

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Par :

**Aguerssif Thine-hinane**

**Bellagh Nabil**

## **Thème**

---

**L'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface et la forme des copeaux dans le fraisage en avalant et en opposition dans une pièce en aluminium**

---

Soutenu le 06/07/2023 devant le jury composé de :

Mr. IDIR Abdelhek

Président

Mr. BELAMRI Abdelatif

Rapporteur

Mr. OURARI Kamel

Examinateur

# **Remerciements**

*Tout d'abord, ce mémoire représente bien plus que de simples travaux. Ce mémoire est la finalité de cinq longues années d'études. C'est pourquoi nous tenons tout d'abord à adresser nos remerciements à toutes les personnes qui ont su nous soutenir en amont de ce mémoire.*

*Ces premiers remerciements s'adressent donc à nos parents, qui nous ont apporté un soutien tant psychologique que financier, pour leur patience et leur foi en notre réussite tant scolaire que personnelle.*

*Nous remercions également nos professeurs pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont prodigué au cours de ces cinq années passées à l'université ABDEERRAHMANE MIRA-*

*BEJAIA. Nous remercions tout particulièrement notre promoteur Mr BELAMRI ABDELATIF de nous avoir offert un sujet aussi intéressant.*

*Nous souhaiterons remercier les enseignants du département génie mécanique pour le temps que chacun nous a accordé, et plus globalement, pour toutes les informations, références*

*bibliographiques, réflexions, corrections... qu'ils nous ont apporté et qui ont nourri ce travail, et plus précisément Mr HADJOU.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements à tous les membres de jury qui nous font le grand honneur en acceptant de juger ce travail, espérons qu'il soit digne de leurs intérêts.*

## Dédicace

*Du plus profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail :*

*À la mémoire de mon père qui aurait sans aucun doute été très touché de voir  
sa fille accéder à ce diplôme.*

*À ma mère, pour ses conseils et son soutien indéfectible en vue de faire de  
moi une femme préparée pour la vie.*

*À mon très cher grand-père pour son soutien, son affection et la confiance  
qu'il m'a accordée*

*À mon cher frère (Mohamed) et mes sœurs (Razika et Sara).*

*À ma cher nièce Céline - Racha*

*À mes grands-mères, pour leurs attentions particulières, leurs prières et  
leur amour inconditionnel.*

*À mes cousines (CHEHLA, WISSAM, AMEL, ANAIS) À mes copines  
(SORAYA, HOUDA, SARA, LATIFA, IBTISSEM).*

*À tous mes amis (OUSSAMA, CHAMSOU, ALLAEDDINE,  
BELAID, MIDOU...) qui m'ont toujours encouragée, et à qui je souhaite  
plus de succès.*

*À tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom  
AGUERSSIF et ADDALOU, je dédie également ce travail à tous ceux  
qui ont contribué, de près ou de loin, à ma réussite.*

**-A. THINE-HINANE**

## **Dédicace**

*Du profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail:*

*À mes chers parents, pour leur amour infini, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices incommensurables. Votre encouragement constant a été ma lumière dans les moments sombres de cette aventure académique.*

*À mes précieux frères, (Bouzid et Lylia) qui ont toujours été mes compagnons de route, mes confidents et mes motivants. Votre soutien inconditionnel et vos encouragements ont été les piliers sur lesquels je me suis appuyé pour atteindre ce jalon.*

*À mes chers amis (Sofiane, Ghilas, Belaid, Ouaali, Youba, Wassim, Mayes, Fares, Omar, Anies, Roza ...), qui ont partagé avec moi les hauts et les bas de cette aventure universitaire. Votre présence, vos encouragements et vos sourires ont enrichi chaque étape de ce parcours.*

*N.BELLAGH*

## Table des matières

---

**REMERCIEMENTS**  
**DEDICACE**  
**TABLE DES MATIERES**  
**Liste d'abréviation**  
**Liste des tableaux**  
**Liste des figures**

