



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE



DEPARTEMENT DE MECANIQUE
Domaine : Génie Mécanique
Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Mémoire de Master Thème :

**Optimisation des conditions de coupe d'un acier
30CrMnSiA**

Réalisé par :

Zemieche Hamza
Aoula Oussama

Encadré par :

Promoteur: Dr. Madani Fateh
Co-promoteur: Zedam Lokman

Année universitaire : 2023/2024

ملخص

في هذه الدراسة، نقدم نموذجاً يعتمد على الخوارزميات الجينية لتحسين معلمات القطع في سياق الطحن على الفولاذ 30 CrMnSi. يأخذ هذا التحسين في الاعتبار الجوانب التكنولوجية والاقتصادية لعملية التصنيع مثل وقت التصنيع والجهد وقوة القطع، بالإضافة إلى حالة سطح القطع. أجريت اختبارات التحقق باستخدام الخوارزمية الجينية المنفذة على MATLAB لتحديد الظروف المثالية (سرعات القطع، والتغذية لكل سن، وأعماق القطع) لتقليل الوقت الإجمالي للتصنيع، من خلال ضبط الزيادة في القطع لكل تطبيق. هذه المنهجية للتحسين سهلت اختيار جميع المعلومات الضرورية لإنشاء برنامج التصنيع في تنفيذ واحد.

الكلمات المفتاحية: تصنيع، طحن، تحسين، خوارزميات جينية، شروط القطع

ABSTRACT

In this study, we present a model that relies on genetic algorithms to optimize cutting parameters in the context of milling on 30CrMnSiA steel. This optimization takes into account the techno-economic aspects of machining such as manufacturing time, efforts, and cutting power, as well as the surface state of the machined parts. Validation tests performed with the genetic algorithm implemented on MATLAB identified the ideal cutting conditions (cutting speeds, feed per tooth, and depths of cut) to minimize the total manufacturing time, by adjusting the machining allowance for each application. This optimization methodology facilitated the selection of all necessary information for generating the machining program in a single execution.

Key words: Machining, Milling, Optimization, Genetic Algorithms, Cutting Conditions.

RESUME

Dans cette étude, nous présentons un modèle qui repose sur des algorithmes génétiques pour optimiser les paramètres de coupe dans le cadre du fraisage sur acier 30CrMnSiA. Cette optimisation prend en compte les aspects techno-économiques de l'usinage tels que le temps de production, les efforts et la puissance de coupe, ainsi que l'état de surface des pièces usinées. Les tests de validation réalisés avec l'algorithme génétique implémenté sur MATLAB ont permis d'identifier les conditions de coupe idéales (vitesses de coupe, avances par dent et profondeurs de passe) pour minimiser le temps total de production, en ajustant la surépaisseur d'usinage à chaque application. Cette méthodologie d'optimisation a facilité la sélection de toutes les informations nécessaires pour la génération du programme d'usinage en une seule exécution.

Mots clés: Usinage, Fraisage, Optimisation, Algorithmes génétiques, Conditions de coupe.

Remerciement

Nous remercions en premier lieu ALLAH le tout Puissant qui nous a inspiré le courage, la force et la santé pour réaliser ce cursus et au final ce modeste travail.

Nous remercions en deuxième lieu notre directeur de recherche Mr MADANI Fateh pour la confiance qu'il nous a accordé en proposant ce thème de recherche, mais surtout pour son accompagnement, soutien, écoute et disponibilité, et pour la façon dont la quelle il nous a guidé pendant la réalisation de notre travail.

Nous tenons à gratifier aussi les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre projet en acceptant d'examiner notre travail.

Ainsi nous tenons à remercier tout l'ensemble des enseignants pour ce qu'ils ont apporté à notre carrière d'étudiants universitaire pendant 5 ans.

Dédicace

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
Tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur
soutien moral.*

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,

*A toute la famille AOULÀ et ZEMIECHÉ pour leur soutien tout au
long de mon parcours universitaire,*

A Tout mes proches et mes chers amis et collègues

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le
fruit de votre soutien infailible,*

Merci d'être toujours là pour nous.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE 15

CHAPITRE I GENERALITE SUR LES PROCEDES DE FRAISAGE

1. Introduction : 18

2. Définition d'usinage: 18

3. But de l'usinage: 18

4. Procédé de fraisage : 18

4.1. Définition : 18

4.2. Types de fraisage : 19

4.3. Caractéristiques des fraises (Outils) : 20

4.4. Les plaquettes de fraisage : 23

4.5. Les matériaux utilisés dans les outils coupants : 25

4.6. Principaux groupes de matériaux et lettres d'identification 27

5. La machine fraiseuse : 28

5.1. Fraiseuse universelle : 28

5.2. Fraiseuse verticale : 28

5.3. Fraiseuse horizontale : 29

5.4. Fraiseuse universelle d'outillage : 30

5.5. Fraiseuse avec coulisseau : 31

5.6. Fraiseuse 3 axes : 31

5.7. Fraiseuse 4 axes : 31

5.8. Fraiseuse 5 axes : 32

5.9. Machine-Outil à Commande Numérique (M.O.C.N): 32

6. Opérations de fraisage : 33

6.1. Le surfaçage : 33

6.2. L'épaulement : 34

TABLE DES MATIERES

6.3. Le profilage :	34
6.4. Le rainurage :	35
6.5. L'usinage de poches :	35
6.6. Chanfreinage :	36
7. Conditions de coupe en fraisage :	36
7.1. La vitesse V_c et N :	37
7.2. L'avance V_f et f :	38
7.3. La profondeur de coupe a_p et a_e :	39
8. Paramètres technologiques :	40
8.1. Débit de copeaux Q :	40
8.2. La rugosité de surface :	40
8.3. L'effort de coupe FC :	41
8.4. Puissance nécessaire à la coupe :	42
8.5. Temps technologique pour le fraisage en roulant :	42
8.6. Temps technologique pour le fraisage en bout :	43
9. Conclusion :	43

CHAPITRE II METHODE D'OPTIMISATION

1. Introduction :	45
2. Définition :	45
3. Classifications des problèmes d'optimisation :	45
3.1. Variables de problème :	45
3.2. Espace de recherche :	46
3.3. Fonction objectif et fonction d'adaptation :	46
3.4. Les problèmes d'optimisation avec et sans contrainte :	48
3.5. Problèmes linéaires ou non-linéaires :	48
4. Méthodes d'optimisation :	48
4.1. Les méthodes déterministes :	49
4.2. Méthodes stochastiques :	51

TABLE DES MATIERES

5. Critère d'optimisation lors de fraisage :.....	53
5.1. Le temps de fabrication :.....	53
5.2. La durée de vie d'outil :	54
5.3. Le coût de l'usinage :	55
6. Conclusion :.....	56

CHAPITRE III OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE PAR ALGORITHME

GENETIQUE

1. Introduction :.....	58
2. Optimisation par algorithme génétique :.....	58
3. Modélisation du problème :.....	58
3.1. Variables d'optimisations :.....	58
3.2. Formulation de fonctions objectives :	58
4. Exemple d'application :	61
4.1. Présentation de l'acier 30CrMnSiA :	61
4.2. Machine-outil utilisé :	62
4.3. Logiciel CAO/FAO utilisé :	63
4.4. Les outils utilisés :.....	63
5. Les paramètres de fraisage dans l'exemple d'expérience :.....	64
6. Minimisation de temps de production :.....	65
6.1. Résultats et discussion :.....	66
7. Application pratique :.....	68
7.1. Les valeurs des résultats sur Matlab :.....	70
7.2. Influence de vitesse de coupe sur l'état de surface :	71
8. Conclusion :.....	72
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	74
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I- 1 : Principaux groupes et lettres d'identification des matériaux	27
Tableau III- 1 : Composition chimique de l'acier 30crmsia	61
Tableau III- 2 : Propriétés mécaniques de l'acier 30crmsia	61
Tableau III- 3 : Caractéristiques de la machine.	62
Tableau III- 4 : Les paramètres de l'application.	65
Tableau III- 5 : Temps de production pour h=2	66
Tableau III- 6 : Temps de production pour h=6	67
Tableau III- 7 : Temps de production pour h=12	67
Tableau III- 8 : Temps de production pour h=20	67
Tableau III- 9 : Résultats de l'expérience sur Matlab.....	70
Tableau III- 10 : les valeurs réel de Ra.	71

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1: Images de fraisage	19
Figure I- 2 : Images real de fraisage.....	19
Figure I- 3 : Fraise en bout vertical et bout horizontal.....	19
Figure I- 4 : Fraisage en opposition et concordance	20
Figure I- 5 : Les tailles des fraises.....	21
Figure I- 6 : Les formes des fraises	21
Figure I- 7 : Les types des dentures.....	22
Figure I- 8 : Mode de fixation.	22
Figure I- 9 : Désignation ISO pour plaquettes des fraises.....	24
Figure I- 10 : Désignation ISO pour plaquettes des fraises.	25
Figure I- 11 : Fraiseuse universelle	28
Figure I- 12 : Fraiseuse verticale.....	29
Figure I- 13 : Fraiseuse horizontale	29
Figure I- 14 : Composition (fraiseuse universelle d'outillage.....	30
Figure I- 15 : Fraiseuse avec coulisseau	31
Figure I- 16 : Exemple des axes de fraiseuse.	32
Figure I- 17 : Fraiseuse CNC.	33
Figure I- 18 : Fraises pour applications générale	33
Figure I- 19 : Réalisation d'un épaulement	34
Figure I- 20 : Le fraisage de profil : ligne droites (gauche) et lignes courbes (droite)	34
Figure I- 21: Le fraisage des profils particuliers	35
Figure I- 22 : Rainurage droit et de forme.	35
Figure I- 23 : Le fraisage des poches	36
Figure I- 24 : Fraisage des chanfreins	36
Figure I- 25 : Vitesse de coupe.....	37
Figure I- 26 : Vitesse de broche.	38
Figure I- 27 : Les différentes avances.	39
Figure I- 28 : Coupe axiale et radiale.....	39
Figure I- 29 : Critères de rugosité	40
Figure I- 30 : La force de coupe (tangentielle F , radiale F_{cn} et axiale F_p)	42
Figure I- 31 : Calcul du T_t en fraisage (en roulant).	42

Figure I- 32 : Calcul du T_t en fraisage (en bout).....	43
Figure II- 1 : Coût par pièce en fonction de vitesse de coupe V_c	56
Figure III- 1 : fraiseuse CNC verticale V1000.....	62
Figure III- 2 : Interface de logiciel NX.....	63
Figure III- 3 : Outil de coupe en carbure.....	63
Figure III- 4 : Rugosimetre.....	64
Figure III- 5 : Exemple d'application sur MATLAB.....	66
Figure III- 6 : Vitesse de coupe Walter.....	68
Figure III- 7 : La simulation de l'opération.....	69
Figure III- 8 : La pièce brute.....	69
Figure III- 9 : Montage pièce étau.....	69
Figure III- 10 : La surface usinée.....	69
Figure III- 11 : Variation de R_a en fonction de la vitesse de coupe V_c théorique.....	70
Figure III- 12 : Variation de R_a en fonction de la vitesse de coupe V_c pratique.....	71

LISTE DES SYMBOLS

ap : Profondeur de passe (*mm*).

ae : profondeur de passe radial.

h: Largeur de coupe (*mm*).

D : Diamètre de l'outil de fraisage (*mm*).

Fc : La force de coupe tangentielle ().

f : Avance par tour (*mm/tr*).

Vf : Avance par minute (*mm/min*).

fz : Avance par dent (*mm/dent*).

L : Longueur de la pièce (*mm*).

N : Vitesse de broche (*tr/min*).

Pc : La puissance nécessaire (*w*).

Pm: La puissance la machine (*kw*).

Ra : Rugosité moyen (*μm*).

r: Rayon de bec de la fraise (*mm*).

Tp: Temps de production (*min*).

Tt: temps réel de coupe (*min*).

Tp : temps de fabrication.

Ts: temps improductif sur le poste (*min*).

Tc: temps de changement d'une arête de coupe (*min*).

p : nombre de pièces entre deux changements d'outil (d'arête)

T : durée de vie de l'outil

VC: Vitesse de coupe (*m/min*).

Z : Nombre d'arêtes de l'outil.

η : Rendement de la machine.

K : c'est un coefficient classique pour calculer la profondeur de passe.

Q : débit de coupeaux.

Ks: La pression de coupe spécifique (*N/mm²*).

Cc : coût de coupe par pièce.

Ci : coût improductif par pièce.

LISTE DES ACRONYMES

Cm : coût machine par pièce.

Cs : coût outil par pièce.

Ccs: coût de changement d'outil (d'arête) par pièce.

Cf: coût fixe par pièce.

INTRODUCTION GENERALE

L'usinage par enlèvement de matière est une méthode fondamentale dans la fabrication industrielle. Elle consiste à retirer du matériau d'une pièce à l'aide d'un outil de coupe, générant ainsi des copeaux qui sont séparés de la pièce à l'aide du même outil. Les machines-outils, utilisées par les opérateurs, sont cruciales pour exécuter ces opérations. Ces techniques d'usinage, anciennes de plusieurs siècles, sont le fruit d'une évolution depuis les méthodes manuelles. Parmi les procédés traditionnels figurent le tournage, le fraisage et le perçage.

Dans le domaine de l'ingénierie, l'amélioration de la productivité est une préoccupation constante. Les ingénieurs sont confrontés à des défis qui entravent leurs efforts pour optimiser les processus de production. Notre étude se concentre spécifiquement sur l'optimisation des conditions de coupe lors du fraisage, l'un des défis majeurs rencontrés. De nombreux paramètres, tels que les paramètres de coupe et la géométrie de l'outil, jouent un rôle crucial dans la productivité des équipements de production. Ils affectent divers aspects tels que les résultats de surface, la consommation d'énergie, le temps de production et les forces de coupe générées.

Notre travail consiste à mener une étude expérimentale de l'usinage de l'acier 30crmn5 avec un outil de coupe à l'objectif d'amélioration des qualités des pièces fabriquées par la sélection optimale des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe) en fraisage. Le critère d'optimisation considéré, dans cette étude, est le temps total de production qui constitue l'élément économique de base. L'optimisation est faite en prenant en compte les limites liées au système machine-outil-pièce.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique qui concerne le processus d'usinage par fraisage. Il définit les conditions de coupe ainsi que les paramètres techno-économiques liés à ce procédé.

Dans le deuxième chapitre, consacré à l'introduction des notions de bases de l'optimisation. Il propose la méthodologie générale suivie pour la résolution des problèmes d'optimisation des conditions de coupe.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une application des techniques d'optimisation par l'algorithme génétique à un problème de sélection par des conditions de coupe pour une

INTRODUCTION GENERALE

opération de fraisage sur acier 30CrMnSiA. Le but est de déterminer des conditions de coupe minimisant le temps total de fabrication en respectant les limites liées à la machine, à l'outil et à la géométrie de la pièce.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES PROCEDES

DE FRAISAGE

1. Introduction :

Ce chapitre traite de l'usinage par enlèvement de matière en donnant une description détaillée du fraisage, l'un des procédés d'usinage les plus couramment employés dans le secteur industriel. Nous examinerons les bases du fraisage, y compris les types de fraiseuses, les outils de coupe et les paramètres de coupe et les paramètres technologiques.

2. Définition d'usinage:

L'usinage par enlèvement de matière est un processus essentiel de fabrication qui consiste à découper ou enlever de la matière d'une pièce à l'aide d'un outil de coupe distinct de la pièce elle-même. Cette technique, utilisée depuis des siècles, englobe différentes méthodes telles que le tournage, le fraisage, le perçage et le sciage. Ses nombreux avantages incluent une grande précision, la préservation des propriétés du matériau, la polyvalence et la rentabilité par rapport à d'autres méthodes comme le formage. Des opérations variées comme le tournage, le fraisage, le rabotage, le meulage, le perçage et le sciage sont toutes cruciales dans ce processus, chacune ayant des objectifs spécifiques dans la mise en forme des pièces. L'usinage joue un rôle crucial dans les industries manufacturières, permettant la création de pièces complexes avec une précision élevée et des géométries spécifiques.

3. But de l'usinage:

Les différentes techniques d'usinage visent à fabriquer une pièce en retirant de la matière à l'aide d'une machine-outil. Leur objectif est d'obtenir une pièce finale précise, en déterminant ses dimensions, sa géométrie et l'état de surface des surfaces usinées. Chaque étape de la fabrication suit un processus spécifique.

4. Procédé de fraisage :

4.1. Définition :

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

Mouvement de rotation de la fraise qui est entraîné par la broche de la machine, **Mc** (mouvement rapide circulaire de coupe).

Mouvement de translation de la pièce qui est fixée sur la table de la machine, M_a (mouvement lent rectiligne uniforme d'avance). Le mouvement de translation est orienté de façon à pousser la pièce contre la fraise suivant une direction généralement perpendiculaire par rapport à son axe. Le fraisage permet la réalisation de pièces : prismatiques, de révolution intérieure et extérieure, de profils spéciaux, hélices, cames, engrenages...etc. [1]

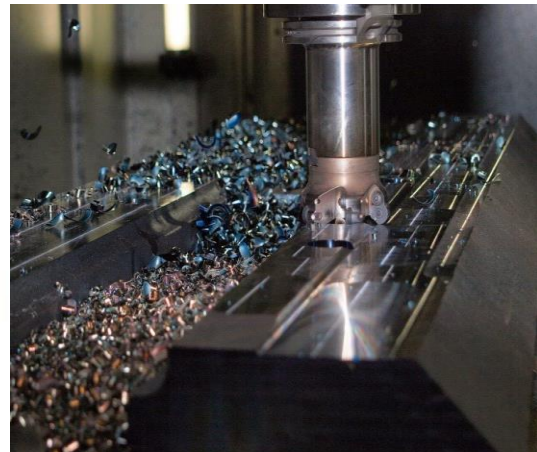
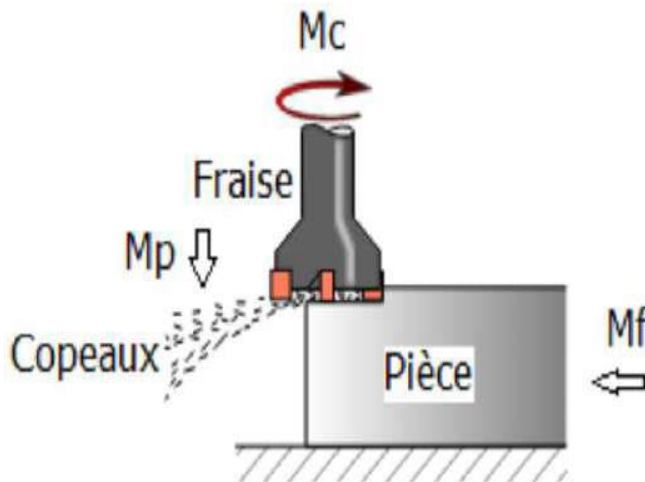


Figure I- 1: Images de fraisage [2].

