [9]. **ESHETE, Z.**, In process machine tool vibration cancellation using electrostrictive actuators, in Mechanical Engineering. 1996, University of Maryland. p. 244.
- [10]. **LE CALVEZ, C.**, Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone, in Mécanique et Matériau. 1995, ENSAM Paris. p. 232.
- [11]. **KUZNETOSOV, V.D.**, Metal Transfer and Build-up in Friction and Cutting. E.H Freitag ed. 1966, Oxford: Pergamon Press Ltd.
- [12]. **THOMAS, M. and Y. BEAUCHAMP**, Statistical investigation of modal parameters of cutting tool in dry turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003. **43**(2003): p. 1093-1106.
- [13]. **M'SAOUBI, R.**, Aspect thermiques et micro structuraux de la coupe. Application à la coupe orthogonale des aciers austénitiques., in Mécanique et Matériaux. 1998, ENSAM Paris: Paris. p. 135.
- [14]. **GEISKOPF, F., Y. LANDON, and E. DUC**, Modélisation de la coupe en Usinage à Grande Vitesse., in Usinage à grande vitesse. 1999: ENS Cachan, LURPA.
- [15]. **WIERCIGROCH, M. and E. BUDAK**, Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting. Philosophical Transactions : Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001. **359**(1781): p. 663-693.
- [16]. **WIERCIGROCH, M. and M. KRIVTSOV**, Frictional chatter in orthogonal metal cutting. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001. **359**(1781): p. 713-738.
- [17]. **ALBRECHT, P.**, New Developments in the Theory of Metal-Cutting Process, Part1: The Ploughing Process in Metal Cutting. ASME Journal of Engineering for Industry, 1960: p. 348-358.
- [18]. **COOK, N.H.**, Manufacturing Analysis. 1966, Reading, MA: Addison Wesley Publishing Co.
- [19]. **BAILEY, J.A.**, Friction in Metal Machining - Mechanical Aspects. Wear, 1975.**31**: p. 243-275.
- [20]. **PEIGNE, G.**, Etude et simulation des effets dynamiques de la coupe sur la stabilité et la qualité géométrique de la surface usinée: application au fraisage de profil, in Mécanique Energetique. 2003, INPG: Grenoble. p. 161.
- [21]. **BOOTHROYD, G.**, Effect of the surface slope on shear angle in metal cutting. ASME Journal of Engineering for Industry, 1970: p. 115-118.

- [22]. **SEGRETI, M.**, Vibrations en coupe orthogonale. Modélisation, étude de stabilité et validation expérimentale, in Sciences de l'ingénieur. 2002, Université de Metz: Metz. p. 173.
- [23]. **KOVACIC, I.**, The chatter vibrations in metal cutting - Theoretical approach., in The scientific journal FACTA UNIVERSITATIS. 1998: Novi Sad, Yugoslavia. p.581-593.
- [24]. **TLUSTY, J. and M. POLACEK.** The stability of the machine tools against selfexcited vibration in machining. in Proceedings of the international research in production engineering conference, 1963. 1963. Pittsburgh.
- [25]. **TLUSTY, J.** Dynamics high speed milling. in Symposium on high speed machining, winter annual meeting, Dec 1984. 1984. New Orleans.
- [26]. **PRUVOST, F.**, Les broches, Etude dynamique, in Conception et Calcul des Machines Outils, P.P.U. Romandes, Editor. 1995. p. 115-170.
- [27]. **DUPONT, D** : «Usinage Haute Vitesse», septembre 2007 ; disponible sur : <http://membres.lycos.fr/donalddupont/>.
- [28] **Yann Collette, Patrick Sairry** : « optimisation multi-objectif », Groupe Eyrolles, 2002.
- [29] **P. Michel** : « optimisation et programmation mathématique », Ecole Nationale supérieure de physique de Strasbourg, cours intégré 20h.
- [30] **R. yonnes** : « optimisation non linéaire avec contraintes égalités », cour master de mécanique, université Liban, 2005
- [31] **S. Mottelet** : «optimisation non-linéaire », université de technologie de Compiègne, printemps 2003.
- [32] **M. SAHALI Mohand Akli**, « Algorithme génétique de tri non-dominé probabiliste P-NSGA-II », thèse doctorat, Université M'hamed Bougara – Boumerdes, 2016.
- [33] **Lamia Benameur** «Optimisation par algorithme génétique», Université Mohamed V Agdal Rabat Maroc, 2010.

Résumé

Nous présentons un modèle basé sur les algorithmes génétiques et le Front de Pareto pour l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe appliquée au chariotage, avec prise en compte des aspects économiques (coûts et temps d'usinage) et des contraintes d'usinage (limitations liées au triplet « Matière-Outil-Machine ») sans restriction sur leur nombre et sur la complexité de leurs couplages. Les tests de validation effectués par l'algorithme génétique NSGA-II implémenté dans Matlab ont permis de déterminer un ensemble de solutions optimisées des grandeurs de coupe (vitesse de coupe et avance de l'outil) pour une profondeur de passe imposée, réalisant simultanément un usinage à moindre coût pour un temps de coupe minimal.

Mot clé : Optimisation multi-objectif, conditions de coupe, algorithmes génétiques, front de Pareto.

Abstract

We present a model based on genetic algorithms and the Pareto Front for the multi-objective optimization of cutting parameters applied to stock removal, taking into account economic aspects (costs and machining time) and machining constraints. (limitations linked to the “Material-Tool-Machine” triplet) without restriction on their number and on the complexity of their couplings. The validation tests carried out by the genetic algorithm NSGA-II implemented in Matlab made it possible to determine a set of solutions optimized for cutting quantities (cutting speed and tool feed) for an imposed depth of cut, simultaneously achieving a low-cost machining for minimal cutting time.

Keyword : Multi-objective optimization, cutting conditions, genetic algorithms, Pareto front.