

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار – معنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Génie mécanique

Domaine : SCIENCES TECHNOLOGIES

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Influence des paramètres de coupe sur la rugosité
de surface lors du fraisage de l'acier Z200C12

Présenté par : NESSAIFIA ANIS

Encadrant : *Benchiheub Slimane Grade MCA Université Badji Mokhtar*

Jury de Soutenance :

Mr. A. NEHAL	MCA	Université Badji Mokhtar	Président
Mr. S. BENCHIHEUB	MCA	Université Badji Mokhtar	Encadrant
Mr. R. BOUZIANE	MCB	Université Badji Mokhtar	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

*Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance au Docteur **BENCHIHEUB SLIMANE**, mon directeur de mémoire, pour son encadrement attentif, sa disponibilité constante et la richesse de ses conseils tout au long de ce travail. Son appui méthodologique et humain a joué un rôle déterminant dans l'aboutissement de ce projet. Je remercie également les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail. Leurs observations pertinentes et leurs suggestions constructives seront précieuses pour la suite de mon parcours académique et professionnel.*

Enfin, j'adresse mes chaleureux remerciements à toutes celles et ceux qui m'ont soutenu(e), encouragé(e) ou accompagné(e) de près comme de loin au fil de cette aventure.

Dédicace

*Je souhaite dédier ce travail, humble reflet d'un long chemin
parcouru,*

*À mes parents, dont l'amour inépuisable, le soutien discret et les
sacrifices silencieux ont été les piliers de ma réussite.*

*À ma famille, toujours présente par ses paroles réconfortantes et sa
bienveillance constante.*

*À mes amis de cœur, pour leur présence sincère, leur écoute et les
instants partagés qui ont allégé les moments de doute.*

*Et à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et
m'ont offert leur confiance*

Résumé

Ce document aborde les procédés d'usinage et de traitements thermiques appliqués aux matériaux, en particulier l'acier. Il est structuré en trois chapitres. Le premier présente les notions de base sur l'usinage, les types de fraisage, les paramètres de coupe et l'impact sur la qualité des surfaces. Le deuxième chapitre traite des différents traitements thermiques comme la trempe, le revenu et le recuit, en détaillant les méthodes de chauffage, de maintien et de refroidissement. Le troisième chapitre expose une étude expérimentale sur le matériau Z200C12, incluant les conditions d'usinage et les effets des traitements thermiques. Ce travail met en évidence l'importance de l'optimisation des procédés pour améliorer la performance des matériaux usinés.

العام الملخص

يقدم فصول ثلاثة من يتكون. الفولاذ خاصة المواد، على المطبقة الحرارية والمعالجات التشغيل عمليات البحث هذا يتناول الفصل أما. السطح جودة على وتأثيرها القطع ومعايير التفريز، وأنواع التشغيل، عمليات حول أساسية مفاهيم الأول الفصل يعرض. والتبريد والتثبيت التسخين لطرق شرح مع والمراجعة، والتقسية، التخمير، مثل الحرارية المعالجات فيتناول الثاني العمل هذا يبرز. الحرارية المعالجة وتأثير التشغيل شروط تشمل، Z200C12 المادة على تجريبية دراسة الثالث الفصل المشغلة المواد كفاءة رفع أجل من العمليات تحسين أهمية.

Summary (English)

This document focuses on machining and heat treatment processes applied to materials, especially steel. It is structured into three chapters. The first chapter covers fundamental concepts of machining, milling types, cutting parameters, and their impact on surface quality. The second chapter discusses various heat treatments such as quenching, tempering, and annealing, detailing heating, soaking, and cooling methods. The third chapter presents an experimental study on the Z200C12 material, including machining conditions and the effects of thermal treatments. This work highlights the importance of process optimization to enhance the performance of machined materials.

SOMMAIRE

I.1 Notions générales sur l'usinage	1
I.1.1 Introduction à l'Usinage.....	1
I.1.2 L'usinage sans enlèvement de matière.....	1
I.1.3 L'usinage par enlèvement de matière.....	1
I.1.4 Les Procédés d'usinage.....	2
I.1.5 Objectifs de l'usinage.....	2
I.2 Fraisage.....	3
I.2.1 Définition.....	3
I.2.2 Fraisage en opposition et en concordance.....	3
I.2.3 Caractéristiques du fraisage.....	4
I.2.4 Fraisage en bout et fraisage en roulant ...	5
I.3 Fraiseuse.....	5
I.3.1 Les paramètres de coupe.....	6
I.3.2 Choix du matériau de l'outil de coupe.....	7
I.3.3 Différentes parties de l'outil de coupe.....	8
I.3.4 Les conditions de coupe.....	9
I.3.5 La vitesse de coupe (V_c en m/min)	9
I.3.6 La vitesse d'avance V_f et avance par tour f	10
I.3.7 La profondeur de passe axiale (a_p) et profondeur de coupe radiale (a_e).....	10
I.4 La rugosité des surfaces usinées.....	11
I.4.1 La rugosité.....	11
I.4.2 Principaux défauts de surface.....	11
I.4.3 Principaux critères de rugosité.....	12
I.4.4 Usure et dégradation des outils de coupe.....	13
I.4.5 Mesure de la rugosité des surfaces	15
I.4.6 Évaluation de la rugosité de surface.....	15
I.7 Conclusion.....	17

CHAPITRE II

II.1 Introduction.....	18
II.2 Procédés des traitements thermiques.....	18
II.2.1 Définition.....	18
II.2.2 Procédés des traitements thermiques.....	18
II.2.3.1 Chauffage des pièces.....	19
II.2.3.2 Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques.....	20
II.2.3.3 Refroidissement des pièces.....	20
II.3 Gammes des traitements thermiques de l'acier.....	20
II.3.1 Trempe.....	21
II.3.1.1 Types de trempe.....	21
II.3.1.3 Technologies de chauffage.....	22
II.3.1.4 Choix de temps de maintien.....	23
II.3.1.5 Milieux de trempe.....	23
II.3.2 Revenu.....	24
II.3.3 Recuit.....	26
II.3.3.1 Différents types de recuit.....	27
II.4 Conclusion.....	29

CHAPITRE III

II.1 Introduction.....	30
III.2 Méthodologie expérimentale.....	30
III.2.1 Étude du matériau Z200C12.....	30
III.2.2 Préparation des échantillons.....	31
III.2.3 Fours de Traitement Thermique (TTH).....	32
III.2.4 Traitements thermiques.....	33
III.2.5 Nuance de la plaquette.....	33
III.2.6 Conditions d'usage.....	35
CONCLUSION GENERALE.....	38

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Procédé de fraisage.....	3
Figure I.2 : Fraisages en opposition et en concordance.....	3
Figure I.3 : Fraisage en bout et fraisage en roulant.....	5
Figure I.4 : Fraiseuse Universelle	6
Figure I.5 : Phénomène de la coupe	6
Figure I.6 : Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant	8
Figure I.7 : L'outil de fraisage	8
Figure I.8 : Vitesse de coupe	9
Figure I.9 : Vitesse d'avance	10
Figure I.10 : Profondeur de passe	11
Figure I. 11 : Principaux défauts de surfaces	12
Figure I. 12 : Rugosité arithmétique	13
Figure I. 13 : Usure en dépouille	13
Figure I. 14 : Usure en cratère	13
Figure I. 15 : Déformation plastique	14
Figure I.16 : Écaillage	14
Figure I. 17 : Usure en entaille	15
Figure I.18 : Arête rapportée	15
Figure I.19 : Profilomètre	16
Figure I.20 : Appareille de mesure tridimensionnelle.....	17

CHAPITRE II

Figure II.1 Cycle d'un traitement thermique.....	19
Figure II.2 : La courbe de chauffage	19
Figure II.3 : Cycle thermique lors d'une trempe	23
Figure II.4 : Cycle thermique complet d'une trempe et revenu	24
FigureII.5 :Cyclet hermique d'un recuit comprend.....	27

CHAPITRE III

Figure III.1 Débitage.....	31
Figure III.2 Fraiseuse verticale	32
Figure III.3 Four électrique	32
Figure III.4 quatre échantillons dans un four THERMIDOR.....	33
Figure III.5 Plaquette utilisée	33
Figure III.6 Fraiseuse type HURON GRAFFNSTADEN MU5	35
Figure III.7 Rugosimètre (Someco RT10 plus).	35
Figure III.8 Influence de la fréquence de rotation N en fonction de la rugosité Ra.....	36
Figure III.9 Influence de la Profondeur de passe ap en fonction de la rugosité Ra.....	37
Figure III.10 Influence de la Profondeur de passe ap en fonction de la rugosité Ra.....	38

Introduction Générale

L'usinage regroupe un ensemble d'opérations et de techniques permettant de fabriquer des pièces aux formes et dimensions précises grâce à l'utilisation de machines-outils. Cette méthode offre la possibilité de produire des pièces complexes avec une grande précision, tout en préservant les propriétés intrinsèques du matériau usiné.

En règle générale, les procédés de fabrication mécanique visent à améliorer les caractéristiques mécaniques et géométriques des surfaces usinées afin de répondre aux exigences techniques spécifiques et aux conditions d'utilisation. Pour cela, il est nécessaire de préparer l'acier en fonction de son application, notamment pour l'usinage, ce qui demande une étude approfondie des domaines d'application ainsi que des conditions de travail, afin d'adapter ses propriétés mécaniques.

La voie la plus courante pour atteindre ces propriétés optimales consiste soit à modifier la composition chimique de l'acier par l'ajout d'éléments d'alliage, soit à réaliser des traitements thermiques qui transforment sa structure interne. Ce dernier aspect constitue le cœur de notre étude. Plus particulièrement, notre recherche porte sur l'amélioration des propriétés mécaniques de l'acier Z200C12 à travers des traitements thermiques tels que la trempe et le revenu.

Par ailleurs, lors de la fabrication, il est rare que les surfaces obtenues soient parfaitement lisses. Elles présentent généralement des traces laissées par le déplacement de l'outil ou les vibrations de la machine-outil, ce qui se traduit par des défauts de surface, notamment la rugosité R_a . Ce travail s'intéresse donc à l'impact des paramètres de coupe sur la rugosité de surface R_a lors du fraisage de l'acier Z200C12 à une température de 200°C.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Notions générales sur l'usinage

L'usinage est une méthode de production qui vise à diminuer progressivement les dimensions de l'objet par élimination de la matière à basse température et sans déformation, en faisant appel à un instrument de coupe. La quantité de matière enlevée et dite copeaux et l'instrument avec lequel est enlevée la matière est appelé outil de coupe. L'opérateur utilise des machines dites machines-outils pour réaliser l'usinage d'une pièce [1].

I.1.1 Introduction à l'usinage

Le terme « usinage » englobe une large variété de méthodes de production. On distingue diverses méthodes d'usinage, parmi lesquelles :

- Techniques de déformation : forgeage, thermoformage, pliage ;
- Techniques de découpe : découpe laser, oxycoupage ;
- Procédés d'élimination de matière : tournage, fraisage, électroérosion. On peut appliquer ces méthodes sur presque tous les genres de matériaux. Le travail de précision est fréquemment employé dans la production de pièces uniques, prototypes opérationnels, mais aussi pour la confection de composants de moteurs ou d'équipements.