Figure I- 2 : Images real de fraisage.

4.2. Types de fraisage :

A- Le fraisage de face ou en bout :

-l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface usinée.

-l'axe de la fraise est parallèle à la surface usinée [3].

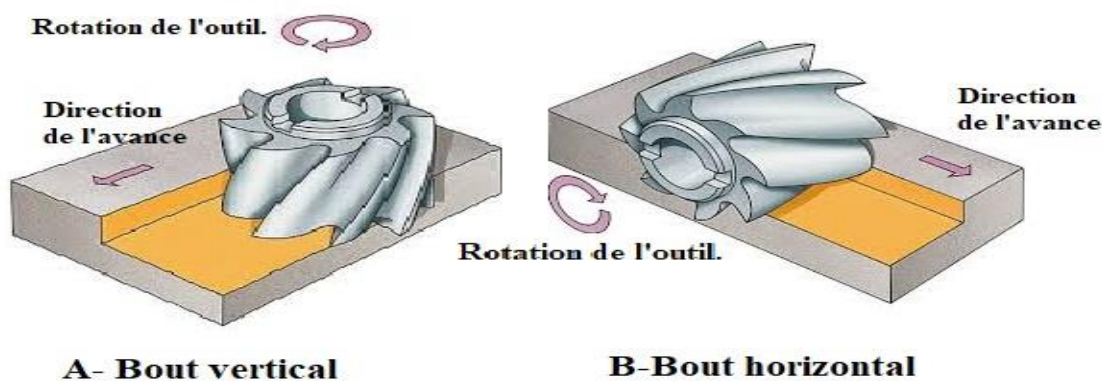


Figure I- 3 : Fraisage en bout vertical et bout horizontal [4].

B- Fraisage en opposition et en concordance :

- Dans le fraisage en opposition, la direction de l'avance est contraire au sens de rotation de l'outil. L'épaisseur des copeaux commence à zéro et augmente à mesure que la coupe progresse. Les forces de coupe tendent à éloigner la fraise de la pièce.
- Les fortes contraintes de traction sur l'arête lors de sa sortie de la matière entraînent souvent sa rupture.
- Dans le fraisage en concordance, l'outil avance dans le même sens que sa rotation.
- Le fraisage en concordance doit toujours être privilégié si la machine-outil, le bridage et la pièce le permettent.
- Lors du contournage en concordance, les copeaux sont plus épais à l'entrée qu'à la sortie, empêchant ainsi l'arête de frotter contre la surface et de brunir avant de s'engager en coupe.

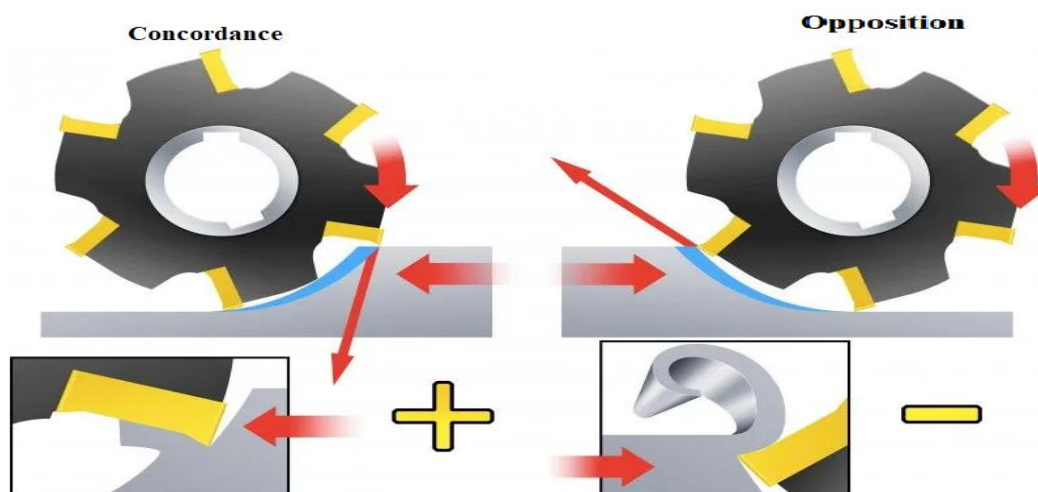


Figure I- 4 : Fraisage en opposition et concordance [5].

4.3. Caractéristiques des fraises (Outils) :

- **La taille :**

Suivant le nombre d'arêtes tranchantes par dent, on distingue les fraises :

- une taille.
- deux tailles.
- Trois tailles.

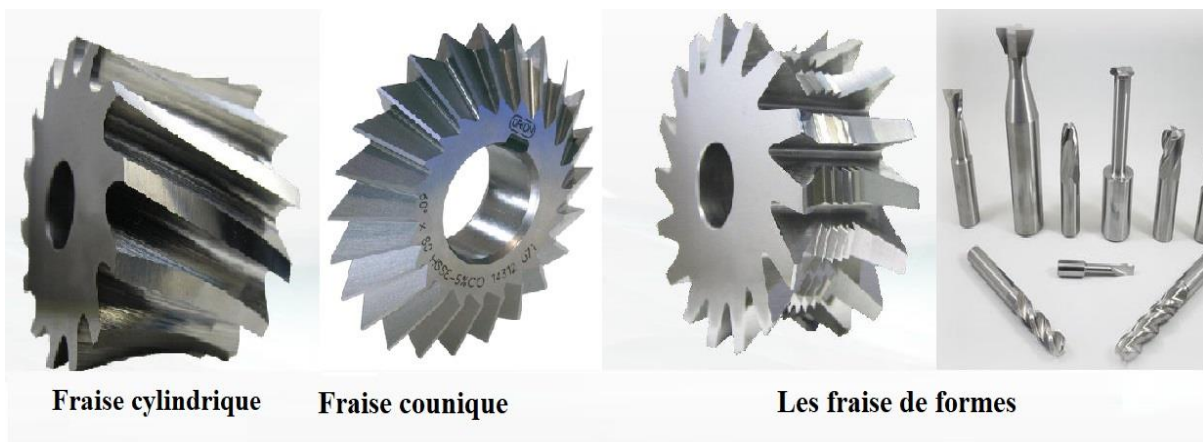


Figure I- 5 : Les tailles des fraises.

- **La forme :**

Suivant le profil des génératrices par rapport à l'axe de l'outil, on distingue :

- Les fraises cylindriques,
- Les fraises Coniques
- Les fraises de formes.



Fraise cylindrique

Fraise conique

Les fraise de formes

Figure I- 6 : Les formes des fraises [6].

- **La denture :**

Suivant le sens d'inclinaison des arêtes tranchantes par rapport à l'axe de la fraise, on distingue :

- les dentures hélicoïdales à droite
- les dentures hélicoïdales à gauche
- les dentures à double hélice alternée.



Figure I- 7 : Les types des dentures.

Si l'arête tranchante est parallèle à l'axe de la fraise, la denture est droite. Une fraise est également caractérisée par son nombre de dents. [7]

- **Les dimensions :**

- Pour une fraise deux tailles : diamètre et hauteur taillée.
- Pour une fraise trois tailles : diamètre de l'outil, épaisseur, diamètre de l'alésage.
- Pour une fraise conique pour queue d'aronde : l'angle, le diamètre de l'outil et L'épaisseur. [7]

- **Le mode de fixation :**

On distingue deux modes de fixation distincts :

- A trou lisse ou taraudé;
- à queue cylindrique ou conique. [7]



Figure I- 8 : Mode de fixation.

4.4. Les plaquettes de fraisage :

Les plaquettes de fraisage en carbure sont un outil d'usinage couramment utilisé dans l'industrie pour la fabrication de pièces en métal. Elles offrent plusieurs avantages par rapport aux autres outils de coupe:

- Si une arête de coupe est usée, la plaquette peut simplement être tournée sur une arête inutilisée, évitant ainsi une rectification fastidieuse.
- Elles sont disponibles en de nombreuses formes et tailles, permettant de s'adapter aux différentes applications.
- Une plaquette plus grande offre une stabilité accrue, idéale pour l'usinage lourd (taille généralement supérieure à 25mm). [35]

4.4.1. Le choix de la plaquette :

Le choix de la plaquette dépend du mode de production, du matériau à usiner et de sa dureté. Les plaquettes sont définies par des normes ISO indiquant leur taille, forme, fixation, matériau et revêtement.

Le système de désignation ISO pour plaquettes (ISO 1832) est un système normalisé pour nommer une plaquette. Le système est conçu de sorte que chaque caractéristique et dimension importante de la plaquette soit affichée à l'aide d'un système de code. Il devient le nom de la plaquette.

Ce système présente plusieurs avantages :

- Dénomination unique d'une plaquette (indépendante du fournisseur).
- Toutes les caractéristiques et dimensions importantes sont clairement indiquées dans le nom.
- Certaines positions du code se rapportent au "porte-plaquette" dans lequel la plaquette peut être montée.

Il est important de se rappeler que le système de désignation ISO n'est pas un système qui normalise la qualité de la plaquette. Ni la nuance de carbure ni la géométrie de coupe ne sont standardisées dans ce système de désignation. [36]

S	E	M	X	12	04	AF	T	N	-	ME12
1	2	3	4	5	6	7	8	9		10

1. Insert shape

X=Special shapes Z=Special shapes

2. Insert side clearance angle

O = Special

3. Tolerances

Tolerance class	Tolerances: +/- mm/in				For IC, dimension in mm/in														
					0,125	3,175*	3,969	4,064	4,760	6,350	9,525	12,700	15,875	19,050	20,000	25,400	31,750	38,100	
	S mm	IC mm	S Inch	IC Inch															
A	0,025	0,025	0,0010	0,0010	*														
C	0,025	0,025	0,0010	0,0010	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E	0,025	0,025	0,0010	0,0010	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F	0,025	0,013	0,0010	0,0005	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
G	0,050*	0,025	0,0020	0,0010	*				*	*									
	0,130	0,025	0,0051	0,0010					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
H	0,025	0,013	0,0010	0,0005	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
J	0,025	0,050	0,0010	0,0020	*				*	*	*								
	0,025	0,080	0,0010	0,0031					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,025	0,100	0,0010	0,0039					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,025	0,130	0,0010	0,0051					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,025	0,150	0,0010	0,0059					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
K	0,025	0,050	0,0010	0,0020	*				*	*	*								
	0,025	0,080	0,0010	0,0031					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,025	0,100	0,0010	0,0039					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,025	0,130	0,0010	0,0051					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,025	0,150	0,0010	0,0059					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
M	0,050*	0,050	0,0020	0,0020	*				*	*	*								
	0,130	0,050	0,0051	0,0020					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,130	0,080	0,0051	0,0031					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,130	0,100	0,0051	0,0039					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,130	0,130	0,0051	0,0051					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U	0,050*	0,080	0,0020	0,0031	*				*	*	*								
	0,130	0,080	0,0051	0,0031					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,130	0,130	0,0051	0,0051					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,130	0,180	0,0051	0,0071					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0,130	0,250	0,0051	0,0098					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

* Not ISO

Figure I- 9 : Désignation ISO pour plaquettes des fraises

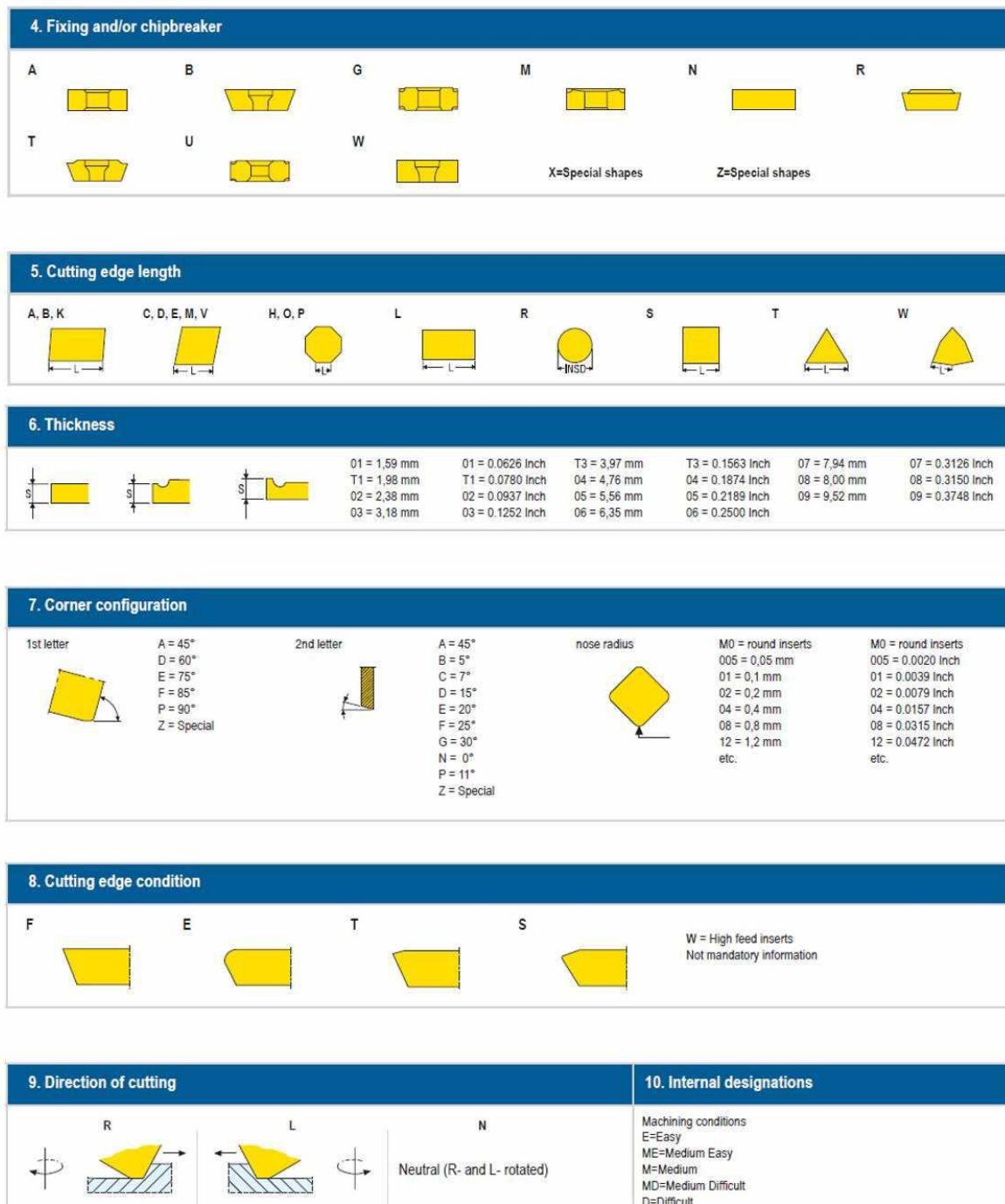


Figure I- 10 : Désignation ISO pour plaquettes des fraises.

4.5. LES matériaux utilisés dans les outils coupants :

- Les aciers rapides (HSS) :

Les aciers HSS (High Speed Steel), également appelés aciers rapides, sont des alliages spécialement élaborés pour l'usinage à grande vitesse. Ces aciers sont reconnus pour leur grande dureté et leur capacité à se déformer à des températures élevées, ce qui les rend

indispensables dans les industries contemporaines en raison de leur efficacité et de leur polyvalence.

- **Aciers au carbone :**

Les aciers au carbone, qui ont généralement une teneur en carbone de 0,8 à 1,05 %, sont une option abordable pour des travaux de coupe à faible vitesse. En particulier destinés aux opérations de finition, ils allient prix abordable et performance appropriée dans des conditions de coupe moins exigeantes.

- **Carbures métalliques :**

Ces matériaux, principalement composés de carbure de tungstène, présentent une grande dureté et une grande résistance à l'usure. Ils conviennent parfaitement aux processus d'usinage à grande vitesse, en particulier sur des matériaux durs tels que les aciers trempés et les fontes.

- **Céramiques :**

Les céramiques à base d'oxyde d'alumine sont très dures et très résistantes à l'usure à haute température. Elles sont particulièrement adaptées à l'usinage de métaux ferreux à des vitesses de coupe élevées, même si elles sont sensibles aux chocs.

- **Diamants industriels :**

Les diamants industriels, qui sont extrêmement résistants, sont employés pour la fabrication de métaux non ferreux et de certains matériaux non métalliques. Leur finition de surface est exceptionnelle, en particulier dans l'usinage de matériaux tels que l'aluminium ou le graphite.

- **Cermets :**

Les cermets, composés de titane et de liants tels que le nickel ou le cobalt, sont des produits de finition. La résistance à l'usure et la stabilité chimique exceptionnelles de ces produits sont particulièrement adaptées pour le tournage de finition des aciers inoxydables.