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>3</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur le fraisage.....</b>	<b>5</b>
Introduction .....	5
I.1      Usinage .....	5
I.1.1      Le fraisage .....	5
I.1.2      Principe de fraisage .....	6
I.2      Procédés (Techniques) de fraisage.....	6
I.2.1      Fraisage de face ou en bout.....	6
I.2.2      Fraisage de profil (ou en roulant).....	8
I.2.3      Fraisage combiné .....	9
I.3      Modes de coupe en fraisage .....	9
I.3.1      Fraisage en opposition (conventionnel) .....	10
I.3.2      Fraisage en concordance (en avalant).....	12
I.3.3      Fraisage en avalant et opposition simultanément.....	14
I.4      Opérations de fraisage .....	15
I.4.1      Le surfaçage .....	15
I.4.2      L'épaulement .....	16
I.4.3      Le profilage.....	16
I.4.4      Le rainurage .....	16
I.4.5      L'usinage des poches .....	17
I.4.6      Le perçage .....	17

## Table des matières

---

I.5	Les conditions de coupe en fraisage .....	17
I.5.1	La vitesse de broche (tr/min).....	17
I.5.2	La vitesse de coupe (Vc en m/min).....	18
I.5.3	La vitesse d'avance ou l'avance par minute (Vf en mm/min) .....	19
I.5.4	L'avance par tour (f en mm/tr) .....	19
I.5.5	L'avance par dent (fz en mm/dent) .....	19
I.5.6	La profondeur de coupe, axiale (ap).....	19
I.5.7	La largeur de coupe ou profondeur de coupe radiale (ae).....	20
I.6	Formation des copeaux en fraisage .....	20
I.6.1	Zones de formation du copeau.....	21
I.6.2	La géométrie des brises copeaux.....	22
I.6.3	La fragmentation des copeaux .....	22
I.6.4	Classification des formes des copeaux en fraisage .....	22
I.7	Contrôle des copeaux.....	23
I.8	Les outils de coupe .....	24
I.8.1	Les types .....	24
I.8.2	Caractérisation .....	24
I.9	Les matériaux à outils.....	27
I.9.1	Les aciers.....	27
I.9.2	Les carbures .....	27
I.9.3	Les plaquettes céramiques .....	28
I.9.4	Les plaquettes diamants .....	28
<u>I.10</u>	<u>Les fraiseuses.....</u>	28
I.10.1	Différents types des fraiseuses .....	28
I.10.2	Caractéristiques des fraiseuses .....	30
I.11	Référentiel machine .....	30

## Table des matières

---

I.12	La lubrification .....	30
I.13	La rugosité des surfaces usinée .....	31
I.13.1	Définition.....	31
I.13.2	Mesure de la rugosité .....	31
	Conclusion .....	32
<b>Chapitre II:Matériels d'étude et méthodes expérimentale.....</b>		37
	Introduction :.....	37
II.1	Matériaux et dispositif d'usinage :.....	37
II.1.1	Présentation du matériel.....	37
II.1.2	Matériaux de la pièce à usiner : .....	39
II.2	L'Aluminium :.....	39
II.2.1	Principales propriétés de l'aluminium :.....	39
II.3	Procédure expérimentale :.....	41
	Conclusion .....	45
<b>Chapitre III :Résultat et discussion.....</b>		47
	Introduction :.....	47
III.1	Influence de la profondeur de passe sur l'état de surface et la forme des copeaux : .....	47
III.2	Influence de la vitesse d'avance sur l'état de surface et la forme des copeaux : .....	52
III.3	Influence de la température sur l'état de surface et la forme des copeaux : .....	57
III.4	Influence de la lubrification sur l'état de surface et la forme des copeaux :.....	60
III.5	Influence de nombre de dents de la fraise sur l'état de surface et la forme des copeaux : .....	62
III.6	Influence de la vitesse de rotation sur l'état de surface et la forme des copeaux : .....	64
III.7	Discussion des résultats.....	69
	Conclusion .....	69
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>		70

## Nomenclature

---

**N** : Fréquence de rotation

**Vc** : Vitesse de coupe

**F** : l'avance par tour

**Vf** : Vitesse d'avance

**Ap** : profondeur de passe

**Z** : Nombre de dents

**Mf** : Mouvement d'avance

**R** : la force résultante

**D** : Diamètre de l'outil

**Ae** : profondeur de coupe radiale

**ARS** : acier rapide supérieure

## Nomenclature

---

<b>Tableau II.1</b> : Carte d'identité de l'aluminium.....	40
<b>Tableau II.2</b> : les paramètres de coupes utilisés lors des essais d'usinage.....	44
<b>Tableau III.1</b> : les résultats des essais.....	68