I.1.2 L'usinage sans enlèvement de matière

Le processus de fabrication de pièces prêtes à l'usage dans l'industrie, à partir de composants semi-finis ne nécessitant pas d'élimination de matière, est appelé usinage sans enlèvement de copeaux. En fait, même s'il est communément appelé usinage, il serait plus juste de le qualifier de fabrication ou de formage sans enlèvement de copeaux, car l'usinage implique effectivement la suppression de matière, que ce soit par coupe ou par abrasion.

I.1.3 L'usinage par enlèvement de matière

L'usinage est le processus de suppression de matière pour façonner la pièce initiale selon le modèle désiré, à l'aide d'une machine-outil. Cette méthode permet d'obtenir des pièces d'une grande précision. Durant le processus d'usinage d'un composant, l'élimination de matière s'effectue grâce à la combinaison de deux déplacements relatifs entre le composant et l'instrument : la vitesse de coupe (vitesse de coupe) et la vitesse d'avance (vitesse d'avance V_f). On distingue plusieurs sortes de procédés d'usinage. Les opérations de tournage, fraisage et perçage sont particulièrement essentielles et répandues dans les secteurs

industriels, notamment l'automobile et l'aéronautique (Figure I.1). La recherche exposée concerne la méthode de tournage.

I.1.4 Les Procédés d'usinage

Les procédés d'usinage peuvent être classés selon plusieurs critères qui permettent de mieux comprendre la manière dont chaque technique est utilisée et son application dans la fabrication. Voici une reformulation plus claire de ces critères :

➤ **Chronologie d'apparition des procédés :**

Procédés traditionnels : Ceux qui ont été développés au cours de l'histoire de l'usinage, comme le tournage, le fraisage ou le perçage, généralement basés sur des techniques mécaniques classiques.

Procédés non traditionnels : Ces procédés ont émergé plus récemment avec l'évolution des technologies et de la recherche. Ils incluent des techniques comme l'usinage par faisceau laser, électroérosion, usinage à haute pression, etc.

➤ **Nature des phénomènes physiques en jeu :**

Procédés de coupe : Cela inclut les procédés où un outil coupant interagit avec le matériau pour en retirer des copeaux (tournage, fraisage, etc.).

Procédés par abrasion : Ici, l'usure du matériau se fait par frottement entre l'outil et la pièce (rectification, polissage, etc.).

Procédés physico-chimiques : Ces procédés se basent sur des phénomènes physiques ou chimiques pour altérer les propriétés du matériau (ex : électroérosion, usinage par jet d'eau, etc.).

Type d'outils et de machines utilisés :

En fonction des outils et des équipements employés, les procédés peuvent être différenciés. Par exemple, dans un tour, l'outil de coupe est fixe et la pièce tourne, tandis que dans un fraiseur, l'outil de coupe tourne et la pièce peut être déplacée dans plusieurs directions.

Les machines peuvent également être spécialisées selon les opérations spécifiques à réaliser : pour le perçage, on utilise des perceuses, pour la rectification, des rectifieuses, etc.[3].

I.1.5 Objectifs de l'usinage

Le but de l'usinage est principalement de transformer un matériau brut (souvent métallique, mais aussi plastique, céramique, etc.) en une pièce conforme aux exigences techniques et dimensionnelles spécifiées dans un plan de fabrication. Cela inclut la réalisation de formes complexes, l'obtention de tolérances très précises, ainsi que l'amélioration des propriétés de la surface de la pièce.

I.2 Fraisage

I.2.1 Définition

Le fraisage est, fondamentalement, une technique de production mécanique par enlèvement de matière qui combine le mouvement tournant d'un outil à plusieurs tranchants (mouvement de coupe) avec la progression rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). Cependant, de nos jours, on observe également que l'outil peut être déplacé par rapport à la pièce, ce qui permet un mouvement presque dans n'importe quelle direction. [5].

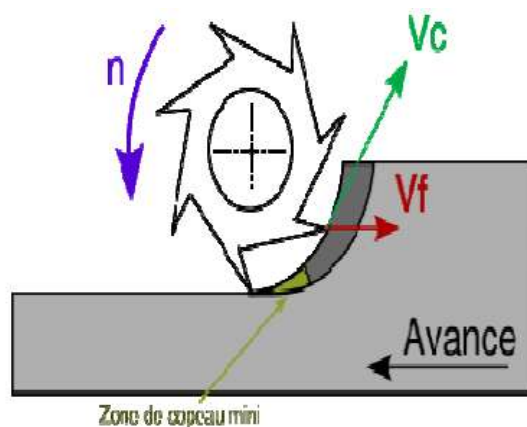
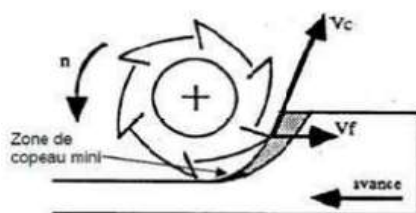


Fig I.1 Procédé de fraisage [5]

I.2.2 Fraisage en opposition et en concordance

- **Fraisage en opposition**

L'avance de la dent est opposée à l'avance de la pièce



- **Fraisage en concordance**

L'avance de la dent de même sens que l'avance de la pièce

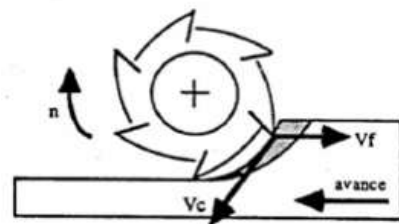


Fig I.2 Fraisages en opposition et en concordance [6]

I.2.3 Caractéristiques du fraisage

- **Fraisage en opposition (ou "contre-fraisage") :**

- L'outil engage la matière avec une épaisseur de copeau quasi nulle au début de la coupe, ce qui peut provoquer un refus d'enlèvement de matière (lié au copeau minimum requis).
- Ce phénomène génère un frottement accru entre l'outil et la surface, accélérant ainsi son usure.
- La dent de la fraise intervient sur une surface déjà durcie mécaniquement par le passage de la dent précédente (écrouissage).
- Les efforts de coupe sont généralement élevés, et dans certains cas, la matière peut résister à l'attaque de l'outil.
- Ces efforts s'exercent de manière à soulever la pièce, ce qui peut la déstabiliser si le bridage est insuffisant.
- Ce mode de fraisage reste néanmoins indispensable sur les machines-outils équipées de vis sans dispositif de compensation du jeu[6].

- **Le fraisage en concordance (ou "fraisage en avalant")**

- La dent de l'outil entre dans la matière en attaquant directement avec l'épaisseur maximale du copeau, ce qui élimine le risque lié au copeau minimum.
- La dent sort de la matière en laissant une épaisseur nulle, mais comme le copeau est déjà formé, cela rend la fin de coupe plus fluide.
- L'attaque brutale due à l'épaisseur initiale maximale peut provoquer des chocs importants ; pour les atténuer, il est recommandé d'avoir plusieurs dents simultanément en contact avec la pièce.
- En présence d'une surface brute (comme une pièce de fonderie), l'abrasivité du matériau non usiné accélère fortement l'usure de l'outil. [6].

I.2.4 Fraisage en bout et fraisage en roulant

• Fraisage en bout

- ✓ La surface plane est obtenue par l'enveloppée la trajectoire de la pointe d'outil.
- ✓ Si l'axe de rotation n'est pas perpendiculaire à la surface on usine une surface concave.
- ✓ – Croisées, le copeau ayant une épaisseur sensiblement constante si largeur fraisée $< 0.7 \times \text{diamètre de la fraise}$.
- ✓ On préférera toujours le fraisage en bout.

• Fraisage en roulant

- La surface plane est obtenue par le profil de la fraise qui se déplace et génère un plan (travail de forme).
- Le copeau varie de 0 à l'avance /dent ce qui crée des vibrations.
- La surface est composée d'ondulations. Un défaut sur l'arrête coupante est reporté sur la surface.

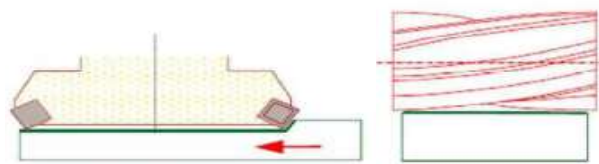


Fig I.3 Fraisage en bout et fraisage en roulant [6]

I.3 Fraiseuse

Les fraiseuses ont pris le pas sur d'autres machines (comme les raboteuses et les étaux limeurs) pour le travail des surfaces planes. Ces appareils peuvent aussi être utilisés pour des opérations de contournement. L'instrument, une fraise, est monté sur la broche et est entraîné dans un mouvement rotatif (action de coupe). Il est capable de se mouvoir en translation par rapport à la pièce dans trois orientations.[6].

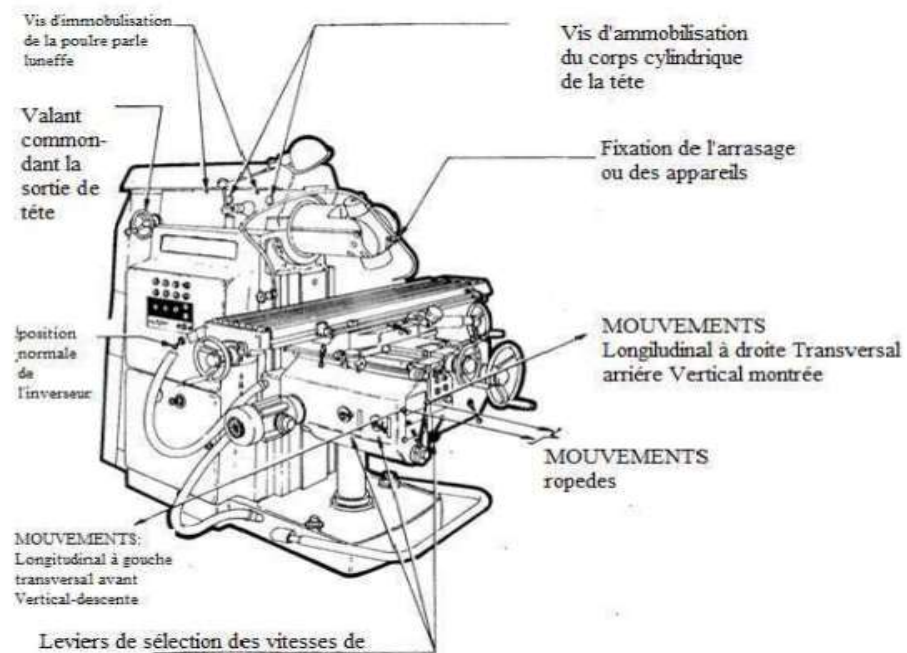


Fig I.4 Fraiseuse Universelle [6]

I.3.1 Les paramètres de coupe

Afin d'assurer un usinage efficace et de qualité, il est essentiel de déterminer avec précision les paramètres de coupe. Ces derniers influencent directement la productivité, la qualité de la pièce obtenue et la durée de vie de l'outil.

Parmi les paramètres fondamentaux à définir, on retrouve :

- **La vitesse de coupe (V_c)** : correspond à la vitesse linéaire à laquelle l'outil entre en contact avec la matière.
- **La vitesse d'avance (V_f)** : représente la vitesse à laquelle l'outil progresse dans la pièce.
- **La profondeur de passe (a)** : désigne l'épaisseur de matière enlevée lors d'un passage.

Le choix adéquat de ces paramètres est déterminant pour obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions techniques (précision, état de surface) tout en assurant une bonne durée de vie de l'outil et une performance d'usinage optimale.