- **Nitrure de bore cubique (CBN) :**

Le CBN, considéré comme l'un des matériaux de coupe les plus résistants, est apprécié pour la finition de matériaux extrêmement durs tels que les aciers trempés. Il est indispensable pour les applications nécessitant une grande précision et une durée de vie élevée de l'outil en raison de sa grande dureté et de sa résistance à l'usure. [8]

4.6. Principaux groupes de matériaux et lettres d'identification

Les principaux groupes de matériaux et classe dans le tableau suivant :

Groupe de matériaux	Principaux groupes de matériaux et lettres d'identification		Dureté Brinell HB	Résistance à la traction R_m [N/mm ²]	Groupe d'usinage ¹	
P	Acier non allié	C ≤ 0,25 %	recuit	125	428	P1
		C > 0,25 ... ≤ 0,55 %	recuit	190	639	P2
		C > 0,25 ... ≤ 0,55 %	traité	210	708	P3
		C > 0,55 %	recuit	190	639	P4
		C > 0,55 %	traité	300	1013	P5
		acier de décolletage (à copeaux courts)	recuit	220	745	P6
	Acier faiblement allié	Recuit		175	591	P7
		Traité		300	1013	P8
		Traité		380	1282	P9
		Traité		430	1477	P10
Acier fortement allié et acier à outils fortement allié	Recuit		200	675	P11	
	trempé et revenu		300	1013	P12	
	trempé et revenu		400	1361	P13	
Acier inoxydable	ferritique / martensitique, recuit		200	675	P14	
	martensitique, traité		330	1114	P15	
M	Acier inoxydable	austénitique, trempé		200	675	M1
		austénitique, à durcissement par précipitation (PH)		300	1013	M2
		austénitique-ferritique, duplex		230	778	M3
K	Fonte malléable	Ferritique		200	675	K1
		Perlitique		260	867	K2
	Fonte grise	à faible résistance mécanique		180	602	K3
		à haute résistance mécanique / austénitique		245	825	K4
	Fonte à graphite sphéroïdal	Ferritique		155	518	K5
	Perlitique		265	885	K6	
	FGV (CGI)		200	675	K7	
N	Alliages d'aluminium de corroyage	non trempables		30	–	N1
		trempables, trempés		100	343	N2
	Alliages d'aluminium de fonderie	≤ 12 % Si, non trempables		75	260	N3
		≤ 12 % Si, trempables, trempés		90	314	N4
		> 12 % Si, non trempables		130	447	N5
	Alliages de magnésium		70	250	N6	
	Cuivre et alliages de cuivre (bronze / laiton)	non allié, cuivre électrolytique			100	343
laiton, bronze, laiton rouge			90	314	N8	
alliages de Cu à copeaux courts			110	382	N9	
à haute résistance, Ampco			300	1013	N10	
S	Alliages réfractaires	base Fe	recuits	200	675	S1
			trempés	280	943	S2
		base Ni ou Co	recuits	250	839	S3
			trempés	350	1177	S4
			moulés	320	1076	S5
	Alliages de titane	titane pur		200	675	S6
		alliages α et β trempés		375	1262	S7
Alliages de tungstène	alliages β		410	1396	S8	
Alliages de molybdène			300	1013	S9	
			300	1013	S10	
H	Acier trempé	trempé et revenu		50 HRC	–	H1
		trempé et revenu		55 HRC	–	H2
		trempé et revenu		60 HRC	–	H3
	Fonte trempée	trempée et revenue		55 HRC	–	H4
O	Matériaux thermoplastiques					O1
	Matériaux thermodurcissables					O2
	Plastique renforcé de fibres de verre	GFRP				O3
	Plastique renforcé de fibres de carbone	CFRP				O4
	Plastique renforcé de fibres d'aramide	AFRP				O5
	Graphite (technique)			80 Shore		O6

Tableau I- 1 : Principaux groupes et lettres d'identification des matériaux [37].

5. La machine fraiseuse :

Une fraiseuse est une machine-outil employée pour fabriquer toutes sortes de pièces mécaniques, à l'unité ou en série, en enlevant de la matière à partir de blocs ou parfois d'ébauches estampées ou moulées, à l'aide d'un outil coupant appelé fraise. Outre cet outil qui lui a donné son nom, une fraiseuse peut également être équipée des forets, des tarauds ou des alésoirs. [9]

5.1. Fraiseuse universelle :

La fraiseuse universelle est une machine utilisée principalement pour fabriquer des pièces prismatiques. La pièce est attachée à l'étau. Le moteur de la broche entraîne la rotation de l'outil, qui suit une trajectoire qui perturbe la pièce. L'outil est équipé d'une arête coupante, ce qui entraîne une élimination de matière appelée : les copeaux. [10].

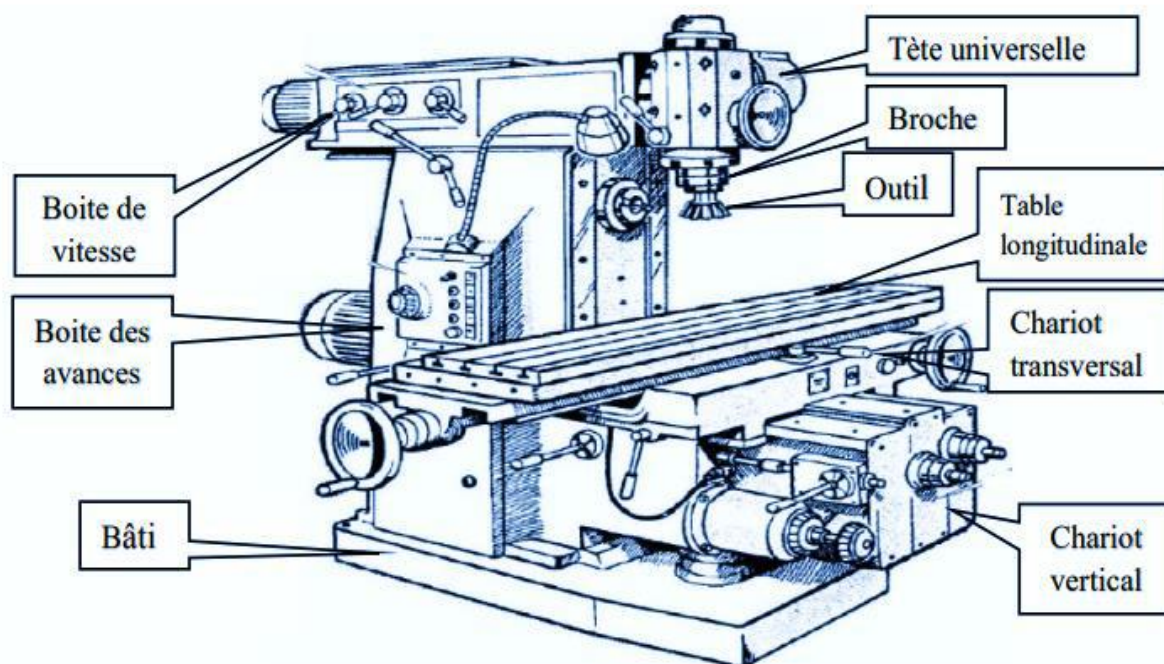


Figure I- 11 : Fraiseuse universelle [11].

5.2. Fraiseuse verticale :

La configuration courante des fraiseuses verticales comprend les outils de coupe être orienté verticalement et couper contre une pièce fixe en fonction des exigences de conception. L'axe de la broche est perpendiculaire à la table. [12]



Figure I- 12 : Fraiseuse verticale.

5.3. Fraiseuse horizontale :

La fraiseuse horizontale a une broche qui tourne en position horizontale, Ses outils de coupe sont souvent plus courts et plus épais que les fraises longues et fines utilisées dans les homologues verticaux. [12]

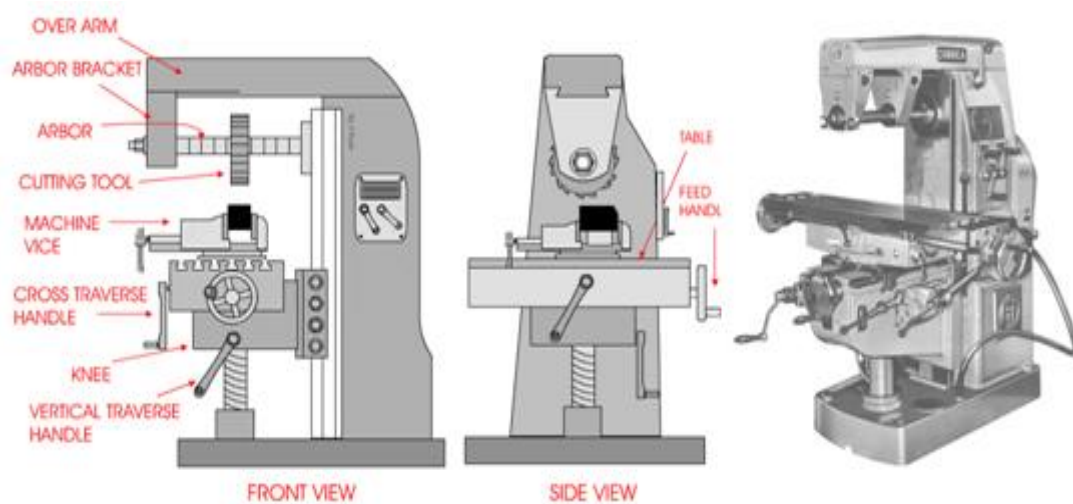
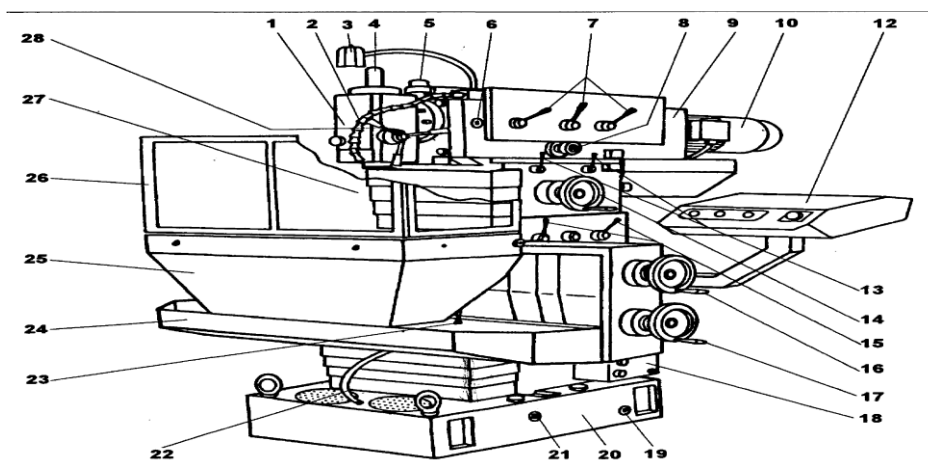


Figure I- 13 : Fraiseuse horizontale [12].

5.4. Fraiseuse universelle d'outillage :

Dans la majorité des cas, ses capacités sont assez limitées, c'est la plus générale de toutes. La machine de base est distinguée par l'absence de console et c'est en réalité la table qui a sa surface verticale. Cette table peut être équipée d'une table d'équerre ou d'une table universelle orientable dans deux plans. Un déplacement axial du fourreau est réalisé par la broche horizontale. On obtient le mouvement transversal par déplacement du coulisseau supérieur qui peut accueillir un grand nombre de têtes différentes : universelles, verticales, à pointer, à percer, etc. Son utilisation est limitée à la création de matrices, poinçons, moules, gabarits et prototypes. On l'équipe fréquemment de lecteurs optiques pour des déplacements extrêmement précis. [13].



REP ERE	DESIGNATION	REPE RE	DESIGNATION
1	Tête verticale de fraisage	15	Levier de réglage des avances
2	Flexible du liquide d'arrosage	16	Volant pour avance du chariot X
3	Eclairage	17	Volant pour avance du chariot Z
4	Vis pour serrage de l'outil verticalement	18	Pompe du lubrifiant de console
5	Dispositif de pivotement	19	Regard pour poupée et mécanisme des avances
6	Regard Circulation d'huile - Poupée	20	Socle de la machine
7	Leviers de commande de la vitesse de broche	21	Regard Huile de fuite
8	Bouton-poussoir pour serrage de l'outil (horizontal.)	22	Flexible de retour agent d'arrosage
9	Poupée avec broche horizontale de fraisage	23	Levier de blocage pour chariot X
10	Moteur d'entraînement	24	Bac à copeaux
11	Filtre de l'huile	25	Capot de protection contre les copeaux
12	Pupitre de commande	26	Protection circulaire
13	Levier de blocage du chariot Y	27	Armoire de commande
14	Volant pour avance du chariot Y	28	Levier d'avance du fourreau

Figure I- 14 : Composition (fraiseuse universelle d'outillage).

5.5. Fraiseuse avec coulisseau :

Le coulisseau supérieur motorisé présente tous les mécanismes d'entraînement de la broche ainsi qu'un moteur autonome. La tête de fraisage à l'extrémité du coulisseau peut être universelle ou verticale. Souvent, on prévoit également cette version avec une broche horizontale entraînée par un système classique, donc elle est conçue avec deux broches. La machine est ainsi rapidement adaptable à des travaux qui nécessitent de fréquents changements de tête à fraiser. [13]



Figure I- 15 : Fraiseuse avec coulisseau [14].

5.6. Fraiseuse 3 axes :

Pour ces fraiseuses, les trois axes (X, Y et Z) se déplacent simultanément. Ces fraiseuses polyvalentes plus utilisées assurent une grande précision. Elles peuvent être utilisées en automatique ou interactif, on a deux type :

- Broche Verticale. L'axe Z est vertical.
- Broche Horizontale. L'axe Z est horizontal.

Dans les 2 cas, la fraise est perpendiculaire à la table, c'est la table qui se trouve positionnée de façon différente.

Dans les cas de la broche Horizontale il y a une meilleure évacuation des copeaux, et du liquide de lubrification qui peut s'accumuler dans les parties creuses (Communément appelées baignoires). [15]

5.7. Fraiseuse 4 axes :

Ce sont des machines à 3 axes avec une rotation supplémentaire A ou B. Dans le cas de l'usinage à 4 axes, l'atout du fraisage est grâce à l'axe supplémentaire tandis que le

fonctionnement sur les axes X, Y et Z est le même que pour le système à 3 axes. A désigne la rotation autour de X ou B autour de l'axe Y. [15]

5.8. Fraiseuse 5 axes :

Ce sont des machines à 3 axes avec deux rotations supplémentaires généralement A et B. Les rotations du porte pièce (point de pivot) sont synchronisés avec les mouvements de l'outil. Les machines à 5 axes sont des machines CNC avancées. La combinaison de leur multidimensionnelle avec le mouvement d'outil permet de créer des pièces précises et complexes grâce à l'accès amélioré aux fonds et aux poches profondes. Le fait qu'elles assurent une finition à vitesses inégalées, elles sont souvent utilisées pour des applications de haut niveau telle que : les pièces aérospatiales, les os artificiels, les pièces de titane, les pièces de machines à pétrole et à gaz, les produits militaires et bien d'autre. [15]

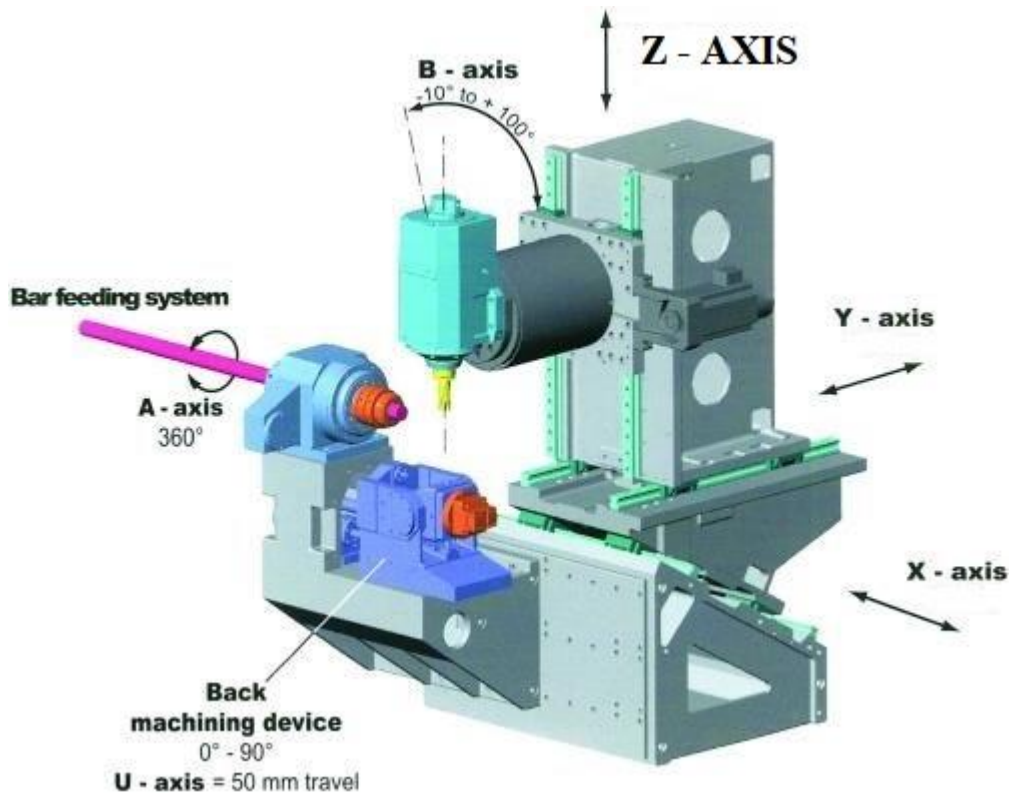


Figure I- 16 : Exemple des axes de fraiseuse.

5.9. Machine-Outil à Commande Numérique (M.O.C.N):

M O C N est une machine-outil automatique avec des actionneurs commandés par un DCN (Directeur de Commande Numérique) qui peut exécuter un programme d'usinage comprenant une série d'instructions de mouvement (commandes d'axes) ou d'actions (lubrification, changement d'outils, etc.).

L'architecture des Centres d'Usinages est similaire à celle d'une fraiseuse verticale ou horizontale, avec un magasin et un changeur d'outils.[15]



Figure I- 17 : Fraiseuse CNC.

6. Opérations de fraisage :

6.1. Le surfaçage :

Le surfaçage est la méthode utilisée pour fabriquer une surface plane, c'est l'opération de fraisage la plus fréquente. Elle peut être réalisée à l'aide d'une large variété d'outils. On utilise principalement des fraises avec un angle d'attaque de 45° , mais on peut également utiliser des fraises à plaquettes rondes, des fraises à surfacer-dresser et des fraises hérisson dans certaines situations. [16].



Figure I- 18 : Fraises pour applications générale [3]

6.2. L'épaulement :

L'épaulement est un processus qui implique la fabrication de deux surfaces planes perpendiculaires qui sont associées. Le fraisage des épaulements peut être réalisé à l'aide de fraises à surfacer-dresser classiques, ainsi que de fraises en bout, de fraises hérisson et de fraises-disques. [3]

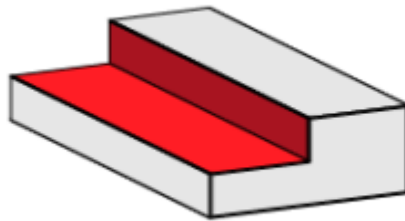


Figure I- 19 : Réalisation d'un épaulement [16].