## Nomenclature

---

<b>Figure(1)</b> : Procédé de fraisage.....	5
<b>Figure(2)</b> : Principe de fraisage.....	6
<b>Figure(3)</b> : Fraisage en bout .....	7
<b>Figure(4)</b> : Forme du copeau enlevé par une dent dans le fraisage en bout.....	8
<b>Figure(5)</b> : Fraisage de profil (enroulant).....	8
<b>Figure(6)</b> : Les paramètres géométrique du copeau en fraisage en roulant.....	9
<b>Figure(7)</b> : Fraisage combiné .....	9
<b>Figure(8)</b> : Fraisage en bout en opposition .....	10
<b>Figure(9)</b> : Fraisage en roulant en opposition.....	10
<b>Figure(10)</b> : Forme du copeau dans le fraisage en opposition.....	12
<b>Figure(11)</b> : Fraisage en bout, en avalant.....	13
<b>Figure(12)</b> : Fraisage enroulant, en avalant .....	13
<b>Figure(13)</b> : Forme du copeau en fraisage en avalant.....	14
<b>Figure(14)</b> : Principe du Fraisage en avalant et opposition simultanément .....	15
<b>Figure(15)</b> : Surfaçage.....	16
<b>Figure(16)</b> : Epaulement.....	16
<b>Figure(17)</b> : Rainurage.....	17
<b>Figure(18)</b> : Usinage des poches.....	17
<b>Figure(19)</b> : Vitesse de coupe N.....	18
<b>Figure(20)</b> : Vitesse de coupe Vc.....	19
<b>Figure(21)</b> : L'avance par dent z.....	20
<b>Figure(22)</b> : Profondeur de coupe radiale en surfaçage et axiale pour le fraisage d'épaulement..	21
<b>Figure(23)</b> : Principales zones de cisaillement du copeau.....	23
<b>Figure(24)</b> : microstructure, a) copeau continu, b) copeau dentelé, c) copeau segmenté.....	24
<b>Figure(25)</b> : Types des outils de fraisage.....	25
<b>Figure(26)</b> : Différentes tailles des fraises.....	26
<b>Figure(27)</b> : Les formes de fraises.....	27
<b>Figure(28)</b> : Nombre de dents des fraises.....	27
<b>Figure(29)</b> : Mode de fixation.....	28
<b>Figure(30)</b> : Machine à commande numérique.....	30
<b>Figure(31)</b> : Fraiseuse spéciale.....	31
<b>Figure(32)</b> : Appareillage utilisé lors des essais.....	38
<b>Figure(33)</b> : Diagramme de rugosité.....	42
<b>Figure(34)</b> : La moyenne des stries de la pièce .....	43

## Liste des figures

---

<b>Figure(35)</b> : fraisage en avalant.....	48
<b>Figure(36)</b> : fraisage en opposition.....	49
<b>Figure(37)</b> : fraisage en avalant.....	50
<b>Figure(38)</b> : fraisage en opposition.....	52
<b>Figure(39)</b> : fraisage en avalant.....	53
<b>Figure(40)</b> : fraisage en opposition.....	54
<b>Figure(41)</b> : fraisage en avalant.....	55
<b>Figure(42)</b> : Présentation de l'effet de l'arrêté rapportée sur la surface de la pièce usinée.....	56
<b>Figure(43)</b> : fraisage en opposition.....	57
<b>Figure(44)</b> : fraisage en avalant.....	58
<b>Figure(45)</b> : fraisage en opposition.....	59
<b>Figure(46)</b> : fraisage en avalant.....	61
<b>Figure(47)</b> : fraisage en opposition.....	62
<b>Figure(48)</b> : fraisage en avalant.....	63
<b>Figure(49)</b> : fraisage en opposition.....	64
<b>Figure(50)</b> : fraisage en avalant.....	66
<b>Figure(51)</b> : fraisage en opposition.....	67

## *Introduction générale*

L'usinage est un procédé essentiel dans la fabrication de pièces en métal, permettant de leur donner forme et précision. Lors de l'usinage, les copeaux de matériau sont générés par l'interaction entre l'outil de coupe et la pièce à usiner. La forme et les caractéristiques de ces copeaux sont influencées par plusieurs paramètres de coupe. Dans le cas spécifique de l'usinage de pièces en aluminium en fraisage, deux modes couramment utilisés sont l'usinage en avalant et l'usinage en opposition.

Cette étude a pour objectif d'analyser l'influence des paramètres de coupe sur la forme des copeaux générés lors de l'usinage en avalant et en opposition d'une pièce en aluminium. Comprendre ces paramètres et leurs effets sur la formation des copeaux est crucial pour optimiser le processus d'usinage, améliorer la qualité des pièces produites et prolonger la durée de vie des outils de coupe.