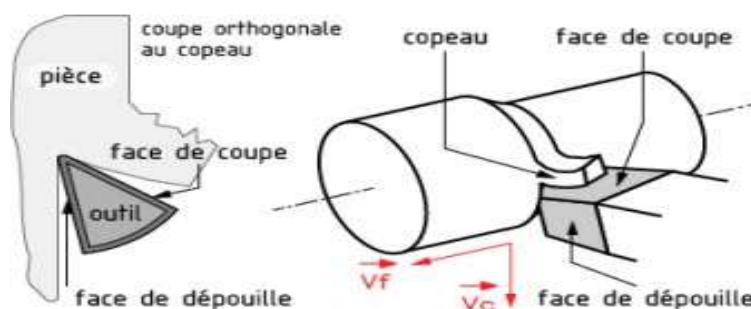


Fig I.5 Phénomène de la coupe

I.3.2 Choix du matériau de l'outil de coupe

Pour garantir performance et longévité lors des opérations d'usinage, les matériaux utilisés dans la fabrication des arêtes de coupe doivent répondre à un ensemble d'exigences spécifiques. Ces propriétés assurent une efficacité maximale même dans des conditions de travail extrêmes :

- **Haute résistance à l'usure** : Capacité à supporter les frottements prolongés sans altération significative.
- **Bonne ténacité** : Aptitude à résister aux chocs mécaniques, notamment lors de coupes interrompues ou d'irrégularités dans la pièce.
- **Dureté élevée** : Capacité du matériau à pénétrer la matière à usiner sans se déformer.
- **Stabilité thermique** : Maintien des propriétés mécaniques, en particulier la dureté, même à des températures élevées générées par le processus de coupe.
- **Résistance à la compression** : Capacité à endurer des pressions importantes sans rupture ni déformation.
- **Inertie chimique** : Résistance aux réactions chimiques avec le matériau usiné ou les éléments de l'environnement (air, fluides de coupe...).
- **Faible adhérence** : Réduction des phénomènes de collage sous haute température et pression, limitant ainsi l'usure prématurée.
- **Coût maîtrisé et disponibilité** : Le matériau doit être économiquement accessible, facile à mettre en forme, et composé d'éléments abondants [7].

Ce diagramme permet d'identifier les plages d'utilisation des différents matériaux utilisés pour les outils de coupe. Il illustre les domaines d'emploi typiques en ébauche, principalement pour les aciers et les fontes, dans des conditions d'usinage standard.

Il constitue un outil d'aide au choix du matériau de l'outil, mais ne doit pas être utilisé pour définir les paramètres de coupe précis (vitesse, avance, profondeur), car il ne prend pas en compte les spécificités de chaque opération ni les variations dues aux conditions réelles d'usinage (état de la machine, type de lubrification, géométrie de l'outil, etc.) [8].

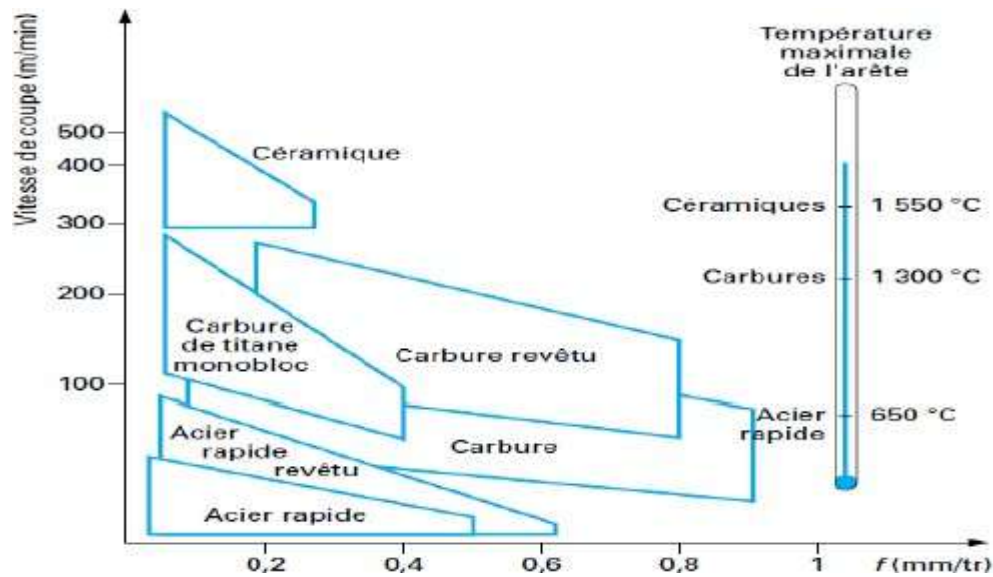


Fig I.6 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant [8].

I.3.3 Différentes parties de l'outil de coupe

Les composants principaux présents sur un instrument de coupe sont :

Le corps : Il fait le lien entre l'outil et le support d'outillage, il peut être de forme prismatique ou cylindrique.

La tige : Pour les fraises et les forets, on désigne par « tige » l'élément qui assure la connexion entre l'outil et le porte-outil. La queue peut être de forme cylindrique ou conique (cône Morse CM ou cône standard américain SA).

La section active : C'est la section qui exerce une influence sur l'élément pour engendrer une élimination de métal.

Elle se distingue par sa configuration et son matériau.

La partie active doit avoir une dureté supérieure à celle du métal à usiner [9].

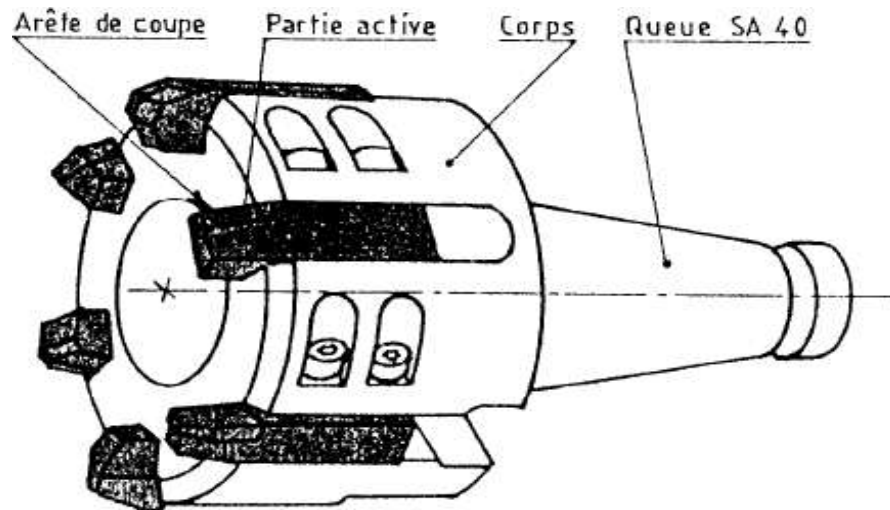


Figure I.7 L'outil de fraisage [9].

I.3.4 Les conditions de coupe

Les conditions de coupe regroupent trois paramètres essentiels : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Ces éléments influencent directement les performances de l'usinage ainsi que la durée de vie de l'outil, en agissant sur les mécanismes d'usure et de dégradation.

Avant toute opération de fraisage, il est crucial de sélectionner correctement ces paramètres afin d'assurer une bonne qualité de fabrication (précision dimensionnelle, état de surface, etc.).

Le choix des conditions de coupe dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels :

- **Le type de machine-outil** utilisée (sa conception, sa rigidité, la plage de vitesses disponible...),
- **La puissance** disponible de la machine,
- **Le matériau de l'outil** (acier rapide, carbure, céramique...),
- **Le matériau de la pièce à usiner** (acier, aluminium, fonte, etc.)[10].

I.3.5 La vitesse de coupe (V_c en m/min)

Indique pour sa part la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de Chapitre I Etude Bibliographique 9 coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné [10].

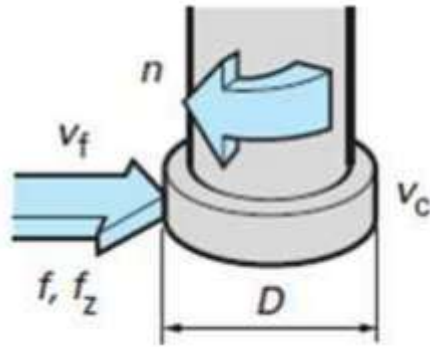


Fig I.8 Vitesse de coupe [11]

$$V_c = \frac{n \pi D}{1000} \quad \text{Eq 1}$$

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

avec:

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

n : vitesse de broche (tr/min)

V_c : vitesse de coupe (m/min)

I.3.6 La vitesse d'avance Vf et avance par tour f

La vitesse de coupe correspond à la vitesse à laquelle l'arête de l'outil travaille la surface de la pièce. C'est un paramètre fondamental dans les conditions de coupe, car il détermine directement l'efficacité de l'opération d'usinage. Un choix approprié de la vitesse de coupe permet d'optimiser les performances de l'outil, d'assurer une meilleure qualité de la pièce usinée et de prolonger la durée de vie de l'outil.[5].

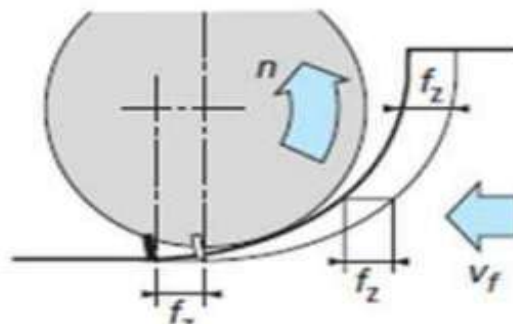


Fig I.9 Vitesse d'avance [11]

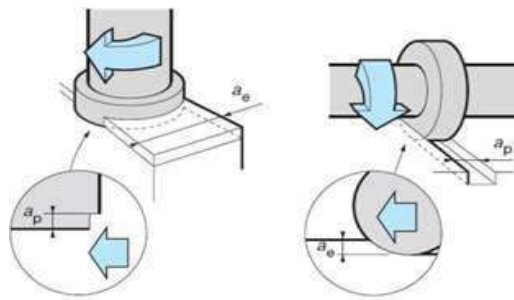
I.3.7 La profondeur de passe axiale (a_p) et profondeur de coupe radiale (a_e)

En fraisage, la profondeur de passe dépend du type d'opération effectuée ainsi que de la nature de la denture de la fraise, qui peut être soit ravageuse, soit lisse. Les dentures

ravageuses ont l'avantage de réduire les efforts de coupe, ce qui permet d'adopter des profondeurs de passe et des avances plus importantes.

Profondeur de coupe radiale (a_e) : Lors d'opérations de surfacage ou de fraisage d'épaulements, elle correspond à l'épaisseur de matière enlevée perpendiculairement à l'axe de rotation de l'outil. Plus précisément, c'est la distance entre la surface initiale de la pièce et la position de réglage de l'outil en dessous de cette surface.

Profondeur de passe axiale (a_p) : En fraisage d'épaulements, elle désigne la distance parcourue par l'outil dans le sens axial, c'est-à-dire la profondeur sur laquelle l'outil pénètre



dans la pièce.[5]

Fig I.10 Profondeur de passe [11].