6.3. Le profilage :

Le profilage concerne l'ensemble des travaux de fraisage dit de profil pour lesquels la surface réalisée est obtenue par le travail de forme de la denture latérale de la fraise. Suivant leur forme, on distingue :

- profil composé de lignes droites,
- profil composé de lignes courbes,
- profils particuliers (fraises spéciales).[16]

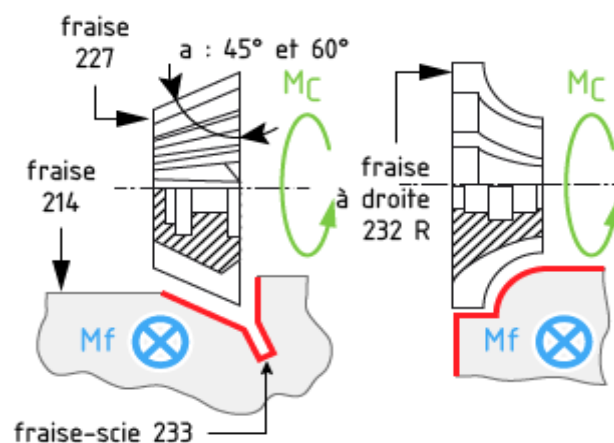


Figure I- 20 : Le fraisage de profil : ligne droites (gauche) et lignes courbes (droite) [16].

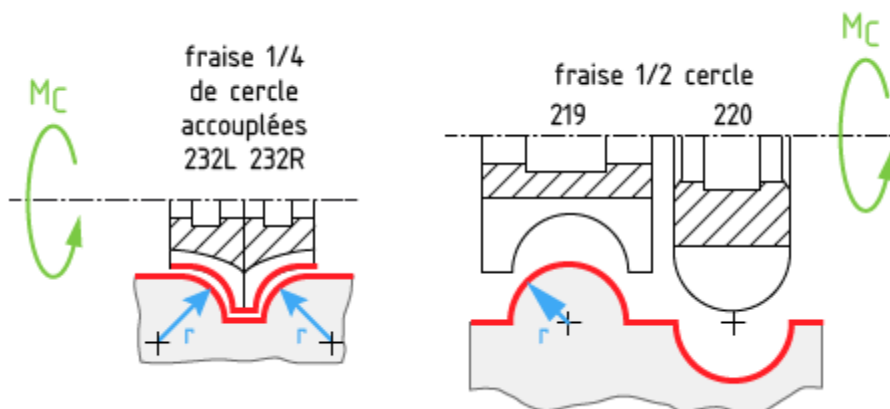


Figure I- 21: Le fraisage des profils particuliers [16].

6.4. Le rainurage :

La technique du rainurage est une méthode de fraisage qui implique la fabrication de trois surfaces orthogonales entre elles. On peut réaliser cette opération en utilisant une fraise de 2T ou 3T (ARS ou carbure) en fonction de la définition de la rainure. Il existe différentes formes de rainures (ex : rainures à té, rainures en vé) et/ou pour clavettes.[15]

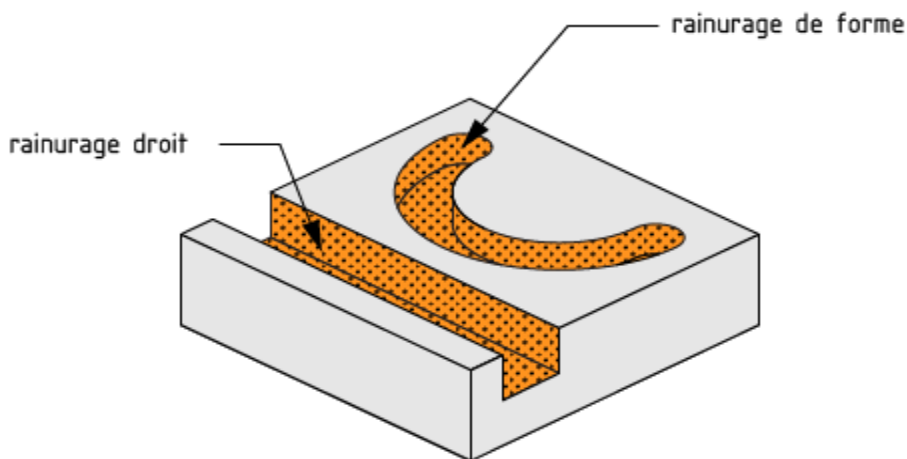


Figure I- 22 : Rainurage droit et de forme [16].

6.5. L'usinage de poches :

On peut définir une poche par des surfaces verticales ou avec des dépouilles (cylindriques et planes) variables. [16]

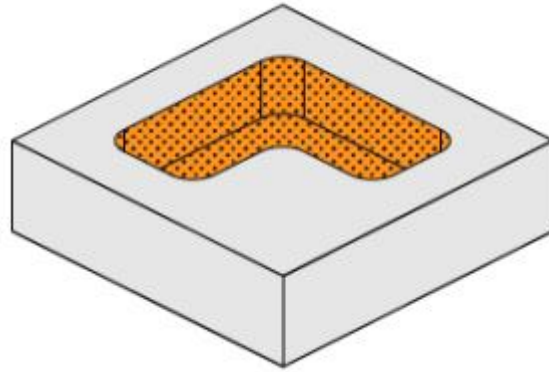


Figure I- 23 : Le fraisage des poches [16].

6.6. Chanfreinage :

Les chanfreins, les entailles en V, les dégagements, la préparation pour la soudure et l'ébavurage sont des procédés courants sur les bords des pièces. Selon le type de machine et le montage, ces opérations peuvent être réalisées de différentes façons. On peut utiliser une petite fraise en bout, une fraise hérisson ou une fraise à chanfreiner. [3]

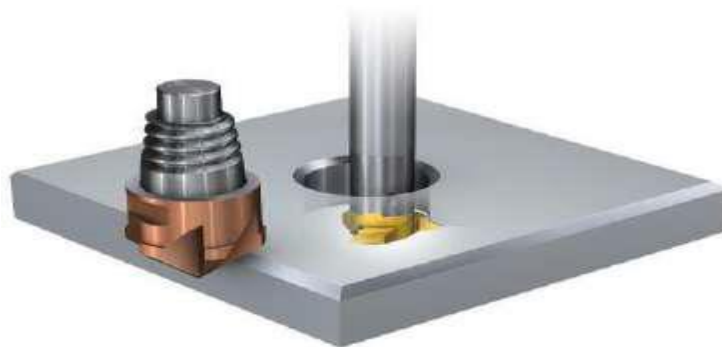


Figure I- 24 : Fraisage des chanfreins [3].

7. Conditions de coupe en fraisage :

Il s'agit d'obtenir une pièce usinée dans des conditions optimales. Afin d'y parvenir, il est nécessaire de définir certains paramètres particuliers, tels que la vitesse de coupe V_c , la vitesse d'avance V_f et la profondeur de passe a .

7.1. La vitesse V_c et N :

a. La vitesse de coupe V_c [m/mn] :

Elle correspond à la distance parcourue (en mètres) par l'extrémité d'une dent de l'outil en une minute. La durée de vie des outils est influencée par ce paramètre, qui dépend :

- du type de matière à usiner et du matériau de l'outil.
- de la nature de l'opération (ébauche ou finition),
- de la fonction d'utilisation des conditions de lubrification (travail à sec ou lubrifié).
- fonction d'utilisation des conditions de lubrification (travail à sec ou lubrifié).

Les valeurs usuelles des vitesses de coupe, fonction de la matière à usiner et de la matière de l'outil.[17]

$$V_c = \frac{\pi D N}{1000} \quad (I-1)$$

V_c : Vitesse de coupe (m/min).

D : Diamètre de l'outil de fraisage (mm).

N : Vitesse de broche (tr/min).

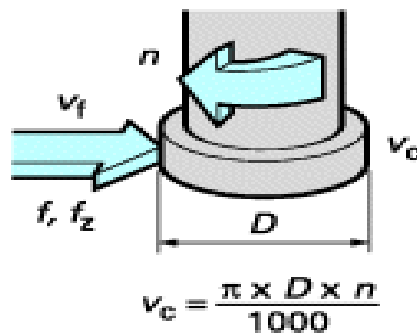


Figure I- 25 : Vitesse de coupe.

b- La vitesse de rotation de la broche N :

Le nombre de tours effectués par l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil est connu sous le nom de vitesse de broche (n en tr/mn).

La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par la formule.[18]

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

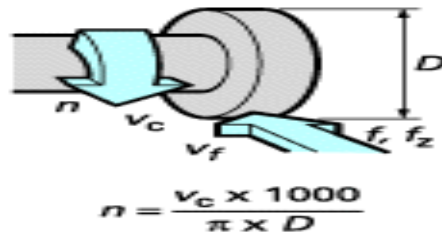


Figure I- 26 : Vitesse de broche.

7.2. L'avance V_f et f :

A- L'avance par minute ou vitesse d'avance (V_f en mm/min) :

Cela correspond à l'avance de l'outil vers la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. L'avance de table est également mentionnée ici. [19].

$$V_f = f_z \times N \times Z \quad (I-3)$$

V_f : Avance par minute (mm/min).

f_z : Avance par dent ($m/dent$).

N : Vitesse de broche (tr/min).

Z : Nombre d'arêtes de l'outil.

B- L'avance par tour (f en mm/tr) :

Cette valeur est particulièrement employée pour évaluer l'avance et évaluer la capacité d'une fraise à surfacer à travailler en finition. Elle montre la vitesse à laquelle l'outil progresse lors d'une rotation. [19]

$$f = \frac{V_f}{N} \quad (I-4)$$

C- L'avance par dent (f_z en $mm/dent$) :

C'est un facteur capital en fraisage, décisif pour le taux d'enlèvement de métal par arête, la charge par arête, la durée de vie et dans une certaine mesure, la structure de surface.[19]

$$f_z = \frac{V_f}{N Z} \quad (I-5)$$

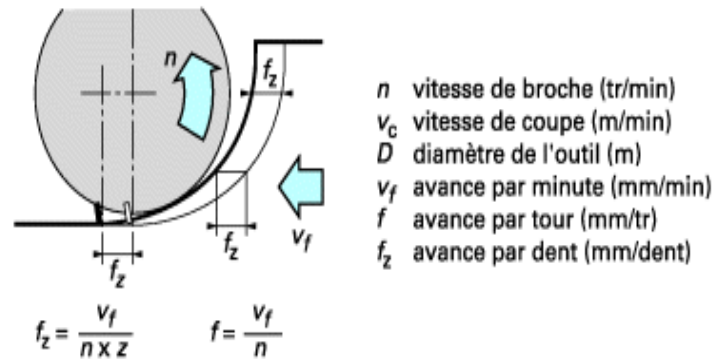


Figure I- 27 : Les différentes avances.

7.3. La profondeur de coupe a_p et a_e :

A- La profondeur de coupe axiale (a_p en mm) :

Pour le fraisage d'épaulements, le surfaçage ou radiale (a_e) désigne l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. Il s'agit du niveau de réglage de l'outil au-dessous de la surface initiale de la pièce. (Figure I-21-) [19].

$$a_p = k \times D \tag{I-6}$$

K : c'est un coefficient classique pour calculer la profondeur de passe.

Remarque : Quand N'ayant pas d'information fournie par le fournisseur pour les fraises et pour la matière usinée, on prendre $K = 0.4$

B- La profondeur de coupe radiale ou largeur de coupe (a_e en mm) :

En surfaçage et axiale (a_p) pour le fraisage d'épaulements, est la distance parcourue par l'outil sur la surface de la pièce (figure I-27-). [19].

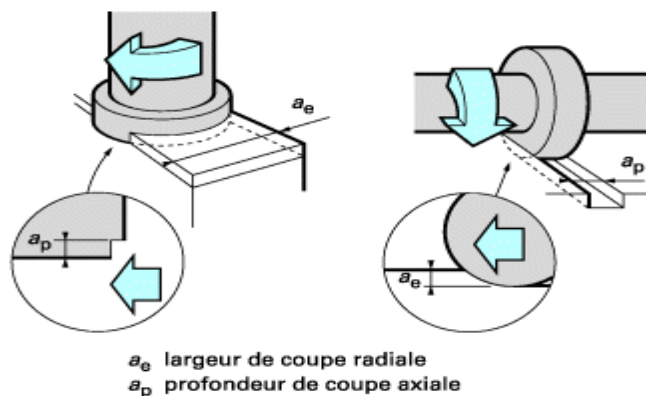


Figure I- 28 : Coupe axiale et radiale.

8. Paramètres technologiques :

8.1. Débit de copeaux Q :

Le volume de matière enlevée est calculé en divisant le temps de coupe. Le taux de Q peut également être défini comme un taux d'enlèvement de matière "instantané", c'est-à-dire le taux auquel la section transversale de la matière enlevée se déplace à travers le mur. Évalué en centimètres cubes par minute (cm³/min). [20]

$$Q = \frac{ap \times ae \times Vf}{1000} \quad (I-7)$$

8.2. La rugosité de surface :

La rugosité est le résultat de la modification micro géométrique d'une surface, due au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage...etc.). Apparaissent se forme : des aspérités appelées "Pics" ou des cavités appelées "Creux".

8.2.1. Les principaux critères de la rugosité de surface :

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons :

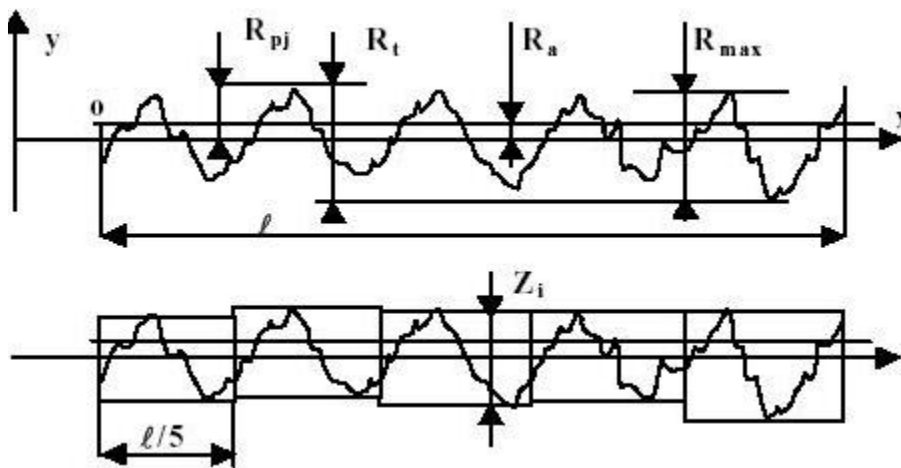


Figure I- 29 : Critères de rugosité [21].

Soit « ox » la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^x y dx = 0$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, soit :

- **Rugosité moyenne arithmétique R_a** : dite C.L.A. (Center Ligne Average)

Selon la norme ISO (1998), ce paramètre est défini comme étant la moyenne arithmétique des valeurs absolues des déviations du profil de la rugosité et est exprimé mathématiquement par l'équation.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx \quad (I-8)$$

- **Rugosité moyenne quadratique R.M.S** : (Root Mean Square) : Ce critère représente l'écart moyen quadratique par rapport à « ox » :

$$RMS = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx \right] \quad (I-9)$$

- **Rugosité totale R max** : elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité.
- **Rugosité totale Rt** : représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur de palpée l
- **Rugosité Rz** : représente la rugosité totale moyenne :

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Zi \quad (I-10)$$

8.3. L'effort de coupe FC :

La force requise pour détacher un copeau découle principalement des forces de coupe réelles exercées sur la face de la dent et des forces de frottement qui s'exercent le long de cette même face. Il est important de noter que le sens et le rapport des forces peuvent fluctuer considérablement selon un processus complexe en fonction de différents éléments tels que le type de fraisage, la position de l'outil, la matière de la pièce, la géométrie de coupe, l'épaisseur du copeau, le degré et le type d'usure de l'outil, ainsi que les conditions de coupe, ... ext. [22].

$$Fc = \frac{Ks.f.ap.ae}{D\pi} \quad (I-11)$$

Fc : La force de coupe tangentielle (N).

Ks : La pression de coupe spécifique (N/mm²).

f : Avance par tour (mm/tr).

ap : La profondeur de coupe axiale (mm).

ae : La profondeur de coupe radiale (mm).

D : Diamètre de l'outil de fraisage (mm).

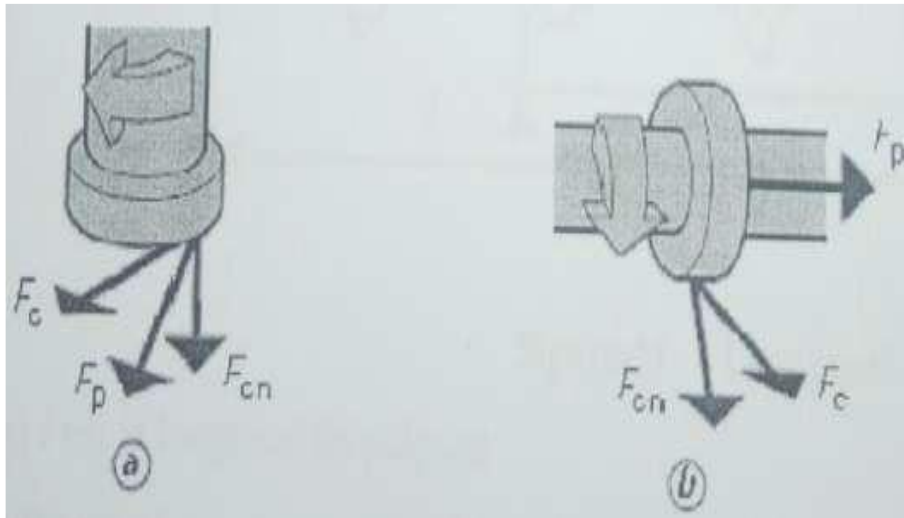


Figure I- 30 : La force de coupe (tangentielle F , radiale F_{cn} et axiale F_p) [22].