Les copeaux générés lors de l'usinage peuvent varier considérablement en termes de forme, de longueur, d'épaisseur et de fragilité. Ces caractéristiques des copeaux sont étroitement liées aux paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe et la géométrie de l'outil.

L'aluminium, en tant que matériau couramment utilisé dans l'industrie, présente des propriétés spécifiques qui influencent la formation des copeaux lors de l'usinage. Sa malléabilité, sa ductilité et sa conductivité thermique sont autant de facteurs qui doivent être pris en compte pour comprendre comment les copeaux se forment et se comportent lors du processus d'usinage.

En étudiant l'influence des paramètres de coupe sur la forme des copeaux dans l'usinage en avalant et en opposition d'une pièce en aluminium, nous pourrons développer des recommandations et des stratégies d'usinage optimales. Cela permettra d'améliorer l'efficacité et la rentabilité du processus d'usinage, ainsi que la qualité des pièces usinées en aluminium.

Dans ce cadre, ce travail de fin d'étude a pour thème «L'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface et la forme des copeaux dans le fraisage en avalant et en opposition dans une pièce en aluminium». Il a pour objectif d'étudier la qualité des surfaces usinées ainsi que les copeaux obtenus sous l'influence de différents paramètres de coupes dans le fraisage en avalant et en opposition.

Le présent travail s'articulera autour de deux parties principales :

- La première partie, de nature théorique, comprend un chapitre consacré aux généralités de l'usinage.

## Introduction générale

---

- La deuxième partie, de nature expérimentale, est composée de deux chapitres.

Le premier chapitre donne un aperçu sur les différentes méthodes expérimentales utilisées pour étudier l'état de surface d'une pièce en aluminium usinée en avalant et en opposition, ainsi que la forme des copeaux obtenus en fonction de la variation des paramètres de coupe.

Le deuxième chapitre expose les résultats obtenus à partir des différents essais. Il met en évidence la qualité des surfaces usinées, ainsi que la forme et la taille des copeaux générés lors de l'usinage.

*Chapitre I*

*Généralités sur le*

*fraisage*

## Introduction

Dans la fabrication des pièces mécanique : plusieurs techniques sont utilisées afin de donner à la pièce la forme désirée : parmi ces techniques l'usinage par enlèvement de matière constitue l'une des plus couramment utilisées dans l'industrie mécanique

Ce chapitre, présente les généralités relatives au procédé d'usinage par enlèvement de matière en particulier le fraisage.

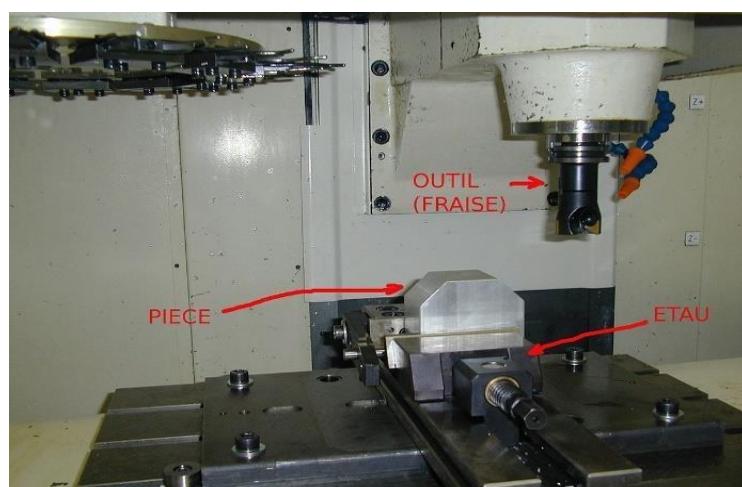
### I.1 Usinage

L'usinage est l'un des procédés les plus répandus dans la production des pièces mécaniques. Il vise à concevoir sa forme finale en éliminant les couches de matériau indésirable. En fait, le terme usinage désigne l'ensemble des procédés de mise en forme impliquant l'enlèvement de matière par des outils de coupe.[1]

#### I.1.1 Le fraisage

Le fraisage est un procédé de fabrication par enlèvement de matière sous forme de copeaux : Il résulte de la combinaison du mouvement de rotation de l'outil de coupe (la fraise) et du mouvement d'avance donnée à la pièce à usiner.