I.4 La rugosité des surfaces usinées

I.4.1 La rugosité

La rugosité fait référence aux imperfections microgéométriques de la surface d'une pièce. Elle est mesurée après avoir filtré la surface réelle à l'aide d'un filtre passe-haut, ne conservant que les variations de courte longueur d'onde. En profilométrie, les paramètres de rugosité sont identifiés par la lettre 'R' suivie d'une ou plusieurs lettres, indiquant le type de mesure. Par exemple, 'Ra' désigne la rugosité moyenne arithmétique du profil, tandis que 'Rz' correspond à la rugosité maximale. La rugosité d'une pièce est un indicateur clé du procédé d'usinage utilisé, qu'il s'agisse de tournage, de polissage, de pierrage, etc. En mécanique, l'évaluation de l'état de surface se rapporte principalement aux techniques d'usinage par enlèvement de matière. Les défauts de surface, tels que les stries et les sillons, sont généralement causés par les arêtes des outils de coupe (tels que les outils de tournage, les fraises ou les meules)[12].

I.4.2 Principaux défauts de surface

L'aptitude d'une pièce à remplir une fonction spécifique dépend d'un ensemble de facteurs, dont les caractéristiques de ses états de surface. En général, les défauts de surface jouent un rôle crucial dans le bon fonctionnement d'une pièce. Ces défauts peuvent être de nature géométrique ou physico-chimique. Nous nous concentrons ici sur les défauts géométriques, qui sont traditionnellement classés en quatre catégories, comme illustré dans la figure I.8 [12].

Défauts de premier ordre : Ils concernent des anomalies de forme, telles que des écarts de rectitude ou de circularité. Ces défauts sont de nature aperiodique.

Défauts de deuxième ordre : Ce sont des défauts caractérisés par des lignes ondulées, périodiques, qui résultent principalement de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil utilisé.

Défauts de troisième et quatrième ordre : Ceux-ci sont liés à la rugosité de la surface. Les défauts de troisième ordre se manifestent par des stries ou des sillons, souvent périodiques ou pseudo-périodiques. En revanche, les défauts de quatrième ordre comprennent des arrachements, des fissures, des piqûres, etc., et sont de nature aperiodique.

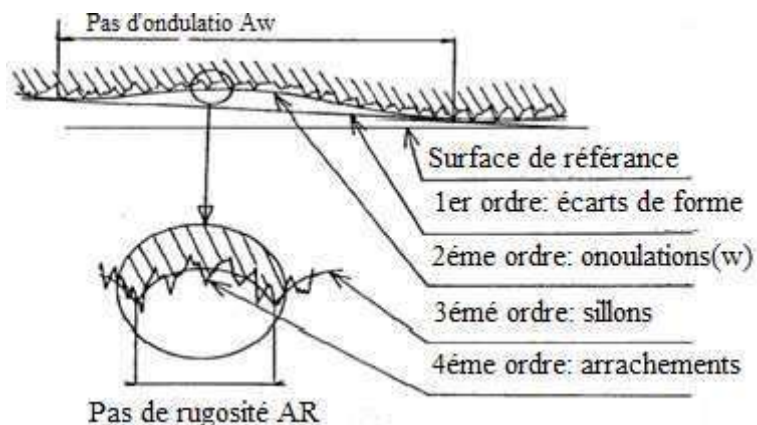


Fig I.11 Principaux défauts de surfaces [12].

I.4.3 Principaux critères de rugosité

Prenons une coupe locale de la surface usinée, perpendiculaire aux sillons générés par l'usinage (voir figure I.9). Soit OX la ligne moyenne, définie par la condition suivante :

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

Cette expression indique que la moyenne des écarts par rapport à la ligne OX sur la longueur de l la coupe est nulle.

la rugosité totale R_t , correspond à la différence maximale entre le point le plus élevé et le point le plus bas du profil de surface."

La rugosité R_z correspond à la moyenne des distances entre les cinq plus hauts sommets et les cinq plus profonds creux du profil.

la rugosité moyenne arithmétique R_a représente la moyenne des écarts absolus par rapport à la ligne OX. R_a est déterminée sur une longueur d'évaluation donnée

$$R_a = \frac{l}{L} \int_L^l |y| dx$$

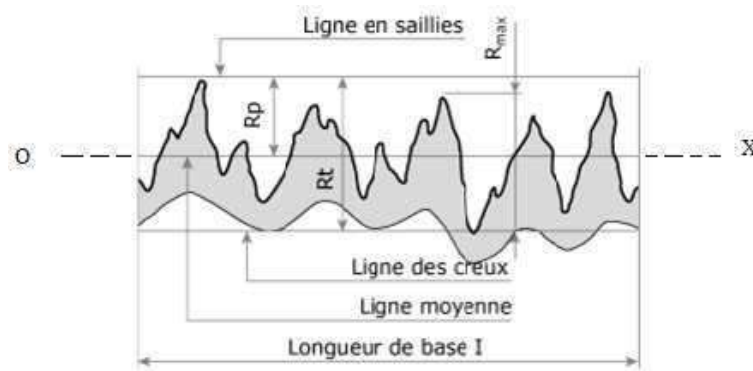


Fig I.12 Rugosité arithmétique [12].

I.4.4 Usure et dégradation des outils de coupe

a) Usure en dépouille

L'usure en dépouille agit comme un indicateur de l'état de l'outil de coupe. Lorsque cette usure devient trop prononcée, elle entraîne une hausse des forces de coupe, ce qui détériore la qualité de la surface usinée. Ce phénomène est souvent lié à une vitesse de coupe trop élevée, et la solution consiste à réduire cette vitesse pour limiter l'usure [12].



Fig I.13 Usure en dépouille [13].

b) Usure en cratère

L'usure en cratère est un phénomène courant lors des opérations de tournage. Elle survient généralement lorsque la vitesse de coupe est trop élevée ou lorsque la résistance à l'usure de la

plaquette est insuffisante. Pour éviter cette usure, il est recommandé de réduire la vitesse de coupe, de choisir une plaquette plus dure ou d'opter pour une plaquette revêtue[12].

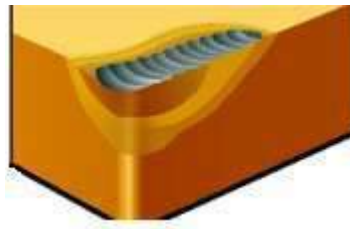


Fig I.14 Usure en cratère [13].

c) Déformation plastique

La déformation plastique se manifeste par un affaissement ou un renflement au niveau de la coupe, généralement causé par une température excessive au niveau de l'arête de coupe. Cela entraîne une détérioration de la qualité de la surface usinée et peut rendre l'usure en dépouille plus importante, jusqu'à provoquer la rupture de la plaquette. Ce phénomène est souvent dû à une température de coupe trop élevée, une vitesse de coupe excessive ou des efforts de coupe trop importants. Pour éviter cette usure, il est recommandé de choisir une plaquette plus dure, de privilégier une nuance revêtue, de réduire la vitesse de coupe ou d'ajuster l'avance [13].



Fig I.15 Déformation plastique [13].

d) Écaillage

L'écaillage se produit lorsque de petites particules de carbure se détachent de la plaquette, ce qui conduit à une dégradation de la surface usinée et à une usure excessive de la dépouille. Ce type d'usure peut résulter d'une nuance trop fragile, d'une géométrie de plaquette inadaptée, ou d'une arête rapportée insuffisamment résistante. Pour résoudre ce problème, il est conseillé de choisir une nuance plus résistante, d'opter pour une géométrie avec une arête de coupe plus robuste, d'augmenter la vitesse de coupe ou de vérifier l'absence de vibrations [13].



Fig I.16 Écaillage [13].

e) Usure

L'usure en entaille se caractérise par une détérioration de la surface usinée et un risque accru de rupture de l'arête de coupe. Ce phénomène se produit principalement lors de l'usinage de



matériaux sujets à l'écaillage ou à la formation de croûtes. Pour limiter cette usure, il est recommandé de réduire la vitesse de coupe V_c , de choisir une nuance plus résistante, ou d'augmenter la vitesse de coupe V_c selon les conditions d'usinage [13].

Fig I.17 Usure en entaille [13].

f) Arête rapportée

Une température de coupe trop basse peut entraîner l'adhérence de matière sur l'arête de coupe, ce qui dégrade l'état de surface et peut provoquer l'effritement de l'arête. Ce phénomène est souvent causé par une vitesse de coupe trop faible, une géométrie de coupe négative, ou par les propriétés de matériaux particulièrement collants comme l'acier inoxydable ou l'aluminium. Pour résoudre ce problème, il est recommandé d'augmenter la vitesse de coupe, de choisir une géométrie de coupe positive, et d'adapter la vitesse de coupe en fonction du matériau[13].

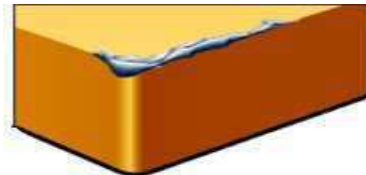


Fig I.18 Arête rapportée [13].

I.4.5 Mesure de la rugosité des surfaces

L'évaluation des états de surface peut être effectuée à l'aide de plusieurs instruments, tels que le rugosimètre, le profilomètre (à contact ou optique), ou encore un microscope spécialisé dans la mesure de la hauteur de surface. De nos jours, les états de surface sont généralement mesurés numériquement à partir de profils ou de surfaces numérisées. Parmi les techniques les plus couramment utilisées pour mesurer les états de surface, on trouve [13] :

- La profilométrie à contact.
- La profilométrie optique à capteur confocal chromatique.

- La profilométrie optique à focalisation dynamique.
- La microscopie confocale.
- La microscopie par interférence en lumière blanche.

I.4.6 Évaluation de la rugosité de surface

a) Méthodes mécaniques

Les méthodes mécaniques, en raison de leur simplicité et de leur large éventail d'applications, peuvent couvrir un grand nombre de paramètres de rugosité. Cependant, les instruments traditionnels utilisés pour mesurer les surfaces avec ces techniques présentent certains inconvénients, notamment :

- Processus relativement lent.
- La pression exercée par le palpeur peut parfois abîmer la surface mesurée.
- Limitation en termes de zones mesurables.

Malgré ces inconvénients, les avantages sont notables :

- Grande flexibilité pour s'adapter à une variété de formes.
- Excellente résolution dans la direction verticale.

Dans le secteur industriel, le dispositif le plus couramment utilisé est le profilomètre mécanique 2D, qui repose sur le contact du palpeur avec la surface à analyser. Selon son niveau de sophistication, cet équipement permet de mesurer la totalité ou une partie des paramètres d'état de surface. Par ailleurs, l'évaluation des paramètres de profil primaire et d'ondulation nécessite généralement un guidage externe. La figure I.17 illustre schématiquement un appareil à palpeur, en montrant ses principaux composants [13].