8.4. Puissance nécessaire à la coupe :

P_c (Puissance de coupe) puissance de coupe générée par l'enlèvement de copeaux.
Mesurée en kilowatts (kW). [20]

$$P_c = \frac{ae \times ap \times vf \times ks}{60 \times 10^6} \quad (I-12)$$

8.5. Temps technologique pour le fraisage en roulant :

Dans le calcul des temps technologiques pour les opérations de fraisage, le nombre de dents Z et le diamètre D de l'outil (fraise) sont pris en compte. Ce temps est alors exprimé de la manière suivante :

$$T_{tc} = \frac{(D \sin \alpha + l_1 + l_2 + L)}{aZN} \quad (I-13)$$

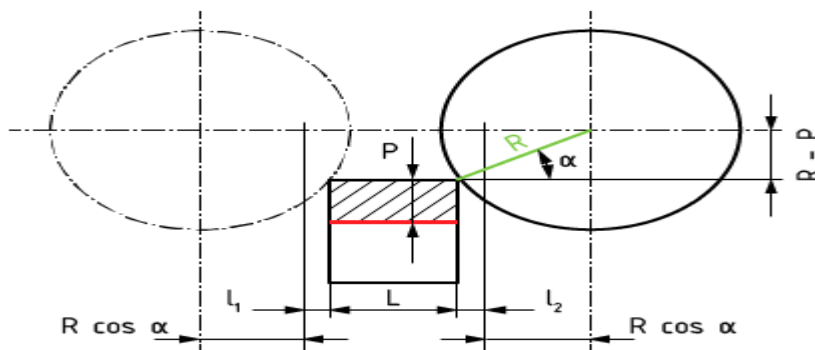


Figure I- 31 : Calcul du T_t en fraisage (en roulant).

8.6. Temps technologique pour le fraisage en bout :

Dans le cas d'un travail de fraisage en bout nous avons :

$$\mathbf{Ttc} = n_p \frac{(D+l_1+l_2+L)}{aZN} \quad (\mathbf{I-14})$$

On pose: $l_1+l_2 = E$

$$\mathbf{Ttc} = n_p \frac{(D+E+L)}{aZN} \quad (\mathbf{I-15})$$

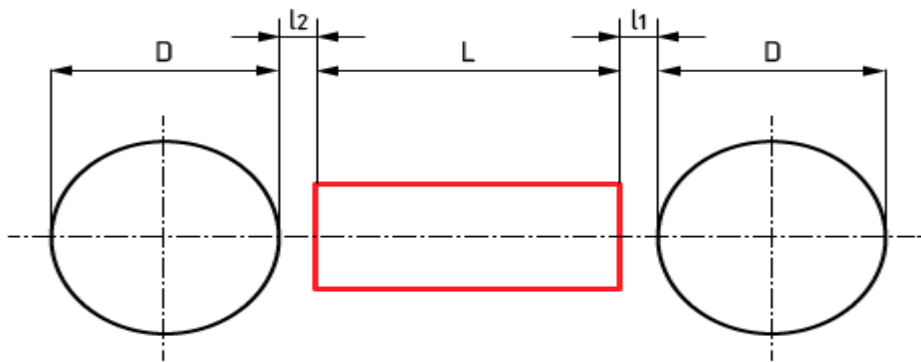


Figure I- 32 : Calcul du Tt en fraisage (en bout).

9. Conclusion :

Ce chapitre est composé de trois parties, la première, expose un rappel des bases sur l'usinage tels que : la définition et le but d'usinage. La deuxième partie et plus particulièrement le mode de fraisage et ses conditions de coupe. Dans la troisième partie, on retrouve la rugosité de surface usinée et les forts de coupe.

CHAPITRE II

METHODE D'OPTIMISATION

1. Introduction :

L'optimisation des conditions de coupe consiste à déterminer la vitesse de coupe et l'avance permettant d'assurer une production maximale des pièces conjointe à un prix de revient minimal. Cette optimisation est appliquée dans le cas des fabrications en grande série, dans ce chapitre en parler de l'optimisation et leur méthode et critère.

2. Définition :

L'optimisation vise à trouver la meilleure solution à un problème, que ce soit de manière analytique ou numérique, en fonction d'un critère spécifique. Elle est essentielle dans divers domaines tels que l'industrie, l'économie et la physique, où elle permet de gagner en efficacité ou en temps. La qualité de la solution dépend souvent du modèle utilisé pour représenter le problème réel et de la méthode de résolution choisie. En résumé, l'optimisation joue un rôle crucial dans la résolution de problèmes complexes en visant à obtenir les meilleurs résultats possibles.

3. Classifications des problèmes d'optimisation :

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés de plusieurs manières, en fonction de la nature de fonction, des variables et des contraintes :

3.1. Variables de problème :

Les variables peuvent être de natures diverses. Par exemple, pour une opération d'usinage il peut s'agir de la matière à usiner, les conditions de coupe, etc. C'est à l'utilisateur qui définir les variables du problème. Il peut avoir intérêt à faire varier un grand nombre de paramètres afin d'augmenter les degrés de liberté de l'algorithme. Dans notre travail nous désignerons par x_1, x_2, \dots, x_n les n variable du problème.[4]

Celles-ci peuvent être :

➤ **Variable continué :**

Une variable continue est une variable qui peut prendre toutes les valeurs possibles d'un intervalle de nombres réels. [23]

➤ **Variable combinatoire :**

La résolution d'un problème à variable combinatoire implique de trouver la solution la plus optimale dans un ensemble discret appelé ensemble des solutions possibles. Cet ensemble est généralement terminé, mais il est composé d'un grand nombre d'éléments, et il est décrit de façon implicite. [23]

➤ **Variables de discrète :**

Une variable discrète est une variable qui n'a de valeurs que dans un certain nombre de nombres réels. En règle générale, seules les valeurs entières sont admissibles. [23]

3.2. Espace de recherche :

Dans certains algorithmes d'optimisation, comme les stratégies d'Evolution, l'espace de recherche est restreint : seule la population initiale est limitée à un espace infini. Cependant, lorsqu'il s'agit d'algorithmes de type Monte Carlo et génétique, il est souvent essentiel de déterminer un espace de recherche limite. La réduction de l'espace de recherche n'est généralement pas un souci. Effectivement, par simple raison technologique ou informatique, les intervalles de définition des variables sont généralement restreints. En outre, il est courant d'avoir au moins une idée des ordres de grandeur des variables du problème.[4]

Nous désignerons par $x_{i \min}$ et $x_{i \max}$ les bornes de chaque variable x_i :

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}$$

3.3. Fonction objectif et fonction d'adaptation :

Les grandeurs à optimiser peuvent être par exemple une consommation, un rendement, un profit, un temps de production, un coût, une durée de vie d'un outil, etc..... Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles à partir des grandeurs à optimiser.

Il s'agit de la fonction d'adaptation (ou fitness fonction en terminologie anglo-saxonne). L'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction quelle que soit sa définition. La pertinence de la solution dépendra donc de la pertinence de la question posée à l'ordinateur [Deneux 1993]. La fonction f doit donc traduire en langage mathématique suivant le désir de l'utilisateur. [4]

3.3.1 Mono-objectif :

La définition de la fonction d'adaptation n'est généralement pas un problème dans le cas d'un objectif unique. Par exemple, si l'objectif est de trouver une solution avec un coût de production minimal lors d'une opération d'usinage, cette fonction sera égale au coût. La fonction d'adaptation est calculée en deux étapes. Après avoir évalué les caractéristiques des solutions potentielles à l'aide du modèle, on calcule la fonction d'adaptation en se basant sur ces caractéristiques. [4]

3.3.2. Multi-objectif :

Souvent, les problèmes d'optimisation nécessitent la réalisation de plusieurs objectifs, dont certains sont concurrents. Une méthode traditionnelle implique la définition de fonctions objectifs f_i , qui traduisent chaque objectif à atteindre, et leur intégration dans la fonction d'adaptation. Il y a donc un compromis. Selon [Fonseca 1993], il est préférable de se limiter à une somme pondérée des fonctions objectifs :

$$f = \sum w_i f_i \quad (\text{II -1})$$

Où les valeurs des poids w_i restent bornées dans l'intervalle $[0;1]$ et leurs sommes égale à un ; c'est à l'utilisation de fixer convenablement les poids w_i .

On peut souvent classer les objectifs par importance mais les poids seront généralement adaptés par tâtonnement, jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable. A la place d'une somme, on peut également utiliser un produit du type:

$$f = \prod_i f_i^{w_i} \quad (\text{II -2})$$

Où des expressions plus complexes.

Il faut néanmoins être conscient des effets d'une telle combinaison des objectifs. En effet, deux solutions potentielles dont les fonctions objectives n'ont pas la même valeur peuvent aboutir à une même valeur de la fonction d'adaptation. De plus, un algorithme utilisant une telle

approche ne convergera que vers une seule solution alors qu'il existe peut-être toute une famille de solutions remplissant les objectifs fixés. L'optimisation à objectifs multiples est un domaine de recherche très actif actuellement, de part les enjeux économique et industriels auxquels il répond.

Des concepts tels que les niches écologiques ou l'optimalité de Pareto semblent prometteurs pour la résolution de ce genre de problème [Fonseca, 1995]. [4]

3.4. Les problèmes d'optimisation avec et sans contrainte :

Il est crucial de faire une distinction précise entre les problèmes où les variables de décision sont soumises à des contraintes. Il est possible que ces contraintes ne soient que des limites et s'étendent jusqu'à un ensemble d'équations de type égalité et d'inégalité. Parfois, une contrainte égalité peut être supprimée par substitution dans la fonction objectif. Bien entendu, les problèmes liés aux contraintes sont plus difficiles à résoudre et nécessitent l'utilisation d'algorithmes spécifiques.

3.5. Problèmes linéaires ou non-linéaires :

3.5.1. Problèmes d'optimisation linéaires :

Dans ces problèmes, la fonction objectif et les contraintes sont représentées par des fonctions linéaires des variables de décision, Ces problèmes sont généralement plus simples à résoudre que les problèmes non linéaires.

3.5.2. Problèmes d'optimisation non linéaires :

Dans ces problèmes, la fonction objectif ou au moins une des contraintes est une fonction non linéaire des variables de décision, Ces problèmes sont généralement plus complexes à résoudre que les problèmes linéaires, car ils peuvent avoir plusieurs optimums locaux. [24]

4. Méthodes d'optimisation :

Une fois définie la fonction à optimiser, il s'agit de choisir une méthode adaptée au problème posé. Les méthodes d'optimisation peuvent être classées La résolution des problèmes d'optimisation est réalisée à l'aide des méthodes et algorithmes d'optimisation qu'on peut les présenter sous la forme de deux familles: les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

4.1. Les méthodes déterministes :

Les méthodes déterministes sont souvent réputées pour leur efficacité et leur faible coût, mais elles requièrent généralement une configuration initiale (ou point de départ) pour résoudre le problème. Leur efficacité dépend souvent de la rapidité avec laquelle la fonction peut être évaluée ou de la connaissance préalable de cette fonction.

La recherche des extrema d'une fonction f équivaut à résoudre un système d'équations, linéaires ou non linéaires, comportant n équations et n inconnues:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} (x_1, \dots, x_n) = 0 \quad (\text{II -3})$$

Les méthodes déterministes peuvent être classées en deux catégories principales :
Les méthodes locales et les méthodes globales.

- Les méthodes locales, ils assurent la convergence vers l'optimum de la Fonction la plus proche de la solution courante en explorant son voisinage
- Les méthodes globales, ils s'attachent à converger la solution vers l'optimum global de la fonction.

Les méthodes déterministes incluent la méthode du gradient, la méthode de Newton, la méthode de quasi-Newton, l'approche de Levenberg-Marquardt, La méthode du simplexe, la méthode PQS, la méthode lagrangienne, Méthodes du gradient conjugué ...etc.

4.1.1. La méthode du gradient :

Les méthodes de descente, telles que la méthode du gradient, visent à trouver des minimiseurs locaux de fonctions à plusieurs variables en construisant une suite de points qui convergent vers un minimum. Ces méthodes partent d'un point initial proche du minimiseur recherché et génèrent une suite de points où la valeur de la fonction objectif diminue à chaque itération. [25]

4.1.2. La méthode de Newton :

La méthode de Newton consiste à démarrer à partir d'une estimation initiale et à itérer en utilisant des approximations linéaires pour converger vers la solution recherchée. Elle est largement utilisée en analyse numérique pour résoudre des équations non linéaires et pour

optimiser des fonctions. La méthode de Newton est appréciée pour sa convergence rapide, en particulier lorsque les conditions de convergence sont satisfaites, telles que la continuité des dérivées premières et secondes de la fonction. [26]

4.1.3. La méthode de quasi-Newton :

La méthode de quasi-Newton est une approche d'optimisation numérique qui vise à résoudre des problèmes d'optimisation sans avoir à calculer explicitement la matrice hessienne (dérivées secondes) de la fonction objectif, en s'appuyant sur des formules de mise à jour approchées des dérivées secondes.[27]

4.1.4. L'approche de Levenberg-Marquardt :

L'approche de Levenberg-Marquardt Créée en 1944 par Kenneth Levenberg pour la résolution d'un problème des moindres carrés non linéaires, Cette méthode présente une combinaison entre la méthode du gradient et la méthode de Newton. Lorsque les paramètres sont éloignés de la valeur optimale, la méthode de Levenberg-Marquardt agit comme un gradient et agit comme la méthode de Newton lorsqu'on s'approche de la solution optimale. [28]

4.1.5. La méthode du simplexe :

L'idée de la méthode du simplexe est de démarrer avec une solution réalisable de base (l'un des points extrêmes) de l'ensemble des contraintes d'un problème sous sa forme standard et de passer à un autre de telle façon à minimiser la fonction coût jusqu'à l'obtention du minimum. On note qu'il est suffisant de se limiter aux solutions réalisables de base dans notre recherche du point optimale réalisable. [28]

4.1.6. Méthodes du gradient conjugué :

L'inconvénient de la méthode du gradient, c'est qu'elle effectue, souvent, beaucoup de zigzags avant d'atteindre la solution souhaitée, Afin d'éliminer ce problème, la méthode du gradient conjugué, cherche l'inverse du gradient à chaque itération et on lui ajoute une combinaison linéaire des anciens vecteurs de direction, afin d'obtenir un nouveau vecteur conjugué de direction.[28]

4.1.7. La méthode PQS :

La méthode de programmation quadratique séquentielle (PQS), élaborée par Schittkowski en 1983, est une approche de résolution de problèmes d'optimisation non linéaires. Réputée pour son efficacité, elle est particulièrement adaptée aux problèmes avec des contraintes de taille modeste à moyenne. Cette méthode, comme son nom l'indique, recherche la solution optimale en résolvant une série de problèmes de programmation quadratique. À chaque étape, elle utilise une approximation quadratique de la fonction objectif ainsi que des approximations linéaires des contraintes. Le Hessien est calculé par la méthode BFGS. Une analyse canonique permet d'obtenir le minimum de la fonction Lagrangienne, et un déplacement est effectué vers ce point pour converger vers la solution optimale. [29]

4.1.8. Les méthodes utilisant les plans d'expériences :

Les plans d'expériences sont des méthodes statistiques utilisées pour concevoir et analyser des expériences scientifiques et industrielles. Ces méthodes permettent de déterminer les effets de plusieurs facteurs sur un phénomène ou un processus, en contrôlant les conditions d'expérience et en répétant les mesures pour réduire les erreurs. Les plans d'expériences sont couramment utilisés dans divers domaines, tels que l'ingénierie, la recherche et le développement, la qualité, et l'optimisation de processus. [29]

4.2. Méthodes stochastiques :

Ces méthodes ont généralement une capacité plus forte à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni la définition d'un point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations avant d'arriver à la solution du problème. [30]

4.2.1. La méthode du recuit simulé :

Cette méthode est basée sur la théorie du recuit simulé, qui consiste à simuler le comportement d'un système physique en évoluant à partir d'un état initial vers un état final. Dans le contexte de l'usinage, cette méthode est utilisée pour optimiser les paramètres de contrôle, tels que la vitesse de coupe et la pression de fraisage, pour obtenir des pièces de qualité optimale.

4.2.2. La méthode Recherche Tabou :

Cette méthode est basée sur l'idée de ne pas revenir sur des solutions déjà explorées. Dans le contexte de l'usinage, cette méthode est utilisée pour éviter de répéter des erreurs de fabrication et pour trouver des solutions optimales en évitant les régions de l'espace des solutions qui ont déjà été explorées.

4.2.3. Algorithmes Génétiques :

Ces algorithmes sont basés sur la théorie de l'évolution biologique et utilisent des principes de sélection naturelle pour trouver des solutions optimales. Dans le contexte de l'usinage, ces algorithmes sont utilisés pour optimiser les paramètres de contrôle et les processus de fabrication pour obtenir des pièces de qualité optimale.

Les principes de fonctionnement de l'algorithme génétique sont basés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Voici les étapes clés de son fonctionnement :

Création de la population initiale : Une population de solutions potentielles, appelées individus ou chromosomes, est générée aléatoirement. Cette population peut être représentée par des chaînes de caractères binaires ou d'autres structures de données appropriées.

Évaluation et sélection : Chaque individu est évalué en fonction de sa capacité à résoudre le problème, ce qui est mesuré par une fonction d'aptitude (fitness). Les individus les plus aptes sont sélectionnés pour la prochaine génération.[38]

Opérateurs génétiques :

Mutation : Des modifications aléatoires sont apportées aux individus sélectionnés pour introduire de la diversité dans la population.

Croisement (ou crossover) : Les individus sont combinés pour créer de nouveaux individus, ce qui permet de partager des caractéristiques favorables.

Nouvelles générations : Les individus modifiés et non modifiés sont ajoutés à la population, et le processus de sélection et d'opérateurs génétiques est répété sur plusieurs générations.

Critère d'arrêt : Le processus s'arrête lorsque le critère de fin est atteint, comme un nombre d'itérations défini, un temps de calcul maximum, ou une stagnation de l'amélioration de la fonction d'aptitude.[38]

4.2.4. Méthodes Évolutionnistes :

Ces méthodes sont basées sur la théorie de l'évolution biologique et utilisent des principes de sélection naturelle pour trouver des solutions optimales. Dans le contexte de l'usinage, ces méthodes sont utilisées pour optimiser les paramètres de contrôle et les processus de fabrication pour obtenir des pièces de qualité optimale.

4.2.5. La méthode Monte Carlo :

La méthode Monte Carlo est une méthode numérique qui utilise des tirages aléatoires pour résoudre des problèmes mathématiques. Elle est notamment utilisée dans l'optimisation de processus industriels, mais les sources données ne couvrent pas son application dans le domaine de l'usinage.

5. Critère d'optimisation lors de fraisage :

Pour optimiser les conditions de coupe, il est nécessaire de définir la vitesse de coupe et l'avance afin de garantir une production optimale des pièces conjoints à un prix de revient minimum. Cette optimisation est mise en œuvre pour les productions en grande série. [31]

5.1. Le temps de fabrication :

Il est déterminé par l'expression suivant :

$$\mathbf{T_p} = T_t + T_s + \frac{T_c}{p} \quad (\text{II-4}).$$

T_p : temps de fabrication.