Le fraisage est réalisé à l'aide d'une machine-outil appelée fraiseuse : Il convient particulièrement à la production de pièces prismatiques ; ainsi qu'à la réalisation de formes complexes lorsque la machine est équipée de commande numérique.

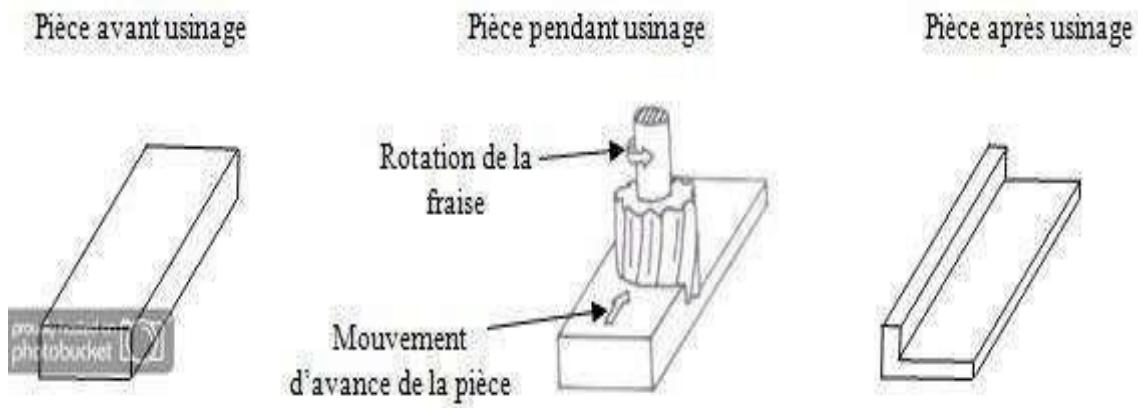


**Figure(1) :** Procédé de fraisage

### I.1.2 Principe de fraisage

L'outil (fraise) est toujours animé d'un mouvement de rotation autour de son axe ; appelé mouvement de coupe (Mc) Ce mouvement rapide s'exprime en tours par minute (tr/min).). L'outil est maintenu dans un porte –outil, lui-même fixé sur la broche de la machine.

Un ensemble de chariots qui se déplaçant selon trois axes orthogonaux permet de transmettre à la pièce un mouvement d'avance (Ma), c'est-à-dire un déplacement lent exprimé en millimètres par minute (mm/min) noté encore Mf. [3]



**Figure(2) : Principe de fraisage**

## I.2 Procédés (Techniques) de fraisage

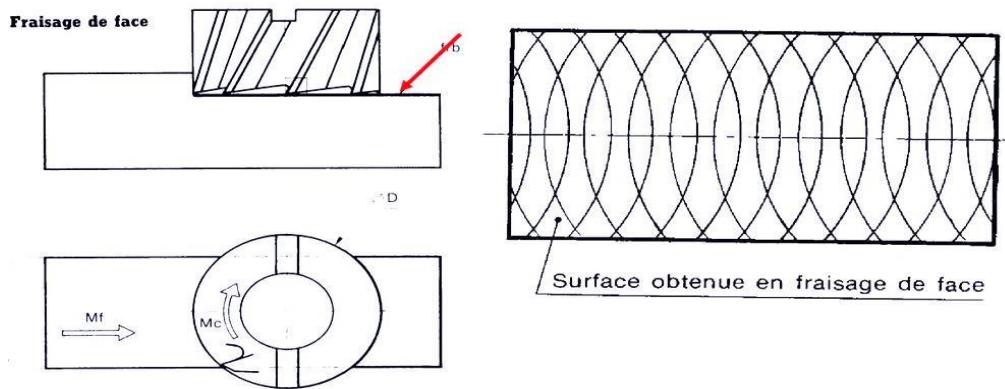
### I.2.1 Fraisage de face ou en bout

Ce mode de fraisage est réalisé avec le bout d'une fraises « une taille ou deux tailles» généralement à dent rapportées. Dans ce cas, l'axe de l'outil est perpendiculaire à la surface à usiner. Ce procédé permet d'obtenir des surfaces planes, exemptes des traces liées à la forme génératrice d'un outil de coupe. [5]

Lors du fraisage en bout, la surface usinée présente une série de courbes sécantes appelées cycloïdes, correspondant aux traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce. [9] La précision géométrique obtenue est supérieure à celle produite par le fraisage de profil. [5]