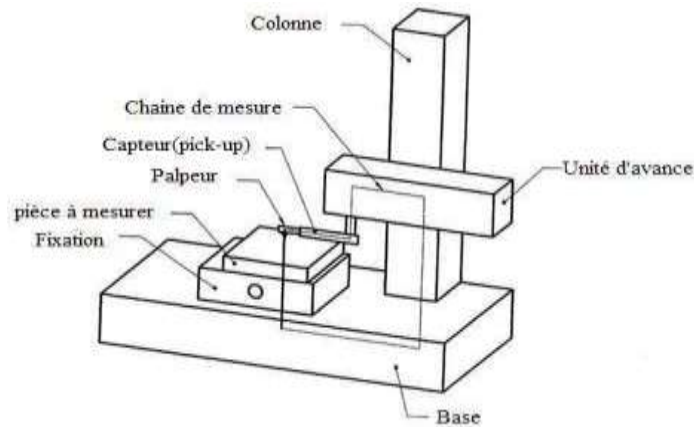


Fig I.19 Profilomètre

b) Mesure tridimensionnelle

La caractérisation d'une surface ne peut se limiter à l'étude d'une seule trajectoire. L'objectif est d'analyser l'ensemble d'une surface, ou une portion de celle-ci, afin de déterminer son relief, sa texture, ainsi que ses défauts. Les progrès technologiques permettent d'étendre sans cesse notre capacité à mesurer et à comprendre les états de surface. Ces dernières années, de nombreux équipements ont été développés pour quantifier la topographie des surfaces, grâce à des avancées dans plusieurs domaines :

- Les dispositifs de mesure à contact, avec l'ajout d'un troisième axe de mesure.
- La microscopie à haute résolution.
- Le traitement de données et d'images.

La mesure tridimensionnelle des états de surface ne se limite plus seulement au contrôle qualité des produits industriels. Grâce à la représentation tridimensionnelle, il est désormais



possible d'approfondir l'analyse de la texture des surfaces et d'élargir les possibilités d'étude [13].

Fig I.20 Appareille de mesure tridimensionnelle [13].

I.7 Conclusion

Dans cette section, nous avons détaillé les techniques de fraisage. Nous avons également examiné une vue d'ensemble de la rugosité des surfaces, analysé les principales imperfections de surface et observé l'impact des paramètres de coupe sur la rugosité. De plus, une méthode d'évaluation de la rugosité des surfaces a été discutée, incluant une revue de la littérature pertinente.

CHAPITRE II

NOTIONS SUR LES TRAITEMENTS

THERMIQUES

II.1 Introduction

Les traitements thermiques désignent l'ensemble des processus de chauffage et de refroidissement contrôlé appliqués aux métaux et alliages. En règle générale, ces traitements affectent la microstructure des matériaux (comme la matrice, les précipités, leur distribution, etc.). Ils permettent de modifier diverses propriétés, telles que les caractéristiques mécaniques (augmentation ou réduction de la résistance), les propriétés physiques (par exemple, la conductivité thermique et électrique), ainsi que les propriétés chimiques (comme la résistance à la corrosion). En résumé, les traitements thermiques consistent à faire varier la température des métaux tout en maintenant leur état solide. L'ensemble de ces variations thermiques, incluant le chauffage, le maintien à une température donnée et le refroidissement, est désigné sous le terme de cycle thermique.

II.2 Procédés des traitements thermiques

II.2.1 Définition

Le traitement thermique d'un matériau regroupe un ensemble de procédés industriels permettant de modifier ses propriétés physiques et, dans certains cas, ses propriétés chimiques. Ce type de traitement est couramment utilisé dans la fabrication de divers matériaux tels que le verre, le bois, les aliments, et particulièrement les métaux. Il consiste à appliquer un chauffage et/ou un refroidissement, souvent à des températures élevées, dans le but d'ajuster des caractéristiques spécifiques du matériau, comme sa friabilité, sa dureté, sa ductilité, sa fragilité, sa plasticité, son élasticité ou encore sa résistance mécanique.

II.2.2 Procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce consiste à appliquer une variation contrôlée de température en fonction du temps. Le processus de traitement thermique se décompose comme illustré dans la Figure **II.1**.

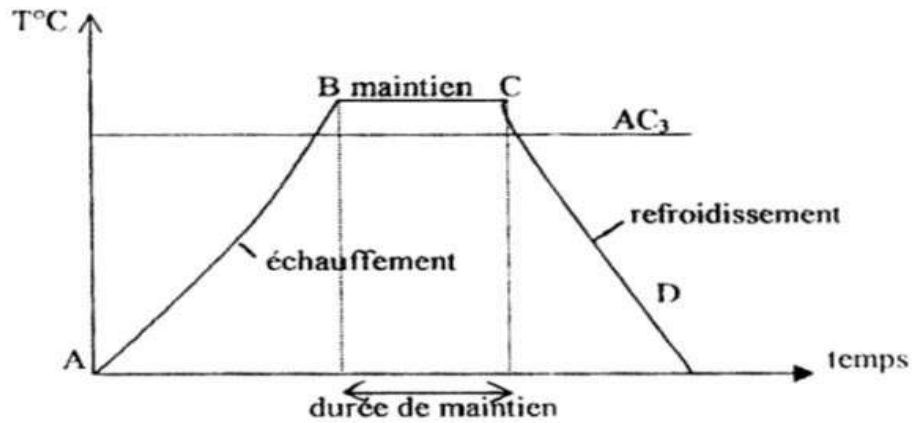


Figure II.1 Cycle d'un traitement thermique [14]

- **AB** : Phase de montée en température
- **BC** : Palier thermique
- **CD** : Phase de refroidissement contrôlé

II.2.3.1 Chauffage des pièces

La première phase de tout traitement thermique consiste à chauffer la pièce jusqu'à la température souhaitée. Ce chauffage doit être effectué rapidement pour minimiser la consommation d'énergie tout en optimisant la productivité. Il existe deux méthodes pour chauffer les pièces :

- Par transmission de chaleur.
- Par génération de chaleur directement dans la pièce.

Quel que soit le mode de chauffage choisi, il est inévitable qu'il y ait une différence de température entre les différentes zones de la pièce, entraînant ainsi une répartition non uniforme de la chaleur. La **Figure II.2** illustre la courbe de chauffage pour la surface et le cœur de la pièce, la courbe étant simplifiée en une ligne droite.

Le processus de chauffage peut être divisé en trois étapes distinctes :

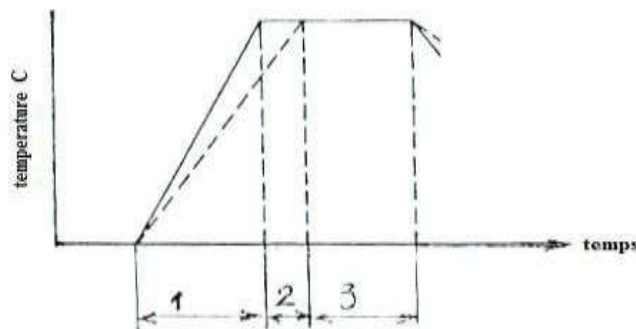


Figure II.2 La courbe de chauffage. [14]

Temps de préchauffage : Il s'agit du temps écoulé depuis le début du chauffage jusqu'à ce que la température cible soit atteinte à la surface de la pièce.

Temps de chauffage pour pénétration ou égalisation : Ce temps correspond à la durée nécessaire pour que la température nominale soit atteinte à la fois à la surface et au centre de la pièce.

Temps de maintien : Il s'agit du temps durant lequel la pièce doit être maintenue à une température stable, après que cette température a été atteinte dans le cœur de la pièce [14].

II.2.3.2 Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques

L'équipement de chauffage doit être capable de :

- Atteindre et maintenir toutes les zones de la pièce à une température spécifiée, avec une précision de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Prévenir toute dégradation du métal, notamment en évitant la décarburation, particulièrement dans le cas des aciers.
- Offrir la possibilité d'un préchauffage lorsque des températures élevées sont requises

II.2.3.3 Refroidissement des pièces

Le principal facteur pour déterminer le régime de refroidissement d'une pièce est l'état structural désiré. Bien qu'un refroidissement rapide soit toujours recherché pour augmenter la productivité, il est essentiel de prendre en compte les risques de fissuration et de déformation des pièces. La vitesse de refroidissement requise pour obtenir un état de structure spécifique est généralement définie à l'aide du diagramme TTT (Température, Transformation, Temps). Le refroidissement peut se faire dans des réservoirs remplis d'eau ou d'huile, où la température du bain reste constante. Dans ce processus, l'eau chaude est constamment remplacée par de l'eau froide qui arrive par le bas du réservoir.

Il existe également des techniques comme l'utilisation de jets pour réguler le refroidissement de la pièce sur toute sa surface. De plus, des chambres spéciales produisant un brouillard, généré par un jet d'eau et d'air sous pression, sont parfois utilisées, notamment dans le secteur aéronautique pour le traitement de certaines pièces en aluminium. [15]

II.3 Gammes des traitements thermiques de l'acier

Les principaux procédés de traitement thermique qui modifient la structure et les propriétés des alliages de diverses manières comprennent des étapes de chauffage à une température donnée,

un maintien à cette température, puis un refroidissement à une vitesse contrôlée. Ces procédés incluent :

- La trempe
- Le revenu
- Le recuit

Les facteurs essentiels qui permettent de différencier ces traitements sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement.

II.3.1 Trempe

Après le chauffage et le maintien à la température souhaitée, les pièces sont ensuite refroidies selon un mode adapté, avec une vitesse de refroidissement contrôlée par le milieu de trempe choisi. Ce refroidissement peut se faire dans de l'air calme, de l'air soufflé, de l'huile, des bains de sels, etc., en fonction des alliages et des caractéristiques désirées. Pour qu'une trempe soit réussie, il est nécessaire de chauffer le métal à une température suffisamment élevée pour atteindre la zone austénitique [16].

II.3.1.1 Types de trempe

Il existe plusieurs types de trempe, notamment la trempe martensitique, la trempe bainitique et la trempe austénitique (également connue sous le nom d'hypertrempe).

▪ Trempe martensitique

La trempe martensitique consiste à refroidir rapidement le métal en le faisant passer à une température inférieure à la température critique M_s , souvent autour de 20 °C ou moins. Ce refroidissement rapide de l'austénite empêche les atomes de carbone de quitter le réseau gamma, ce qui provoque une transformation instantanée du réseau en une structure cubique centrée. Cette nouvelle structure, appelée martensite, est une solution solide d'insertion. Pour obtenir cette structure martensitique, il est impératif que la vitesse de refroidissement dépasse la vitesse critique de trempe martensitique. Cependant, il est important de noter que cette condition n'est pas toujours remplie uniformément dans toute la pièce. La vitesse de refroidissement dans un point donné dépend de plusieurs facteurs : la conductivité thermique

du métal, la forme et les dimensions de la pièce, ainsi que l'efficacité du fluide de trempe, qui elle-même est influencée par l'agitation du fluide [17]

▪ Trempe conduisant à la formation de bainite

Ce traitement thermique consiste à refroidir l'acier depuis l'austénite jusqu'à une température intermédiaire, située entre celles de la perlite et de la martensite, puis à le maintenir à cette température pour permettre la transformation en bainite, une microstructure à la fois dure et tenace. [17].

▪ Trempe austénitique (ou hypertrempe)

Les aciers austénitiques, dont la structure reste inchangée tant par chauffage que par refroidissement, ne peuvent pas être trempés de manière classique. Le procédé d'hypertrempe, quant à lui, permet de traiter ces aciers en les chauffant à environ 1 100 °C. Ce chauffage est suivi d'un refroidissement rapide afin d'éviter la précipitation des carbures entre 600 °C et 800 °C, ce qui est généralement réalisé avec de l'eau. Pour les aciers riches en nickel, on préfère l'utilisation de l'huile comme fluide de trempe.