T_t : temps réel de coupe.

T_s: temps improductif sur le poste (mouvements rapides, montage / démontage de pièces, ...).

T_c: temps de changement d'une arête de coupe (ou to temps de changement outil).

p : nombre de pièces entre deux changements d'outil (d'arête) :

$$p = \frac{T}{Tt} \quad (\text{II -5})$$

T : durée de vie de l'outil (ou de l'arête de coupe).

$T = C_v.Vc^n$ (modèle de Taylor).

$T = C.f^x.a^y.Vc^n$ (modèle de Gilbert).

f : l'avance (mm/tr).

a : profondeur de passe (mm).

V : vitesse de coupe (m/min).

T : durée de vie de l'outil (min).

5.2. La durée de vie d'outil :

Par définition la durée de coupe ou de vie T d'un outil selon la norme **ISO 3685** C'est le temps de coupe totale d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique. Il est nécessaire de passer par une approche expérimentale, pour arriver à estimer le temps de service d'un outil de coupe pour des conditions de coupe bien définies.

C'est en 1907 que Taylor a proposé son modèle pour estimer la durée de vie d'un outil (loi de Taylor).

$$T = C_v.Vc^n \quad (\text{II -6})$$

L'exposant n dépend : de la profondeur de passe, avance, matériau usiné et matériau constituant de l'outil et il a une valeur : $-10 < n < -1$.

La constante C_v dépend essentiellement du matériau usiné et des conditions de coupe. Sa valeur est très variable: $10^4 < C_v < 10^{14}$.

Modèle de Gilbert ou le modèle de Taylor généralisé en 1950

$$T = C.f^x.a^y.Vc^n \quad (\text{II -7})$$

Où f est l'avance, a est la profondeur de passe.

Les coefficients x, y et n : dépendent que du matériau constituant l'outil, avec $x \approx n/6$ et $y \approx n/3$ et x, y, n sont toujours < 0 .

La constante **C**: dépend du Couple Outil /Matière **0.12 à 0.14** pour les aciers rapides ordinaires **0.15 à 0.18** pour les aciers rapides supérieurs **0.2 à 0.3** pour les carbures selon la nuance > à **0.45** pour les céramiques. [32]

5.3. Le coût de l'usinage :

Le coût de l'usinage comprend :

- coût machine (amortissement, entretien, salaire opérateur).
- coût montage (prix du montage à amortir sur l'ensemble de la série).
- coût relatif à l'usure de l'outil (plaquettes, porte plaquettes, arrêt machine pour réglage, ...).

Le coût d'usinage d'une pièce peut être calculé à l'aide de la formule :

$$Cu = Cc + Ci + Cs + Ccs + Cf \quad (\text{II -8})$$

$Cc = \tau m \times Tt$: coût de coupe par pièce.

$Ci = \tau m \times Ts$: coût improductif par pièce.

$Cm = Cc + Ci$: coût machine par pièce.

$Cs = Po \times (Tt / T)$: coût outil par pièce avec Po le prix d'une arête de coupe (d'un outil).

$Ccs = \tau m \times (Tcs / p)$: coût de changement d'outil (d'arête) par pièce.

Cf : coût fixe par pièce (éléments de manutention, outillage, matière, ...).

On note τm le taux machine (en DA/min ou €/min) qui comprend en général le salaire de l'ouvrier, l'amortissement de la machine-outil et un coût d'exploitation lié directement à l'usinage (Électricité, lubrifiant, air comprimé, entretien), dont l'évaluation est souvent globale.

On simplifier :

$$Cu = \tau m \times Tt + \tau m \times ts + Po \times \left(\frac{Tt}{T}\right) + \tau m \left(\frac{Tcs \times Tt}{T}\right) + Cf \quad (\text{II -9})$$

$$Cu = \tau m \frac{\pi \cdot l \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Vc} + \tau m \times ts + Po \times \left(\frac{\pi \cdot l \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Vc \cdot Cv \cdot Vc^n}\right) + \tau m \left(\frac{Tcs \cdot \pi \cdot l \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Vc \cdot Cv \cdot Vc^n}\right) + Cf$$

$$Cu = \tau m \frac{\pi \cdot l \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Vc} + \tau m \times ts + Po \times \left(\frac{\pi \cdot l \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Cv \cdot Vc^{n+1}}\right) + \tau m \left(\frac{Tcs \cdot \pi \cdot l \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Cv \cdot Vc^{n+1}}\right) + Cf$$

En factorisant :

$$Cu = \frac{\pi \cdot l \cdot D}{1000 \cdot f} \left[\frac{\tau m}{Vc} + \frac{Po + \tau m \cdot Tcs}{Cv \cdot Vc^{n+1}} \right] + \tau m \times Ts + Cf \quad (\text{II -10})$$

La variable principale c'est la vitesse de coupe.

En fonction de la vitesse de coupe (Vc) le coût de l'usinage suit une courbe dont l'allure générale prend la forme de la figure (II-1)

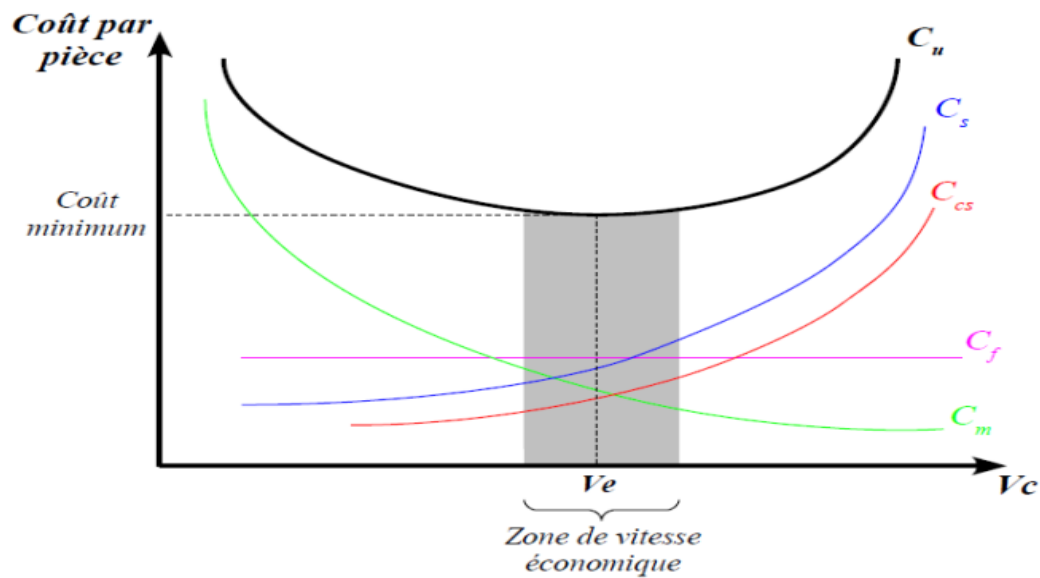


Figure II- 1 : Coût par pièce en fonction de vitesse de coupe V_c .

L'optimisation consiste donc à exprimer C_u en fonction de la vitesse de coupe V_c et de minimiser cette fonction.

Quand la vitesse de coupe augmente, la durée de l'usinage diminue mais la durée de coupe de l'outil diminue (usure plus rapide). En conclusion le coût d'utilisation de la machine diminue tandis que le coût de l'outillage par pièce augmente. [32]

6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons d'abord défini l'optimisation des conditions de coupe, en mettant en lumière quelques méthodes d'optimisation, ensuite on a étudié leurs critères sur le temps et le coût de production

CHAPITRE III

OPTIMISATION DES CONDITIONS

DE COUPE PAR ALGORITHME

GENETIQUE

1. Introduction :

L'optimisation des conditions de coupe en fraisage par l'algorithme génétique consiste à utiliser des techniques d'optimisation basées sur des principes évolutifs pour déterminer les paramètres de coupe optimaux. Les algorithmes génétiques sont des méthodes de recherche inspirées par le processus de sélection naturelle. En fraisage, cela implique d'ajuster des variables telles que la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance pour maximiser l'efficacité de l'usinage et la qualité de la pièce.

2. Optimisation par algorithme génétique :

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation numérique pour résoudre les problèmes non linéaires, c'est l'une des méthodes d'optimisation multi objectif.

On a choisi cette méthode car le problème de notre travail est un problème non linéaire multi variable.

3. Modélisation du problème :

3.1. Variables d'optimisations :

les variables liées de notre problème c'est la vitesse de coupe V_c et le profondeur de passe a et l'avance par dent f_z dans deux opération ébauche et finition donc pour l'ébauche V_{c_r} , a_r , f_{z_r} et V_{c_s} , a_s , f_{z_s} pour finition.

3.2. Formulation de fonctions objectives :

3.2.1. Temps de productions :

Pour un travail de réalisation en série, il est très important de connaître le temps de fabrication d'une pièce, car cela permet de déterminer la durée de production par la formule suivante :

$$T_p = T_t + T_s + \frac{T_c}{p}$$

$$T_{tr} = np \frac{L+E+Dr}{f_{zr} \times z_r \times N_r}$$

$$N = \frac{1000V_c}{\pi \times D}$$

$$P = \frac{T}{T_t}$$

$$T = C \cdot a^y \cdot f_z^x \cdot Z^x \cdot Vc^n \text{ (loi de Gilbert)}$$

$$T_p = \frac{(L+E+D)\pi D}{f_z \cdot Z \cdot 1000 Vc} + T_s + \frac{(L+E+D)\pi D}{f_z \cdot Z \cdot 1000 Vc} \times \frac{T_{cs}}{C \cdot a^y \cdot f_z^x \cdot Z^x \cdot Vc^n}$$

Donc pour ébauche et finition on a :

$$T_p = T_{tr} + T_{ts} + T_s + \frac{T_{cr}}{pr} + \frac{T_{cs}}{ps}$$

$$T_{tr} = n_p \frac{(L + E + D)\pi D}{f_{zr} \cdot Z_r \cdot 1000 V_{cr}}$$

$$T_{ts} = \frac{(L+E+D)\pi D}{f_{zs} \cdot Z_s \cdot 1000 V_{cs}}$$

$$Pr = \frac{Tr}{T_{tr}}$$

$$Ps = \frac{Ts}{T_{ts}}$$

Donc la fonction objectif de temps de production est :

$$T_p = \left[n_p \times \frac{(L+E+D) \times \pi \times D}{f_{zr} \times Z_r \times 1000 \times V_{cr}} + \frac{(L+E+D) \times \pi \times D}{f_{zs} \times Z_s \times 1000 \times V_{cs}} \right] + \left[\frac{(L+E+D) \times \pi \times D}{f_{zr} \times Z_r \times 1000 \times V_{cr}} \times \frac{T_{cr}}{C \times (ar^y) \times (f_z r^x) \times Z_r \times V_{cr}^n} \right] + \left[\frac{(L+E+D) \times \pi \times D}{f_{zs} \times Z_s \times 1000 \times V_{cs}} \times \frac{T_{cs}}{C \times (as^y) \times (f_z s^x) \times Z_s \times V_{cs}^n} \right] + T_s$$

3.2.2. Les contraintes :

En raison des capacités limitées de la machine et des outils, de l'état de surface de la pièce, du matériau utilisé et d'autres contraintes telles que le temps, nous devons établir des Contraintes pour protéger la machine et les outils contre les dommages éventuels. Ces Contraintes traduisent par des limitations sur les variables que nous pouvons optimiser.

- Limitation :

Afin de maintenir la qualité des outils de coupe et d'obtenir une surface de qualité, il est nécessaire que la vitesse de coupe soit maintenue dans une plage spécifique, définie par une valeur minimale et une valeur maximale .soit:

$$\frac{\pi \times DN_{rmin}}{1000} \leq V_{cr} \leq \frac{\pi \times DN_{rmax}}{1000}$$

$$\frac{\pi \times DN_{smin}}{1000} \leq V_{cs} \leq \frac{\pi \times DN_{smax}}{1000}$$

L'avance par dent doit être maintenue dans une plage spécifique, définie par une valeur minimale et une valeur maximale :

$$\frac{Vf_{min}}{ZrN_{max}} \leq fz_r \leq \frac{Vf_{max}}{ZrN_{min}} \qquad \frac{Vf_{min}}{ZrN_{max}} \leq fz_s \leq \frac{Vf_{max}}{ZrN_{min}}$$

C'est le même pour la profondeur de passe a :

$$a_{min} \leq a_r \leq a_{max}, \qquad a_{min} \leq a_s \leq a_{max}$$

- Effort de coupe :

L'effort de coupe F_c ne doit pas dépasser une force limite, symbolisée par F_s , qui détermine les capacités maximales de système de montage.

$$F_c = k_s \cdot a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot z \cdot N$$

$$F_c = k_s \cdot a_{p_r} \cdot a_{e_r} \cdot f_{z_r} \cdot z_r \cdot N_r \leq F_s \text{ pour l'ébauche}$$

$$F_c = k_s \cdot a_{p_s} \cdot a_{e_s} \cdot f_{z_s} \cdot z_s \cdot N_s \leq F_s \text{ Pour finition}$$

- Puissance de coupe :

La puissance de coupe ne doit pas dépasser la puissance maximale de la machine, symbolisée par P_m .

$$P_c = \frac{F_c}{60 \times 10^6}$$

$$\frac{F_{c_r}}{60 \times 10^6} \leq P_m \cdot \eta \text{ Pour l'ébauche}$$

$$\frac{F_{c_s}}{60 \times 10^6} \leq P_m \cdot \eta \text{ Pour finition}$$

P_m : puissance max de la machine

η : Rendement de la machine.

- Rugosité:

$$Ra = \frac{K \cdot f_z^2}{8 \cdot r \cdot V_c^{nc}}$$

K : constante qui dépend du matériau et des conditions d'usage.

n : est un exposant caractérisant l'effet de V_c .

r : rayon de bec de l'outil. [33]

$$\frac{K \times f_z r^2}{8 \times r \times V_{cr^{nc}}} \leq R_{a_r} \text{ pour l'ébauche}$$

$$\frac{K \times f_z s^2}{8 \times r \times V_{cs^{nc}}} \leq R_{a_s} \text{ pour la finition}$$

4. Exemple d'application :

4.1. Présentation de l'acier 30CrMnSiA :

L'acier de construction en alliage est un type d'acier utilisé comme pièces mécaniques et divers composants d'ingénierie, qui contient un ou plusieurs éléments d'alliage.

30CrMnSiA est un carbone moyen avec une résistance élevée et des performances de soudage médiocres.

30CrMnSiA à une résistance élevée et une ténacité suffisante après trempe et revenu, et la trempabilité est également bonne. Après trempe et revenu, le matériau peut être utilisé comme arbre de meule, engrenages et pignons.

30CrMnSiA a une bonne aptitude au traitement, une petite déformation de traitement et une bonne résistance à la fatigue. Pour les pièces d'arbre et de piston, etc. Il est utilisé dans diverses pièces d'usure spéciales telles que les automobiles et les avions.[34]

4.1.1 La composition chimique:

Carbone (C)	Silicium (Si)	Manganèse (Mn)	Phosphore (P)	Soufre (S)	Nickel (Ni)	Chrome (Cr)	Cuivre (Cu)
0,28- 0,34	0,90- 1,20	0,80- 1,10	0,25 maximum	0,25 maximum	≤ 0.40	0.80- 1.10	≤ 0.25

Tableau III 1 : Composition chimique de l'acier 30crmnisia [34]

4.1.2 Propriétés mécaniques :

Limite d'élasticité σ_s /MPa (>=)	Résistance à la traction σ_b /MPa (>=)	Élongation δ_5 /% (>=)	Réduction de aire ψ /% (>=)	Énergie d'absorption d'impact Aku2/J (>=)	Dureté HBS 100/3000 maximum
835	1080	10	45	39	229

Tableau III 2 : Propriétés mécaniques de l'acier 30crmnisia [34].

4.2. Machine-outil utilisé :

Dans notre expérience on a utilisée fraiseuse CNC 3 axe de la marque Harding model V1000, La machine CNC V1000 est un centre d'usinage vertical à commande numérique (CNC), polyvalent, conçu pour des opérations d'usinage de précision.

Elle offre une grande flexibilité, une construction robuste et des fonctionnalités avancées. Grâce à sa commande numérique précise, la V1000 permet une programmation et un contrôle précis des mouvements de l'outil. Elle est équipée d'un système de changement automatique d'outils qui réduit les Temps d'arrêt et améliore la productivité.

Avec son interface utilisateur conviviale, la V1000 facilite la programmation et l'utilisation de la machine, avec des caractéristiques suivant :

X/Y/Z Axes	1020 x 610 x 610 (mm)
Nez de broche à table	100 - 710(mm)
Dimensions de la table	1200 x 600 (mm)
Vitesse de broche (Max)	10000 tr/min
Puissance	41 KW
Charge de table maximale	900 kg
Diamètre d'outil max	75 (mm)
longueur d'outil max	300 (mm)
Poids d'outil max	7 (kg)

Tableau III 3 : Caractéristiques de la machine.



Figure III- 1 : fraiseuse CNC verticale V1000

4.3. Logiciel CAO/FAO utilisé :

Le programme NX est un logiciel de CAO/FAO (Conception Assistée par Ordinateur/Fabrication Assistée par Ordinateur) développé par Siemens PLM Software. Il est largement utilisé dans l'industrie pour la conception de produits, l'ingénierie assistée par ordinateur et la fabrication numérique.