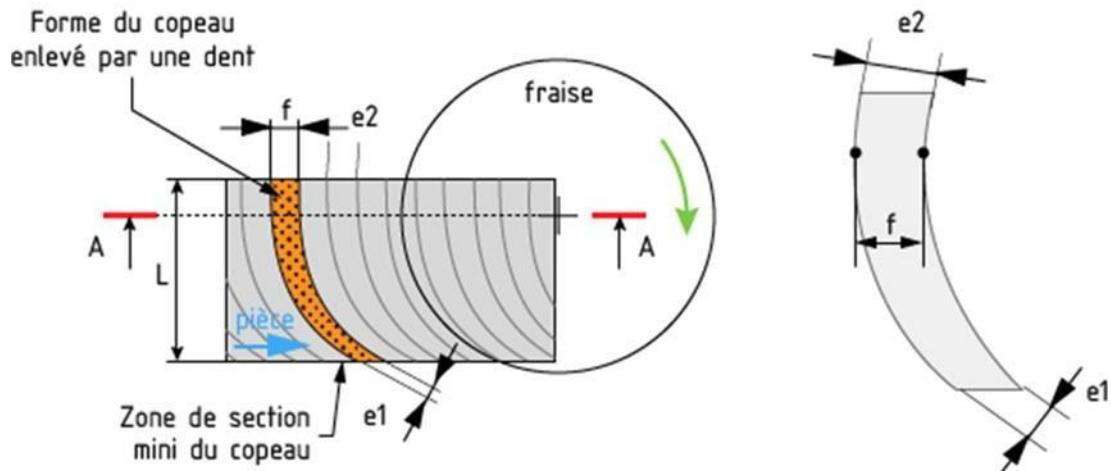
Pour passer du travail en opposition au travail en avalant il suffit d'inverser le décalage entre l'axe de la fraise et l'axe de la pièce.

- **Fraisage en bout (de face)**



**Figure(3) : Fraisage en bout**

Lors du fraisage en bout, les copeaux présentent une épaisseur uniforme, ce qui entraîne une charge machine plus régulière. [9]



**Figure(4) : Forme du copeau enlevé par une dent dans le fraisage en bout**

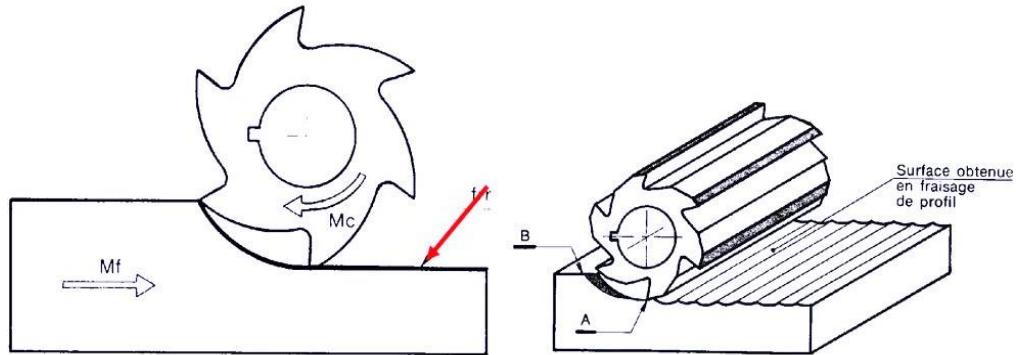
### I.2.2 Fraisage de profil (ou en roulant)

Dans ce type de fraisage, la coupe s'effectue par le diamètre de la fraise, dont l'axe est parallèle à la surface à usiner. Ce procédé permet d'obtenir des surfaces planes ou de formes variées, à différentes position.

La surface usinée se caractérise par une série d'ondulations laissées par les dents de la fraise. Elles dépendent de l'avance et du diamètre de l'outil. [9]

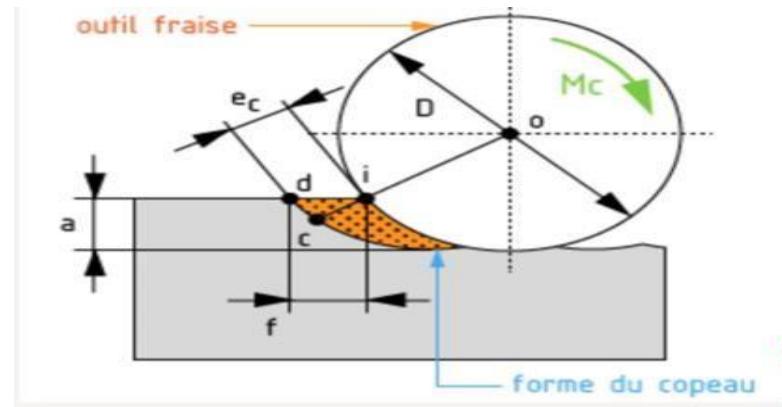
Ce mode d'usinage peut être réalisé aussi bien en en opposition qu'en avalant. [5]