Cette méthode est surtout utilisée pour les aciers inoxydables et les aciers ferromanganèse, dans le but de faciliter un usinage ultérieur ou de maintenir les carbures en solution dans l'austénite. Si ces carbures précipitent dans les espaces inter-grains, cela pourrait entraîner une corrosion cristalline, d'où l'importance de leur gestion dans ce traitement.[17]

II.3.1.3 Technologies de chauffage

Les trois types de trempe peuvent être réalisés dans divers environnements de chauffage, tels que des fours sous atmosphère contrôlée, des fours sous vide ou encore des bains de sels. Le choix de la méthode de chauffage dépend de plusieurs critères, tels que la nature des pièces, leur taille, leur conductivité thermique, etc. Un graphique est présenté ci-dessous pour illustrer de manière générale le cycle d'un traitement par trempe. Il est important de noter qu'un traitement de trempe est toujours suivi d'un ou plusieurs traitements de revenu. Ces traitements permettent de réduire la fragilité du matériau, d'éliminer les contraintes internes et d'ajuster la dureté finale du produit.

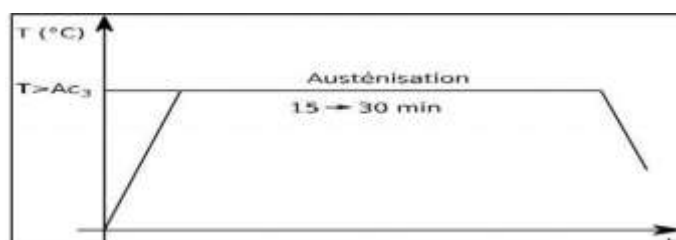


Figure. II.3. Cycle thermique lors d'une trempe. [12]

II.3.1.4 Choix de temps de maintien

Le maintien du métal à la température de trempe doit garantir une montée en température uniforme, jusqu'à atteindre la température souhaitée au cœur de la pièce, tout en assurant l'achèvement des transformations de phase. Toutefois, il ne faut pas que ce processus soit trop lent, afin d'éviter un grossissement excessif des grains ou une décarburation des couches superficielles des pièces.

La durée totale du chauffage, notée t_t , se compose de deux parties :

- Le temps d'échauffement à cœur $t_{éc}$, qui dépend de la forme, des dimensions des pièces, de la composition du métal, et du type de four utilisé.
- Le temps de maintien isotherme t_{mi} , qui est fonction de la composition chimique et de l'état initial du métal.
- Ainsi, la relation est : $t_t = t_{éc} + t_{mi}$

En pratique, la détermination de cette durée totale t_t repose sur des données expérimentales. Le tableau (II.1) fournit un résumé des durées moyennes, rapportées à 1 mm d'épaisseur, pour différents types de fours.

Moyen de chauffage	Durée en (s/mm) d'épaisseur de pièce		
	Ronde	Carrée	Rectangulaire
Four électrique	40-50	50-60	60-75
Four à flamme	35-40	45-50	55-60
Bain de sel	12-15	15-18	18-22
Bain de plomb	6-8	8-10	10-12

Tableau. II.1. Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours. [17]

II.3.1.5 Milieux de trempe

La trempe est généralement réalisée dans l'un des trois milieux suivants : eau, huile ou air. Le choix du milieu de trempe dépend principalement de la trempabilité de l'acier. La nature du bain utilisé (eau, huile, etc.) détermine la vitesse de refroidissement de la pièce immergée

après le chauffage.

Nature du bain	Vitesse de refroidissement
Saumure	220 °C/ seconde
Eau froide	160 °C/ seconde
Eau tiède	150 °C/ seconde
Eau chaude	140 °C/ seconde
Huile de trempe	70 °C/ seconde
Air soufflé	20 °C/ seconde
Air calme	2 °C/ seconde
Dans un moule de sable	0.05 °C/ seconde
Dans le four	0.01 °C/ seconde (ou selon la programmation du cycle)

Tableau. II.2. Dynamique de refroidissement contrôlée par le fluide de trempe. [17]

II.3.2 Revenu

Le revenu est un procédé thermique qui intervient après la trempe afin de rectifier les défauts engendrés par cette dernière. Il consiste à chauffer le métal trempé à une température inférieure à A_{c1} , à maintenir cette température pendant un certain temps, puis à laisser refroidir le métal jusqu'à la température ambiante. Cette opération entraîne une modification de la structure du matériau, la rapprochant d'un état plus stable d'un point de vue physico-chimique, sans toutefois atteindre cet état d'équilibre. Le revenu permet d'obtenir un compromis optimal entre la résistance mécanique (R_m , R_e , H) et la plasticité (A , Z , K) du matériau.

En ce qui concerne la vitesse de refroidissement après le revenu, son impact sur les contraintes résiduelles est relativement faible. Cependant, un refroidissement plus lent permet généralement de réduire ces contraintes, car il favorise une relaxation progressive des tensions internes dans le métal [18].

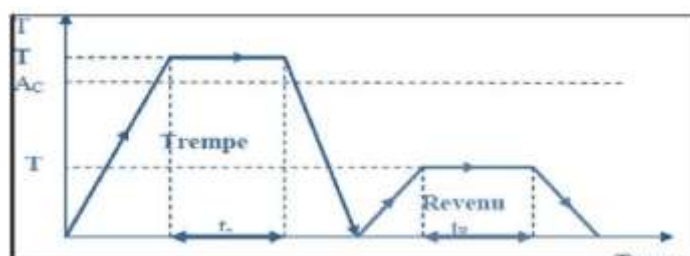


Figure. II.4 Cycle thermique complet d'une trempe et revenu. [18]

a) Revenu de relaxation ou de détente

Le revenu de relaxation, réalisé à une température comprise entre 180°C et 220°C, n'entraîne pas de changement notable dans la structure du matériau. Il vise principalement à relâcher les contraintes internes qui résultent du refroidissement rapide lors de la trempe et du passage de la phase austénitique à la martensitique. Ce type de revenu engendre une légère diminution de la dureté et une augmentation modérée de la résilience. Il est généralement appliqué sur des pièces soumises à de fortes contraintes mécaniques sans chocs, ou qui doivent conserver une dureté superficielle élevée. [18]

b) Revenu structurel des aciers

Le revenu de structure, également connu sous le nom de revenu classique, s'effectue entre 500°C et Ac1. Cette méthode favorise l'amélioration de caractéristiques telles que la ténacité (K), la ductilité (A) et la formabilité (Z), tout en diminuant considérablement la dureté (H), la résistance mécanique (Rm) et la résistance à l'écoulement (Re). Ce genre de revenu cherche à trouver un équilibre entre les diverses propriétés mécaniques, en fonction des exigences particulières liées à l'utilisation des aciers.[18]

c) Revenu de durcissement

Le revenu de durcissement, réalisé à des températures comprises entre 450°C et 600°C, peut entraîner des phénomènes de durcissement secondaire, en particulier pour les aciers alliés, comme ceux utilisés dans les outils en chrome ou les aciers rapides. Lors de ce processus, les carbures complexes, qui étaient initialement dissous dans l'austénite résiduelle, précipitent. Par la suite, l'austénite résiduelle se déstabilise et se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces transformations successives requièrent souvent un second revenu afin d'éviter que la martensite secondaire ne rende le matériau trop fragile. Dans le cas de certains aciers rapides, il peut être nécessaire de procéder à trois revenus successifs. [18]

d) Revenu à basse température

Le revenu à basse température se réalise généralement autour de 250°C et a pour effet de réduire les contraintes internes. Il transforme la martensite formée lors de la trempe en une martensite plus stable, appelée martensite de revenu. Ce traitement permet d'augmenter la

résistance du matériau tout en améliorant sa ductilité, sans provoquer de diminution significative de la dureté (restant dans la plage de 58 à 63 HRC), ce qui confère au matériau une excellente résistance à l'usure. Ce type de revenu est particulièrement adapté aux outils de coupe et aux instruments de mesure fabriqués à partir d'acier au carbone ou faiblement allié. La durée de traitement peut varier de 1 à 3 heures en fonction des spécifications du matériau. [18]

e) Revenu à température intermédiaire

Le revenu à température intermédiaire est réalisé entre 350°C et 500°C et est couramment utilisé pour les ressorts de différentes applications ainsi que pour les pièces de mécanismes soumis à des contraintes. Ce procédé permet d'obtenir une limite élastique élevée ainsi qu'une meilleure résistance à la fatigue. La structure résultante est généralement une combinaison de troostite de revenu et de troostite-martensite, avec des duretés variant de 40 à 50 HRC. Lors du refroidissement, effectué généralement à l'eau après un revenu à 400°C ou 450°C, des contraintes de compression résiduelles se forment à la surface du matériau. Ces contraintes contribuent à augmenter la limite de fatigue des ressorts. [18]

f) Revenu à haute température

Le revenu à haute température se réalise à des températures comprises entre 500°C et 680°C. Ce traitement entraîne la formation de la structure sorbite de revenu. Il permet d'obtenir un meilleur compromis entre la résistance et la ductilité de l'acier. Lorsqu'il est associé à la trempe (ce traitement combiné est appelé "amélioration"), il améliore les limites de rupture et d'élasticité par rapport à l'état normalisé ou recuit. Ce procédé augmente notamment la résilience et réduit la striction. L'amélioration est principalement appliquée aux aciers de construction à moyenne teneur en carbone (entre 0,3 et 0,5 %). [18]

II.3.3 Recuit

Les aciers ont la capacité d'acquérir une large gamme de propriétés mécaniques et physiques grâce à divers traitements thermiques. En général, les recuits permettent de ramener les alliages vers un état d'équilibre physico-chimique et mécanique. Ils visent à rétablir l'équilibre structural en éliminant les états hors d'équilibre qui résultent des traitements thermiques ou mécaniques précédents.

Le recuit correspond aux valeurs maximales de ductilité (résilience, allongement) et aux valeurs minimales de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Les principaux

objectifs du recuit sont les suivants :

- Réduire la dureté d'un acier trempé.
- Optimiser l'adoucissement pour faciliter l'usinage ou d'autres traitements mécaniques.
- Régénérer un métal qui a subi un écrouissage ou une surchauffe.
- Homogénéiser les structures internes hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes.[19]

• Cycle thermique d'un recuit comprend

Le cycle thermique d'un recuit comprend plusieurs étapes clés :

- Chauffage jusqu'à une température spécifique, appelée température de recuit, qui varie en fonction du type de recuit à réaliser.
- Maintien isotherme à cette température de recuit, ou parfois des oscillations autour de celle-ci.
- Refroidissement lent, généralement effectué à l'air calme. Il est essentiel que la vitesse de refroidissement soit inférieure à la vitesse critique de recuit, comme illustré dans la figureII4.[19]

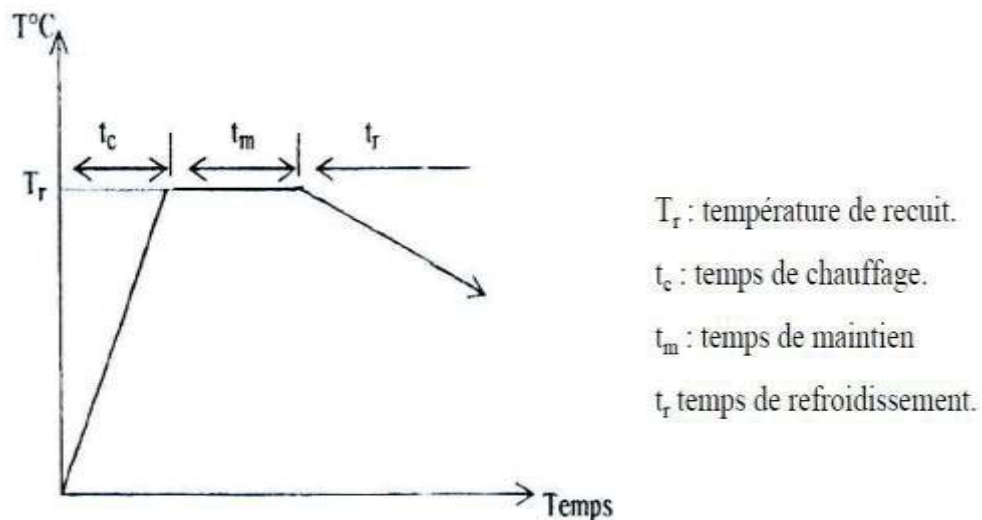


Figure II.5 Cycle thermique d'un recuit comprend. [19]

T_r : la température maximale atteinte durant le processus.

t_c : durée nécessaire pour atteindre la température de recuit.

t_r : durée pendant laquelle la température de recuit est maintenue constante.