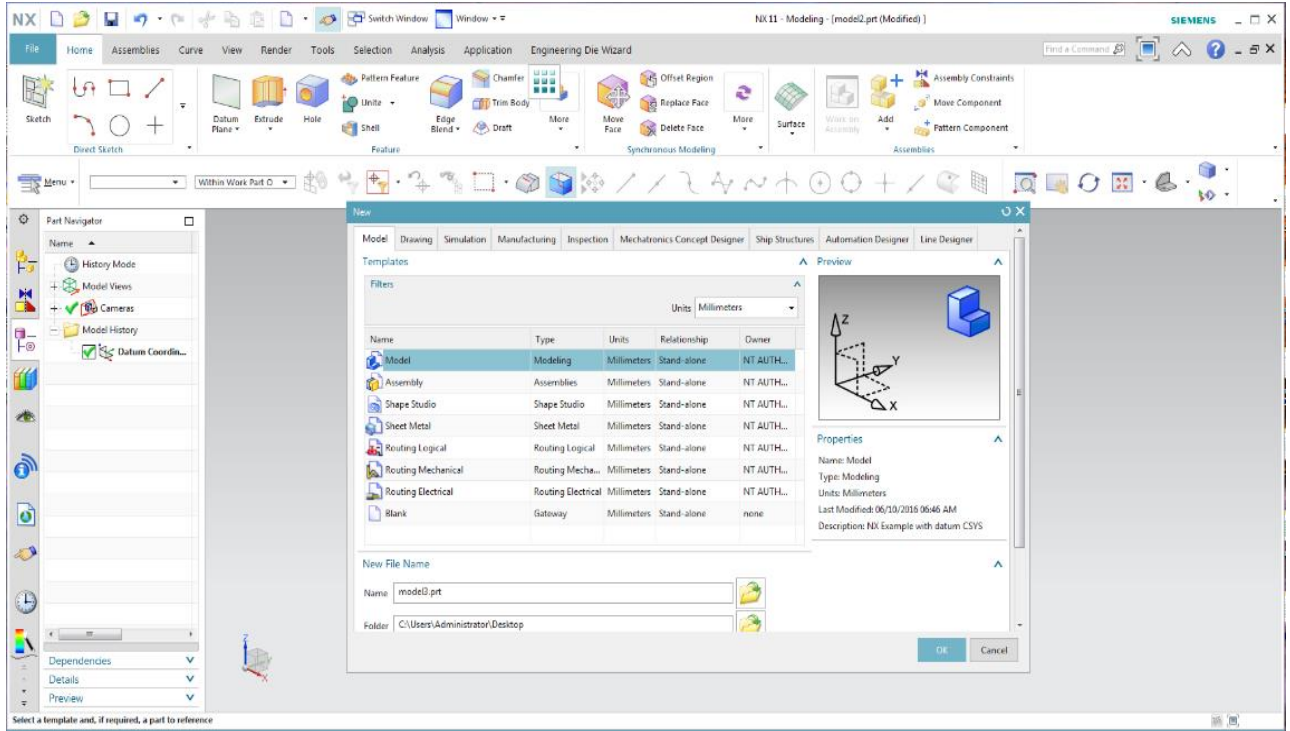


Figure III- 2 : Interface de logiciel NX.

4.4. Les outils utilisés :

-Outils de coupe en carbure métallique diamètre 16 à 3 arrêts de coupe pour faire l'expérience.

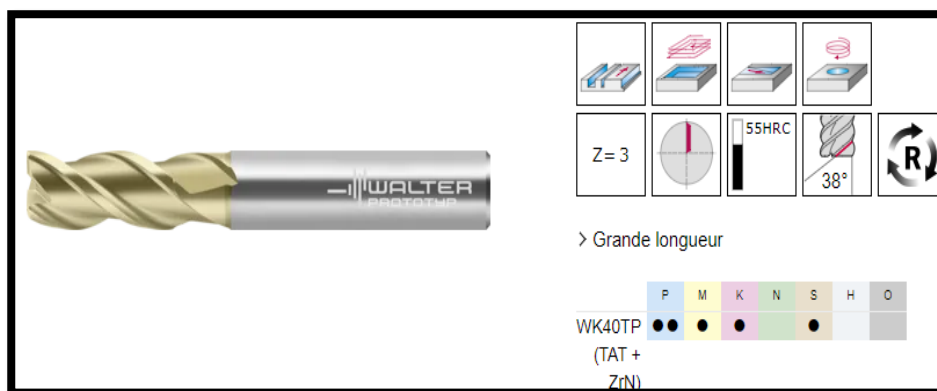


Figure III- 3 : Outil de coupe en carbure.

-Outils de mesures de rugosité de la surface.



Figure III- 4 : Rugosimetre.

5. Les paramètres de fraisage dans l'exemple d'expérience :

Paramètre	Unité	Valeur
Longueur de la pièce	$L(mm)$	110
Diamètre de fraise	$D(mm)$	16
Nombres de dents	Z	3
Plage de vitesses d'avance maximum de la broche	$Vf(mm/min)$	800
Plage de vitesses d'avance minimum de la broche	$Vf(mm/min)$	100
Plage de vitesse maximum de broche	$N_{max}(rpm)$	10000
Plage de vitesse minimum de broche	$N_{min}(rpm)$	1000
La profondeur de passe maximum	$a_{max}(mm)$	9.6
La profondeur de passe minimum	$a_{min}(mm)$	0.2
La vitesse de coupe maximum ébauche	$Vc (m/min)$	60
La vitesse de coupe minimum ébauche	$Vc (m/min)$	150
La vitesse de coupe maximum finition	$Vc (m/min)$	140
La vitesse de coupe maximum finition	$Vc (m/min)$	220
La puissance la machine	$P_m(kw)$	41
Rendement de la machine	η	0.7
Temps de changement d'outil	$Tc (min)$	1
Temps réel de coupe	Tt	1
temps improductif	Ts	1
Nombre de pièces entre deux changements d'outil	P	1

La rugosité maximale finition	$R_{s,max}(\mu m)$	6.3
La rugosité maximale ébauche	$R_{r,max}(\mu m)$	6.3
Largeur de coupe	$h (mm)$	20
Rayon de bac de l'outil	$r (mm)$	0.38
constante qui dépend du matériau et des conditions d'usinage	K	8.64
exposant caractérisant l'effet de VC	nc	0.3

Tableau III 4 : Les paramètres de l'application.

6. Minimisation de temps de production :

Pour chercher les conditions optimales de coupe pour le cas de fraisage en bout nous avons optimisé le temps de production, donc nous avons un problème composé de 6 variables,

Nous avons développé notre modèle d'optimisation des conditions de coupe en utilisant l'algorithme génétique afin de suivre le critère d'optimisation du temps de production sur MATLAB par l'utilisation de la fonction <<ga>> sur l'outil optimisation (Optimization Tool), nous a permis de résoudre notre problème d'optimisation (non-linéaire avec contraintes).

Notre problème d'optimisation est présenté par le modèle mathématique suivant :

$$\ll \text{Minimisé } T_p = \left[\frac{h-as}{ar} \times \frac{8842,24}{f_z r \times 3000 \times V_{cr}} + \frac{8842,24}{f_z s \times 3000 \times V_{cs}} \right] + \left[\frac{8842,24}{f_z r \times 3000 \times V_{cr}} \times \frac{T_{cr}}{0.9 \times (ar^{-0.1}) \times (f_z r^{-0.05}) \times V_{cr}^{-0.3}} \right] + \left[\frac{8842,24}{f_z s \times 3000 \times V_{cs}} \times \frac{T_{cs}}{0.9 \times (as^{-0.1}) \times (f_z s^{-0.05}) \times V_{cs}^{-0.03}} \right] + T_s$$

$$0.0502Nr_{min} \leq V_{cr} \leq 0.0502Nr_{max}$$

$$0.0502Ns_{min} \leq V_{cs} \leq 0.0502Ns_{max}$$

$$0.5 \leq ar \leq 9,6$$

$$0.2 \leq as \leq 1$$

$$\frac{V_{fmin}}{3N_{max}} \leq f_z r \leq \frac{V_{fmax}}{3N_{min}}$$

$$\frac{V_{fmin}}{3N_{max}} \leq f_z s \leq \frac{V_{fmax}}{3N_{min}}$$

$$F_c = k_s \cdot a_{p_r} \cdot a_{e_r} \cdot f_z r \cdot z_r \cdot N_r \leq F_s$$

$$F_c = k_s \cdot a_{p_s} \cdot a_{e_s} \cdot f_z s \cdot z_s \cdot N_s \leq F_s$$

$$\frac{K \times f_z r^2}{8 \times r \times V_{cr}^{nc}} \leq Ra_r$$

$$\frac{K \times f_z s^2}{8 \times r \times V_{cs} n_c} \leq Ra_s \quad \gg$$

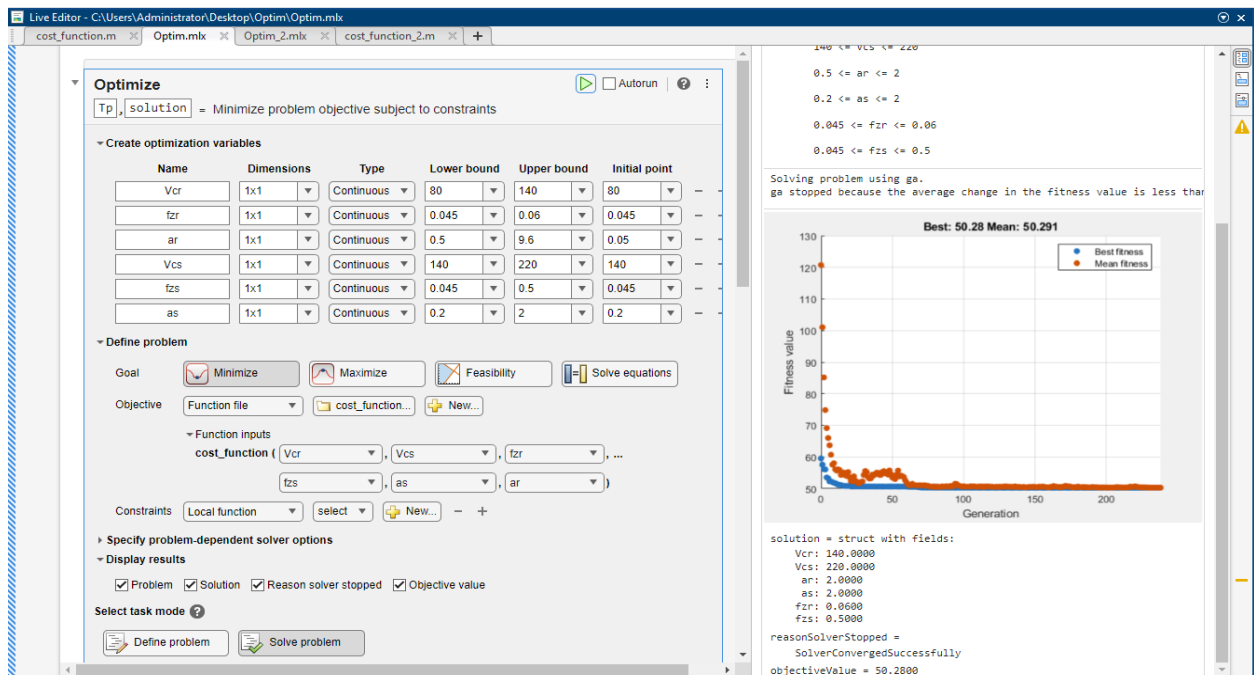


Figure III- 5 : Exemple d'application sur MATLAB.

6.1. Résultats et discussion :

Les tableaux suivants présentent les résultats que nous avons obtenus sur MATLAB pour des profondeurs de coupe totales de 2 mm, 6 mm, 12 mm et 20 mm, À chaque fois, nous avons varié les paramètres de coupe afin d'observer leurs effets sur le temps de production.

Pour **h=2**

N°	Ebauche				Finition				T _{pr} (min)
	ar (mm)	Vcr (m/min)	fzr (mm/dent)	Ra (µm)	as (mm)	Vcs (m/min)	fz s (mm/dent)	Ra (µm)	
1	1	70	0.07	3.893	1	150	0.06	2.570	7.88
2	1	150	0.1	6.321	1	150	0.1	6.321	7.33
3	1.5	120	0.1	6.759	1	140	0.1	6.453	7.54
4	1.5	100	0.09	5.782	1	140	0.1	6.453	7.43

Tableau III 5 : Temps de production pour h=2.

Pour **h=6**

N°	Ebauche				Finition				T_p (min)
	ar (mm)	V_{cr} (m/min)	fz_r (mm/dent)	Ra (μm)	as (mm)	V_{cs} (m/min)	fz_s (mm/dent)	Ra (μm)	
1	2	120	0.09	5.474	1.5	140	0.1	6.453	14.03
2	2	110	0.09	5.619	1.5	140	0.1	6.453	14.09
3	2	110	0.09	5.619	1.5	150	0.1	6.321	13.93
4	4	110	0.05	1.734	2	180	0.07	2.932	13.08

Tableau III 6 : Temps de production pour h=6.

Pour **h=12**

N°	Ebauche				Finition				T_p (min)
	ar (mm)	V_{cr} (m/min)	fz_r (mm/dent)	Ra (μm)	as (mm)	V_{cs} (m/min)	fz_s (mm/dent)	Ra (μm)	
1	4	90	0.06	2.652	2	180	0.07	2.932	25.16
2	4	100	0.06	2.570	2	180	0.07	2.932	23.31
3	4	100	0.06	2.570	2	220	0.07	2.761	22.79
4	5	110	0.06	2.497	1	220	0.05	1.480	21.21

Tableau III 7 : Temps de production pour h=12.

Pour **h=20**

N°	Ebauche				Finition				T_p (min)
	ar (mm)	V_{cr} (m/min)	fz_r (mm/dent)	Ra (μm)	as (mm)	V_{cs} (m/min)	fz_s (mm/dent)	Ra (μm)	
1	2	140	0.06	2.652	2	220	0.05	1.408	50.28
2	3	150	0.06	2.570	2	220	0.05	1.408	25.00
3	4	120	0.08	2.570	1	180	0.05	1.496	29.36
4	4	120	0.08	2.497	1	180	0.08	3.8303	27.56

Tableau III 8 : Temps de production pour h=20.

Commentaire :

D'après les résultats obtenus, on remarque que lorsque la vitesse de coupe est augmentée, le temps de production diminue. De même, lorsque la vitesse d'avance est augmentée, le temps diminue également, mais la rugosité augmente, entraînant un mauvais état de surface. De plus, lorsque la profondeur de passe est augmentée, le nombre de passes de l'opération diminue. Ainsi, lorsque le nombre de passes diminue, le temps de production diminue également, De là nous concluons que les paramètres de coupe optimal est $V_c=150$ m/min, $f_z \leq 0.1$ mm/dent et a_p le max possible pour l'ébauche et pour finition $V_c=220$ m/min, $f_z \leq 0.05$ mm/dent et a_p pour une seul passe.

7. Application pratique :

Dans l'expérience sur le terrain, nous avons vérifié les résultats obtenus sur Matlab lors de l'opération de l'ébauche. Nous avons fixé la profondeur de passe et varié la vitesse de coupe pour observer l'effet de cette dernière sur la rugosité de la surface.

Selon le catalogue d'outils Walter que nous avons consulté, nous avons choisi une plage de vitesses de coupe liée au matériau et au diamètre de l'outil utilisé.

Solid carbide															
Family	Des.	λ	Page	Family	Des.	λ	Page	Family	Des.	λ	Page	Family	Des.	λ	Page
HSC 30	H8095918	30°	E 156	Mini HSC 30	H4044919	30°	E 162	Ultra HSC 30	H4044928	30°	E 163	ConeFit™	H3E93718	50°	E 137
				HSC 30	H8095919	30°	E 157	Ultra HSC 30 (40-63 HSC)	H8015728	30°	E 157	Flash	H3E94718		E 137
									H8015828		E 155	Flash	H3094718	50°	E 138
Dia. 4 – 12 Z = 2 + 4				Dia. 0.4 – 12 Z = 2 + 4				Dia. 0.4 – 16 Z = 2 + 4				Dia. 4 – 25 Z = 3 + 4			
TAX				DIA				TAX				uncoated + TAX			
1/1	a_p / D_c 1/10	1/20	VT	1/1	a_p / D_c 1/2	1/4	VT	1/1	a_p / D_c 1/10	1/20	VT	1/1	a_p / D_c 1/2	1/4	VT
130	220	250	A									100	140	150	D
130	210	240	A									80	110	120	D
110	180	210	A									80	110	120	D
110	180	210	A									80	110	120	D
80	140	150	A									70	90	100	D
110	180	210	A									80	110	120	D
110	180	210	A									80	110	120	D
80	140	150	A									70	90	100	D
70	110	120	A									50	60	70	D
60	100	100	A					130	210	220	A	50	60	70	D
110	180	210	A									80	110	120	D
80	140	150	A									70	90	100	D
50	100	100	A									50	60	70	D
40	60	70	A									40	50	50	D
30	50	50	A									30	30	40	D
												40	60	60	D
												30	30	40	D

Figure III- 6 : Vitesse de coupe Walter [37].

La désignation de la matière à usinée c'est P7 donc la vitesse de coupe V_c minimum est 60 m/min et V_c maximum est 120 m/min.

La profondeur de passe $a_p = 2$ mm.

La vitesse d'avance par de $f_z = 0.1$ mm/dent.

Le temps improductive $T_s=27\text{min}$.

Le temps de changement d'outil $T_c =5\text{min}$.

On a dessinés la pièce dans logiciel NX11 et on a fait la simulation de l'opération.

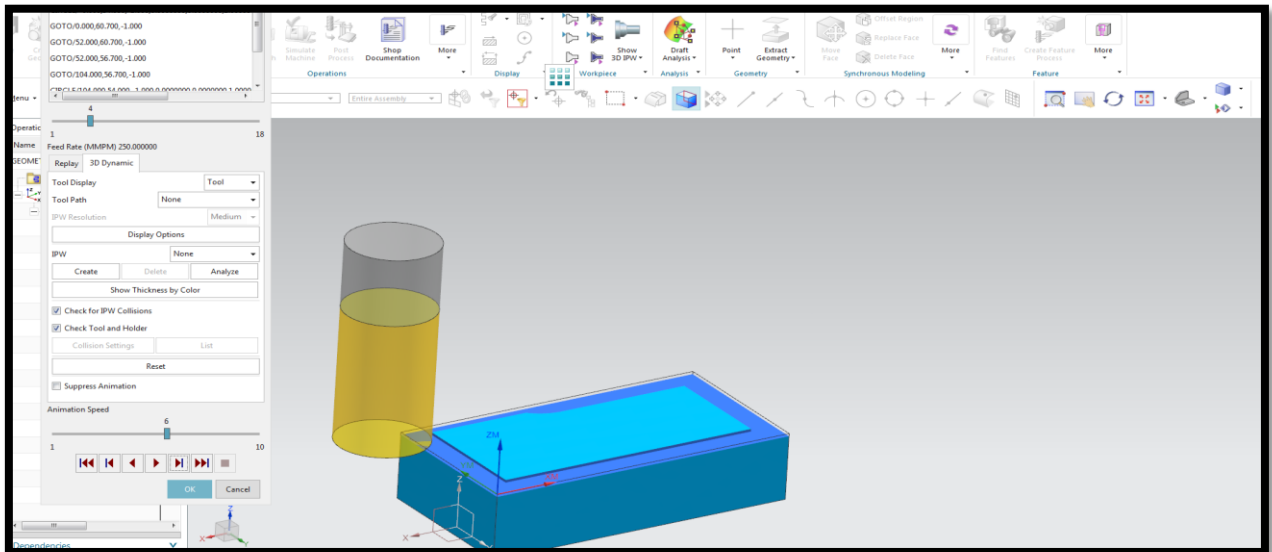


Figure III- 7 : La simulation de l'opération.