- **Fraisage de profil (en roulant)**



**Figure(5) : Fraisage de profil (enroulant)**

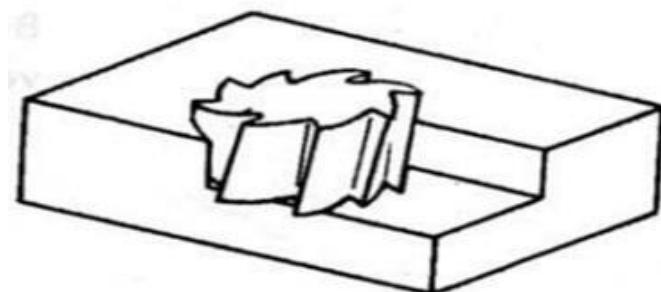
Les copeaux produits lors du fraisage en roulant sont des copeaux mini. [5]



**Figure(6) :** Les paramètres géométrique du copeau en fraisage en roulant

### I.2.3 Fraisage combiné

Le fraisage en bout et le fraisage en roulant peuvent être appliqués au cours de la même opération. Cela concerne les fraises à deux ou trois tailles, travaillant simultanément en face et en profil. Dans ce cas, l'outil coupe à la fois avec son diamètre et sa partie frontale. [9]



**Figure(7) :** Fraisage combiné

### I.3 Modes de coupe en fraisage

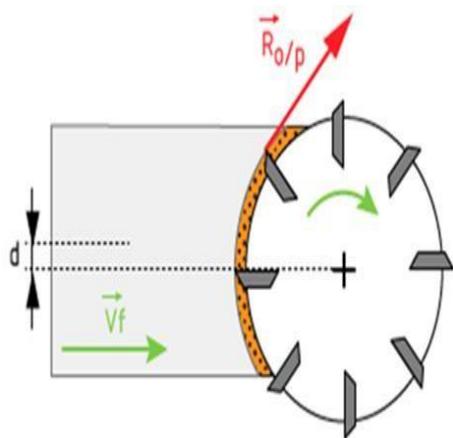
Il existe deux modes de travail en fraisage, en avalant et en opposition. La différence entre ces deux modes s'exprime plus clairement dans le cas du fraisage en roulant.

### I.3.1 Fraisage en opposition (conventionnel)

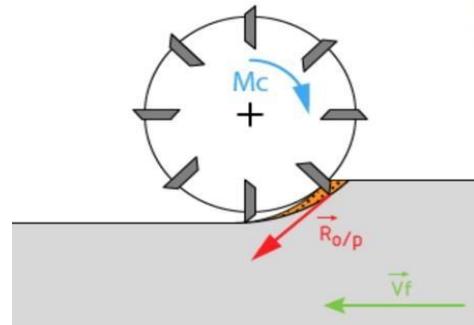
On parle de fraisage en opposition (ou conventionnel), lorsque le mouvement d'avance de la pièce à fraiser est opposé au sens de rotation de la fraise, cette dernière attaque le copeau au point d'épaisseur minimale. Dans ce cas, les dents glissent sur la surface usinée avant la rotation de la fraise. Cette méthode entraîne un frottement important, provoquant une usure accélérée des tranchants de la fraise. [5]

Ce mode est particulièrement adapté à l'usinage de pièces moulées, forgées ou cémentées. Ceci parce que la coupe conventionnelle commence sous la

surface brute ou usinée du matériau «cette méthode est utilisée uniquement lorsque la machine-outil a un manque de rigidité ou présente des jeux (fraiseuses anciennes générations, de mauvaise qualité, usée...)»