II.3.3.1 Différents types de recuit

a) Recuit d'homogénéisation

Ce traitement est principalement utilisé pour les produits bruts de coulée fabriqués à partir d'alliages présentant un large intervalle de solidification (tels que l'eupro-étain ou l'eupro-béryllium). Il vise à faciliter leur transformation ou à améliorer les propriétés technologiques des demi-produits.

Le recuit d'homogénéisation permet de :

- Atténuer ou éliminer la ségrégation dendritique,
- Dissoudre les phases hors d'équilibre,
- Précipiter les éléments dissous en solution sursaturée,
- Uniformiser la répartition des constituants dans le matériau.

Dans certains cas, l'homogénéisation peut être accélérée par l'application de recuit oscillant, où la température de maintien varie entre deux valeurs, généralement autour d'un point de transformation spécifique. [19]

b) Recuit d'adoucissement

Le recuit d'adoucissement consiste en un chauffage prolongé de l'acier à des températures proches de AC (entre 650°C et 680°C), suivi d'un refroidissement lent, généralement autour de 10°C/h. Pour les aciers au carbone, la température de chauffage se situe entre 650°C et 750°C.

Dans le domaine de la phase $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$, un refroidissement lent à partir d'une température légèrement supérieure à AC conduit à la cristallisation du carbure en grains globulaires au point AR, ce qui empêche la formation de perlite lamellaire.

L'objectif principal du recuit d'adoucissement est d'apporter à l'acier une structure adaptée à la trempe tout en le rendant usinable et ductile. Après des opérations comme le forgeage et la normalisation, la structure des aciers au carbone devient généralement perlitique.[19]

c) Recuit complet

Le recuit complet consiste en un chauffage et un maintien de l'acier à une température proche de ($A_{c3} + 50^\circ\text{C}$), suivi d'un refroidissement lent dans le four à une température légèrement

inférieure à la température de surfusion. Cette méthode permet d'assurer la décomposition de l'austénite et de prévenir la formation de structures de haute dureté, telles que la martensite ou la bainite.

Ce type de recuit est principalement appliqué sur des pièces ayant subi divers traitements thermiques et mécaniques, dans le but de faciliter leur usinage ou leur déformation à froid. Ce processus est couramment désigné sous le terme général de "**recuit**". [19]

d) Recuit régénération

Ce recuit est employé pour rétablir la structure normale suite à un traitement thermique défectueux, toutefois, son application se limite aux métaux et alliages montrant une transformation de phase. Cela implique de chauffer les pièces pendant une durée relativement brève, juste au-dessus du point de transformation. L'exemple le plus fréquent est la destruction de la structure sur chauffée, susceptible de provoquer une fragilité entre les grains. Cependant, cette méthode est peu souvent employée pour les alliages de cuivre industriels, car la régénération du grain après un surchauffage requiert généralement une déformation suivie d'un recuit de recristallisation. [19]

e) Traitement thermique de relaxation des contraintes internes

Ce procédé consiste à chauffer le matériau à une température modérée, inférieure à celle de transformation, afin de réduire les tensions résiduelles générées par des opérations antérieures (comme le soudage ou l'usinage), sans altérer significativement la structure du métal.

II.4 Conclusion

Ce chapitre aborde les concepts relatifs aux traitements thermiques, avec un focus particulier sur la trempe et le revenu, et leur application aux pièces destinées à l'usinage.

Chapitre III

Partie expérimentale

III.1 Introduction

La compréhension des propriétés mécaniques est essentielle pour sélectionner les matériaux adaptés aux diverses applications industrielles, en particulier lors de l'usinage. L'amélioration de leurs caractéristiques dépend de leur composition chimique et, par conséquent, de leur état microstructural, qui est influencé par les traitements thermiques appliqués. Dans ce cadre, une série d'essais a été réalisée sur l'acier Z200C12.

La première partie des essais porte sur les traitements thermiques de l'acier Z200C12, comprenant une trempe à cœur à 960°C suivie d'un revenu à 200°C.

La deuxième partie de ces essais explore l'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface produit (Ra) lors de l'usinage du matériau Z200C12. Cette influence est analysée à travers un modèle mathématique élaboré à l'aide d'une analyse statistique.

III.2 Méthodologie expérimentale

III.2.1 Étude du matériau Z200C12

L'acier Z200C12 est un acier à outils de qualité, spécifiquement un acier au chrome pour trempe à l'huile ou à l'air, utilisé pour le travail à froid. Il est réputé pour sa résistance à l'usure, sa bonne conservation du tranchant et sa stabilité dimensionnelle.

- Propriétés physiques

Dureté à la livraison	Résistance à la traction R _m	Dureté d'utilisation
max. 250 HB	env. 850 N/mm ²	max. 62 HRC

Tab III.1 DE Propriétés physiques.

- Coefficient de dilatation thermique 10-6m/(m • K)

20 - 100°C	20- 200°C	20- 300°C	20- 400°C	20 - 500°C	20- 600°C	20-700°C
10,8	11,7	12,2	12,6	12,8	13,1	13,3

Tab III.2 Coefficient de dilatation thermique 10-6m/(m • K)

- Conductibilité thermique W/(m • K)

20°C	350°C	700°C
16,7	20,5	24,2

Tab III.3 Conductibilité thermique W/(m • K)

• Composition chimique du Z200C12

C 1.96, Mn 0.35, Si 0.33, P 0.054, S 0.020, Cu 0.039, Al 0.030, Ti 0.006, Nb 0.007, Ni 0.238
Cr 11.586, Mo 0.053, Sn 0.002, FE% 85.267, Ce_q 2.023, N 0.0066.

• Composition chimique AFNOR en %

C Si Mn P S Cr W

1,9 - 2,2 0,1 - 0,6 0,2 - 0,6 0 - 0,03 0 - 0,03 11,0 - 13,0 ≤ 0,8

III.2.2 Préparation des échantillons

Découpe des matériaux

Afin d'étudier le comportement de notre acier Z200C12 sous traitement thermique, nous avons préparé quatre échantillons. Ces ronds, mesurant 50 mm de diamètre sur 50 mm de longueur, ont été précisément découpés à la scie dans les installations de l'AMM El-Hadjar.



Fig III.1 Découpe des matériaux.

a) LE fraisage

Le fraisage consiste à réaliser un parallélépipède de 30 cm de section et 50 cm de longueur, ainsi que quatre cubes ayant chacun une arête de 50 cm.



Fig III.2 Fraiseuse à orientation verticale.

III.2.3 Fours de Traitement Thermique (TTH)

Les traitements thermiques visent à doter l'acier des propriétés mécaniques appropriées pour sa mise en œuvre. Le four utilisé pour ces traitements thermiques dans les ateliers de l'AMM possède les caractéristiques suivantes : 250°C/h de taux de montée en température, une température maximale de 1200°C, et une capacité maximale de 50 kg.



Fig III.3 Four à résistance électrique.

III.2.4 Traitements thermiques

Pour notre expérience, nous avons utilisé **quatre échantillons**. Ces échantillons ont été chauffés à **200°C** de revenu et de 960°C dans un four THERMIDOR.



Fig III.4 quatre échantillons dans un four THERMIDOR.

Nature du traitement	Chauffage		Temps de Maintien (min)	Refroidissement (T°C)
	Temps (min)	Température (°c)		
Trempe	60	960	60	À l'huile
Revenu	60	200	180	à l'air

Tableau III.4 Traitement thermique de Z200C12.

III.2.5 Nuance de la plaquette



Fig III.5 Plaquette utilisée

La plaquette **SPKN 1203 EDP** est une plaquette de fraisage carrée en carbure, conçue pour l'usinage surfacage (à 75°) de matériaux en acier, en inox et en fonte. La désignation SPKN indique le type de plaquette (fraisage), 1203 représente ses dimensions (longueur de l'arête et épaisseur), EDP peut désigner une forme de brise-copeaux (EDP signifie peut-être "Edge-D", ce qui suggère une géométrie spécifique pour la gestion des copeaux) et la dernière partie de la référence indique souvent le type de matériau de la plaquette (par exemple, PC584M).

Plaquette de fraisage : C'est une pièce coupante amovible qui est fixée sur une fraise (un outil rotatif) pour réaliser des opérations d'usinage, comme l'aplanissement de surfaces (surfaçage).

Carbure : Il s'agit du matériau dont est faite la plaquette. Le carbure est un matériau très dur et résistant à l'usure, idéal pour couper des métaux comme l'acier, l'acier inoxydable et la fonte.

SPKN 1203 : C'est une désignation normalisée qui indique des caractéristiques spécifiques de la plaquette :

SPKN : Définit la forme et le type de la plaquette. "S" indique généralement une forme carrée (Square), "P" indique un angle de dépouille positif, et "KN" des caractéristiques de coin.

1203 : Indique les dimensions de la plaquette, comme la longueur de l'arête de coupe (généralement 12 mm) et l'épaisseur (généralement 3,18 mm).

EDP (ou EDSR, EDTR, etc.) : Cette partie du code fait référence aux caractéristiques spécifiques du brise-copeaux et de l'arête de coupe. Il peut y avoir différentes variations comme EDSR, EDTR, EDER, etc., qui indiquent des géométries d'arête différentes pour des applications spécifiques (par exemple, pour le surfacage à 75°).

Machines-outils et outillages utilisés

Les essais ont été réalisés sur une fraiseuse de type HURON GRAFFNSTADEN MU5 (Figure III.7). Cette machine est dotée d'une vitesse de rotation de la broche de 2066 tr/min et d'une puissance de moteur de 14,5 kW. Les opérations de surfacage ont été réalisées à l'aide d'une fraise en bout de $\varnothing = 80$ mm (Figure III.8), équipée de deux plaquettes carrées en carbure métallique (Figure III).



Fig III.6 Fraiseuse type HURON GRAFFNSTADEN MU5



Fig III.7 Rugosimètre (Someco RT10 plus).

III.2.6 Conditions d'usinage

Pour les trois essais, la qualité de la surface usinée a été caractérisée par un seul paramètre, **Ra**, qui a été mesuré à l'aide d'un rugosimètre.

(1)

La qualité de la surface usinée a été évaluée selon un seul critère, Ra, mesuré à l'aide d'un rugosimètre, pour les trois essais réalisés.

- Fréquence de rotation N (tr/mn) 574-770-949-1268-1547.
- L'avance $f = 75$ (mm/mn).
- Profondeur de passe $a_p = 1$ (mm).