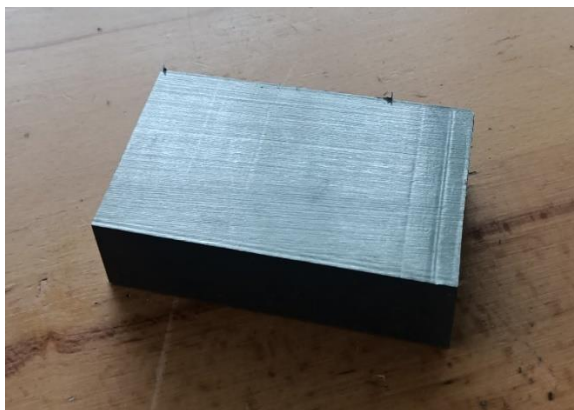


Figure III- 8 : La pièce brute.

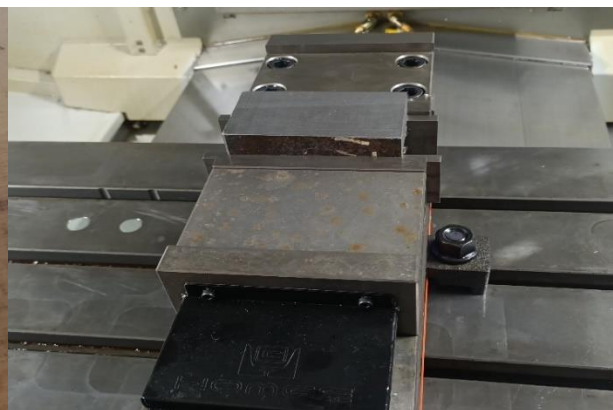


Figure III- 9 : Montage pièce étiau.

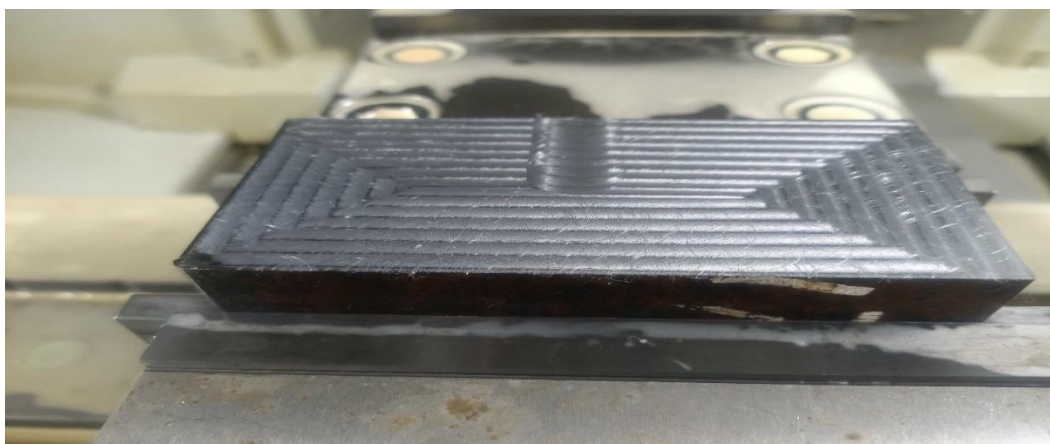


Figure III- 10 : La surface usinée.

7.1. Les valeurs des résultats sur Matlab :

N°	Ebauche					T_{pr} (min)
	n	a_r (mm)	V_{c_r} (m/min)	$f_z r$ (mm/dent)	Ra (μm)	
1	1	2	80	0.06	1.5457	38.55
2	1	2	90	0.06	1.4921	38.13
3	1	2	100	0.06	1.4457	37.09
4	1	2	110	0.06	1.4049	36.55
5	1	2	120	0.06	1.3687	36.09

Tableau III 9 : Résultats de l'expérience sur Matlab

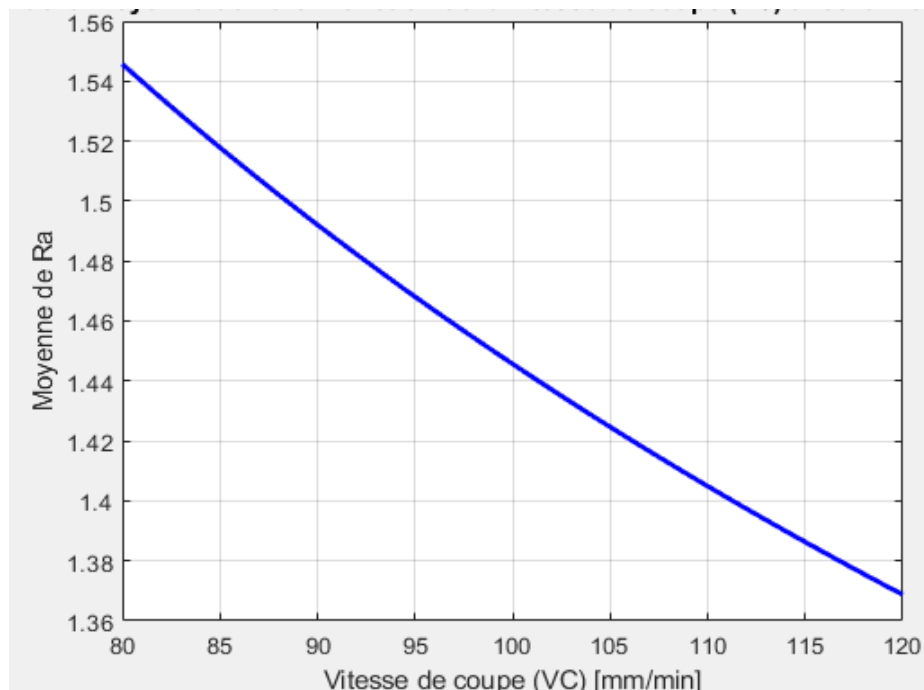


Figure III- 11 : Variation de Ra en fonction de la vitesse de coupe Vc théorique.

On peut observer que le temps de production diminue à mesure que la vitesse de coupe augmente. Cela est intuitif car à une vitesse de coupe plus élevée, la pièce est usinée plus rapidement. Ainsi, le temps nécessaire pour usiner une pièce diminue.

La rugosité de surface diminue également à mesure que la vitesse de coupe augmente. Cela est généralement attendu car une vitesse de coupe plus élevée peut réduire les vibrations et améliorer la qualité de la surface. Cependant, il y a une limite à cela, car une vitesse de coupe excessive peut également entraîner une augmentation de la température et une détérioration de la qualité de la surface.

La valeur optimale à cette expérience est l'essai N° 05 au tableau car elle donne le meilleur temps de production (36.09 min) et meilleur rugosité (1.3687 μm) par les conditions de coupe suivant : $V_c=120$ (m/min), $f_z=0.06$ (mm/dent), $a_r =2$ (mm).

7.2. Influence de vitesse de coupe sur l'état de surface :

Vitesse de coupe (Vc)	Ra (μm)	Ra (μm) (moyen)
80	2.74	2.73
	1.96	
	3.49	
90	2.19	2.26
	2.49	
	2.11	
100	1.53	2.16
	2.35	
	2.62	
110	2.66	2.06
	1.48	
	2.04	
120	2	1.58
	0.83	
	1.93	

Tableau III 10 : les valeurs réel de Ra.

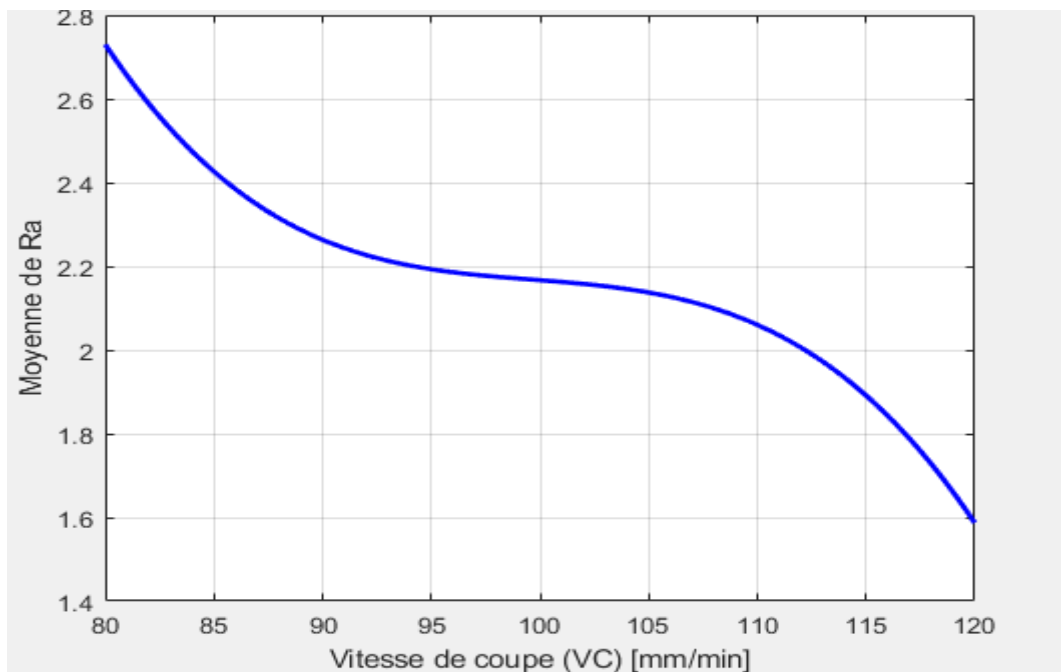


Figure III- 12 : Variation de Ra en fonction de la vitesse de coupe Vc pratique.

En comparant les valeurs théoriques et réelles de la rugosité de surface (Ra) en fonction de la vitesse de coupe (Vc), quelques observations peuvent être faites :

Les valeurs réelles de Ra suivent généralement la même tendance que les valeurs théoriques. Cela signifie que, dans l'ensemble, à mesure que la vitesse de coupe augmente, la rugosité de surface diminue, ce qui est conforme à ce que l'on pourrait attendre.

Cependant, il y a des écarts significatifs entre les valeurs théoriques et réelles de Ra. Par exemple, à une vitesse de coupe de 80 m/min, la valeur réelle de Ra (2.73 μm) est nettement plus élevée que la valeur théorique (1.5457 μm). De même, à 120 m/min, la valeur réelle de Ra (1.58 μm) est inférieure à la valeur théorique (1.3687 μm).

Ces écarts peuvent être attribués à divers facteurs, notamment :

Conditions réelles de la machine : Les conditions réelles de la machine, telles que la rigidité de la machine, les vibrations, les erreurs d'alignement, etc., peuvent influencer la qualité de la surface usinée.

Variation des matériaux : Les matériaux réels peuvent présenter des propriétés différentes de celles utilisées pour calculer les valeurs théoriques. Des variations dans la composition, la microstructure ou la dureté du matériau peuvent affecter le processus d'usinage et la qualité de la surface.

Variabilité des outils : La qualité des outils, leur usure et leur géométrie peuvent varier dans des conditions réelles d'usinage, ce qui peut également influencer la rugosité de surface obtenue.

8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'algorithme génétique pour ajuster les paramètres de coupe sur l'acier 30CrMnSiA. En manipulant ces paramètres avec Matlab, nous avons examiné comment ils affectent le temps de production et la qualité de la surface. Ensuite, nous avons réalisé une expérience pratique en utilisant une fraiseuse CNC à 3 axes (V1000) et le logiciel CFAO NX 11 pour comparer les résultats théoriques et réels.

La vitesse de coupe (V_c) et l'avance par dent (f_z) sont deux paramètres cruciaux dans l'usinage, pouvant avoir une influence significative sur la rugosité de la surface Ra et le temps de production.

- Une augmentation de la vitesse de coupe (V_c) tend à réduire à la fois le temps de production et la rugosité R_a , en améliorant la qualité de la coupe.
- Une avance par dent plus élevée réduit également le temps de production, mais peut entraîner une rugosité de surface plus faible.
- Augmenter la profondeur de passe réduit le temps de production en minimisant le nombre de passes nécessaire

CONCLUSION GENERALE

Cette étude se concentre principalement sur l'optimisation des conditions de coupe en fraisage, Tout d'abord, nous avons étudié de manière générale le processus de fraisage et lors paramètres technologiques, en suit on a présenté l'optimisation des conditions de coupe et leur méthode et critère ce qui nous a permis de développer un modèle de sélection optimale des conditions de coupe afin de réduire au minimum le temps total de production. Ce schéma mathématique illustre de manière précise les propriétés et les capacités du système machine-outil-pièce. De plus, il repose sur la mise en place de variables combinatoires afin de présenter la possibilité d'une passe dans le programme final d'usinage. Ensuite, en optant pour un exemple d'application, on résoudre le problème en utilisant des algorithmes génétiques, qui sont intégrés à MATLAB. Cet exemple met en évidence plusieurs scénarios d'application et leur influence sur l'état de surface ainsi que sur le temps total de production, en fonction de différentes surépaisseurs d'usinage. Chaque scénario est caractérisé par une surépaisseur d'usinage spécifique.

Les résultats obtenus ont confirmé les avantages de notre méthodologie de modélisation, soulignant l'importance de la maîtrise des outils mathématiques pour résoudre les défis industriels. De plus, ils ont démontré l'efficacité des algorithmes utilisés, en particulier les algorithmes génétiques, pour résoudre des problèmes d'optimisation non linéaires avec des contraintes

BIBLIOGRAPHIE

1. S. Benlahmidi, H. Aouici, Tournage, TP Production/ 2ème année GM&P, Ecole Nationale Supérieure de Technologie.
2. Souhir GARA <<Cours interactif : Le Fraisage>> Tunisie, Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul, 2015-2016.
3. Izzeddine AOUASSA << Mémoire : Etude de la gamme d'usinage d'un support d'enrouleuse de tôles et étude de l'effet des paramètres de fraisage sur la rugosité >> Algérie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2013-2014.
4. Mohamed DJENNANE <<Thèse : Optimisation de l'usinage multi passes et multi stage par la méthode du simplexe et la méthode des algorithmes génétiques>> Algérie, Université de Batna 2.
5. <https://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>.
6. Mohamed El Haddi TAHRAOUI << Mémoire : Contribution à l'amélioration de la qualité d'usinage en fraisage à sec>> Algérie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
7. ROYAUME DU MAROC. Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail Direction Recherche et Ingénierie de la Formation, RÉSUMÉ THÉORIQUE & GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES, MODULE 2 : Fabrication de pièces d'usinage simples en fraisage.
8. <https://www.vaco-france.com/guide-materiaux-pour-outils-de-coupe-en-usinage>.
9. <http://www.usinage.wikibis.com/fraiseuse.php>.
10. R. Butin, M. Pinot, Fabrication Mécanique Technologie, Tome 3, Foucher, Paris, 1998.
11. NANGA NDEDI HENRIETTE-DUT2 option GMP- IUT DE DOUALA 2011-2012 Etude de fabrication d'un serre-cable-serre-bâche-camion-13
12. <https://www.runsom.com/fr/blog/horizontal-vs-vertical-milling>
13. Brigitte REMACLE, Bld Reyers << Usinage Tournage Fraisage>> Bruxelles, 2014.
14. <https://www.followmachines.com/fr/catalogue/fraiseuse-avec-coulisseau-motorise-follow-fcm2000/>
15. Ecole nationale d'ingénieurs de Brest Etudes des Mécanismes - S1 module 3 : fabrication
16. https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/chapitre_2_4_2_3. Préparation de Production en Productique Mécanique - Étude de Fabrication et Analyse d'Usinage (3PM-EFAU).
17. Technique ingénieur 2001.
18. Cours Procédés de fabrication 2010 Master I.

19. Florea FLORIAN << Résumé théorique & guide de travaux pratiques >> Maroc, Direction Recherche et Ingénierie de la Formation.
20. Document extrait du manuel de formation SANDVIK .Formules et définitions
21. <http://www.univbejaia.dz/dspace/bitstream/handle/123456789/112/Memoire%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
22. Ahmed AZZAOUI Ahmed <<Mémoire : Optimisation multicritère des conditions de coupe en fraisage>> Algérie, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
23. <http://www.educatim.fr>
24. [https://nte.mines-albi.fr/Optimisation/fr/co/OIntro_Classification.html]
25. Méthodes Numériques : Optimisation Cours de L3, 2020-2021 Université Paris-Dauphine David Gontier (version du 7 mai 2021).
26. Référence du développement : Rouvière [2, p.140] Méthode de Newton Julie Parreaux 2018-2019
27. Méthodes Quasi-Newton Michel Bierlaire michel.bierlaire@epfl.ch
28. Manuel de Cours Optimisation Par : Dr. Meche Abdelkrim 2021-2022
29. https://www.jmp.com/fr_ca/whitepapers/doe-goupy.html
30. Thèse Hassan KHALIL << Développement des techniques d'optimisation de forme pour la conception de composants hyperfréquences >> Université de Limoges 2009
31. Pr. B. Benmohammed cours DUREE DE VIE D'UN OUTIL DE COUPE : LOI DE TAYLOR Université Batna 2 – MB 2022/2023
32. .S.BENSAADA cours coupe des métaux université de Biskra
33. Machining and machine tools by a. b. chattopadhyay.
34. <https://www.gneesteel.com/fr/products/steel-profile/steel-round-bars/30crmnsia-hot-rolled-steel-sheet.html>.
35. https://cuttingtools.ceratizit.com/fr/fr/connaissance-en_usinage/tournage/conseiller/choix-plaquette.html
36. Seco Tools <https://www.secotools.com> › article Désignation ISO pour les plaquettes
37. Walter paramètre de coupe.
38. "Algorithmes génétiques" par Jean-Marc Alliot et Evelyne Lutton (1994)