N (tr/mn)	f (mm/mn)	a_p (mm)	Ra (μm)
574	75	1	4.965
770	75	1	3.842
949	75	1	2.801
1268	75	1	3.842
1547	75	1	1.101

Tab III.5 Résultats de la caractérisation de l'état de surface (Ra) obtenue lors de l'usinage du Z200C12

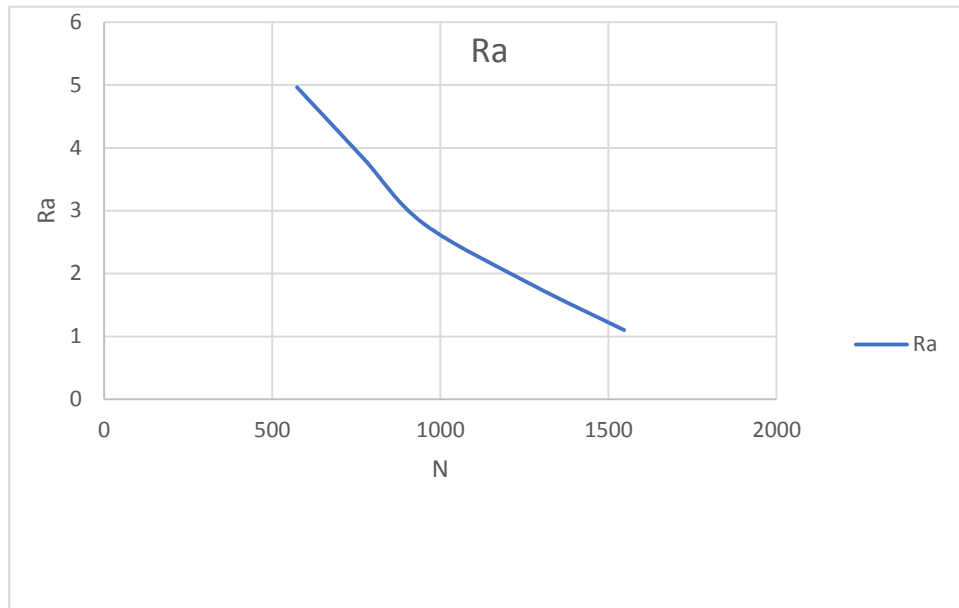


Fig III.8 Influence de la fréquence de rotation N en fonction de la rugosité Ra.

Il est observé que l'augmentation de la fréquence de rotation (N) entraîne une réduction de la rugosité et améliore l'état de surface. Toutefois, la rigidité de la rugosité (Ra) à des vitesses de coupe plus élevées peut être influencée par des vibrations de la machine ou par des erreurs potentielles lors des mesures.

(2)

- Fréquence de rotation N (tr/mn) 1547.
- L'avance $f = 75$ (mm/mn).
- Profondeur de passe $a_p = 0.25 - 0.5 - 0.75 - 1 - 1.25$ (mm).

N (tr/mn)	f (mm/mn)	a_p (mm)	Ra (μm)
1547	75	0.25	1.807
1547	75	0.5	3.875
1547	75	0.75	4.387
1547	75	1	4.754

1547	75	1.25	5.018
------	----	------	-------

Tab III.6 Effet de la profondeur de passe (a_p) sur la rugosité (R_a).

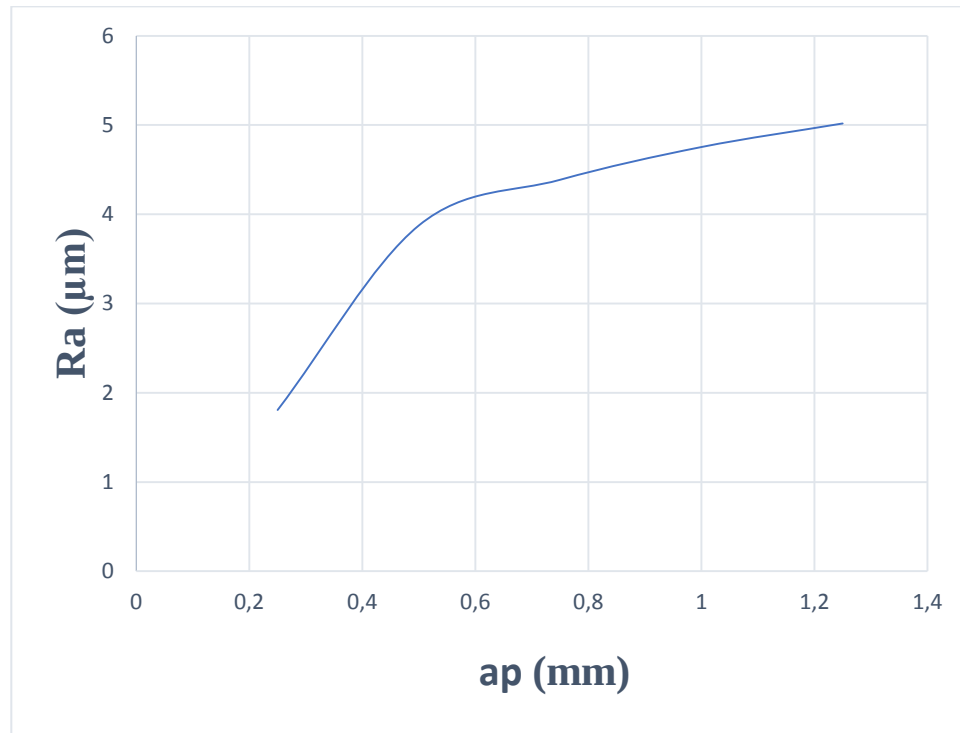


Fig. III.9: Impact de la profondeur de passe (a_p) sur la rugosité (R_a)

Il est observé que la rugosité (R_a) tend à augmenter avec les différentes valeurs de la profondeur de passe (a_p).

(3)

- Fréquence de rotation N (tr/mn) 1547.
- L'avance $f = 25 - 50 - 75 - 100 - 125$ (mm/mn).
- Profondeur de passe $a_p = 1$ (mm).

N (tr/mn)	F (mm/mn)	a_p (mm)	R_a (μm)
1547	25	1	0.135
1547	50	1	0.815
1547	75	1	1.434

1547	100	1	1.855
1547	125	1	2.267

Tab III.7 Impact de l'avance (f) sur la rugosité (Ra).

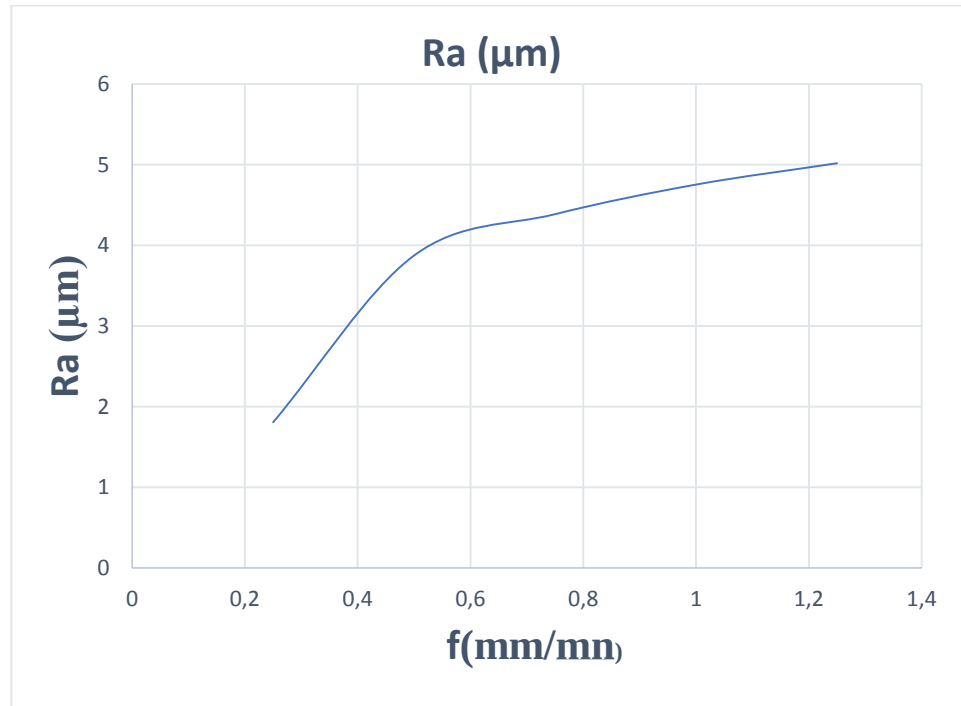


Fig. III.10 : Effet de l'avance (f) sur la rugosité (Ra)

Il est observé que la rugosité (Ra) augmente avec les différentes valeurs de l'avance (f).

CONCLUSION GENERALE

L'analyse que nous avons effectuée concernant la qualité de surface obtenue lors de l'usinage du matériau Z200C12 à température de revenu.

Pour atteindre cet objectif, l'utilisation de différentes techniques et équipements tels que le duromètre, la polisseuse, le microscope optique et le rugosimètre s'est avérée indispensable.

En outre, cette étude a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

- Une augmentation de la fréquence de rotation (N) conduit à une diminution de la rugosité.

- La rugosité (Ra) augmente avec l'élévation de l'avance (f) et de la profondeur de passe (ap).

Références bibliographiques

[1] MAAMRI et NECIB. Optimisation des Paramètres de Coupe pour Minimiser la Consommation d'Energie Pendant le Tournage, Master Génie Productique 2015. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.

[2] GUENEZ et ABIDI. Modélisation de l'effort de coupe lors du tournage des aciers par la méthode de la régression multiple, Master Construction mécanique 2023. UNIVERSITE ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI – TEBESSA.

[3] BELHADJ KAMEL EDDINE. Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface produit lors de l'usinage de l'acier XC55, Master fabrication 2020. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA.

[4] RAYNALD LAHEURTE, « Application de la théorie de seconde gradient a la coupe des matériaux », thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2004.

[5]H. Aouici, Fraisage, TP 2^{ème} Année Génie Mécanique et Productique, Ecole Nationale Supérieure de Technologie, 2013.

[6]A. Belloufi, Cours Procédés de Fabrication, Master Maintenance Industrielle, Université d'Ouargla, 2010.

[7] JEAN-PIERRE CORDEBOIS ET COLL, « Fabrication Par Usinage », DUNOD, Paris 2003

[8] ALAIN PASSERON, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997

[9] S.BENSAADA Coupe des métaux 2001.

[10]M. Arbaoui, A. Tebib, Surveillance de la Température de Coupe Pendant le Tournage de l'Acier AISI 1060 en Utilisant la Logique Floue, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.

[11]Société SANDVIK-COROMANT, Fraisage, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 7 082, pp. 1-5, 2001.

[12]. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89tat_de_surface&oldid=143285569

[13]. https://www.sandvik.coromant.com/frfr/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear

[14] LOURI LAKHTINE, Métallographie et traitement thermique des métaux.

Edition MIR, Moscou 1977.

[15] BENSADA.SAID, Cours Traitement thermique, Classification et désignation des aciers et fontes pdf 2001.

[16] www.techniques-ingenieur.fr,

[17] www.comiteperform.ca,

[17] LOKHMIDE, Métallographie et traitement thermique des métaux, Edition mir, moscow, 1986.

[18] ARFAOUI Ali, CHAKER Med Amir, Matériaux Métalliques, 2009/2010.

[19] www.researchgate.net