**Figure(8) :** Fraisage en bout en opposition



**Figure(9) :** Fraisage en roulant en opposition

- **Influence sur le mouvement d'avance**

Dans le fraisage en opposition, la fraise applique constamment le plateau porte pièce contre le filetage de la vis d'avance. En d'autres termes, le jeu du

mécanisme d'avance est toujours du même côté, ce qui garantit une avance stable, continue et sans à-coup. [9]

La force de coupe résultante  $R$  (l'effort de coupe) est dirigée dans le sens opposé à  $M_a$ . Il a tendance à soulever la pièce, poussant contre le côté de l'écrou où le boulon est déjà en contact. [10]

- **Influence sur la déformation de la pièce**

L'effort de coupe du fraisage en opposition tend toujours à écarter et à arracher la pièce de la table. [10]

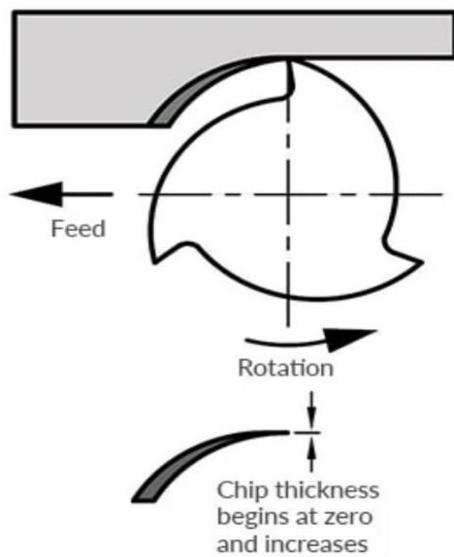
- **Influence sur les conditions de coupe et sur la précision dimensionnelle**

Dans le cas du fraisage en opposition, la coupe commence par une épaisseur nulle. Les arêtes de coupe glissent au lieu de couper, provoquant des frottements importants entre l'outil et la pièce. [4] Jusqu'à obtention du copeau minimal, défini par le rayon de son arête de coupe. La cote obtenue s'en ressentira. [6]

- **Formation du copeau**

Dans le fraisage conventionnel, l'arête de coupe pénètre dans la pièce à une profondeur de coupe nulle, donc l'épaisseur des copeaux est mince à l'attaque et maximale à la fin de la trajectoire de la dent [4]. Ils peuvent être entraînés par la fraise et se coincer entre la pièce et les arêtes de coupe, endommageant la pièce et la fraise. [2]

Dans le fraisage conventionnel, les copeaux peuvent se coincer entre les dents et la pièce à usiner, entraînant la rupture des dents. Le fraisage en avalant, quant à lui, cisaille le même copeau en deux parties, ce qui n'endommage pas l'arête de coupe. [2]

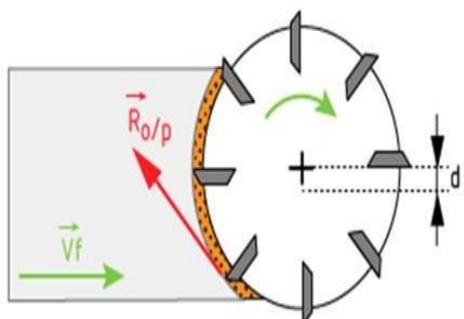


**Figure (10) :** Forme du copeau dans le fraisage en opposition

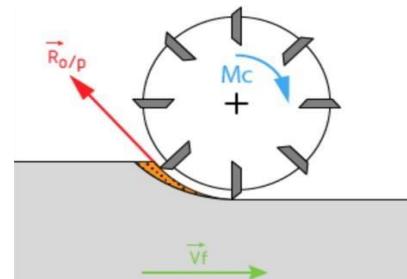
### I.3.2 Fraisage en concordance (en avalant)

On parle de fraisage en avalant (concordance), lorsque le sens de rotation de la fraise et celui du déplacement de la pièce à fraiser vont dans la même direction. Les tranchants de la fraise attaquent le copeau au point d'épaisseur maximal, cette façon de faire, en fraisage horizontal, plaque la pièce sur la table de la fraiseuse et permet d'obtenir des surfaces finies de bonne qualité. [9]

Ce mode de fraisage nécessite l'utilisation des fraiseuses spéciales disposant d'une table équipée d'un système de translation avec rattrapage de jeu, pour éviter les mouvements saccadés de la table. Ce qui est le cas sur les machines modernes. Ainsi on évite que la pièce soit "entrainée dans la fraise". [5]



**Figure (11) :** Fraisage en bout, en avalant  
avalant



**Figure (12) :** Fraisage en roulant, en

- **Influence sur le mouvement d'avance**

Dans le fraisage en avalant, l'entrée d'une dent, qui se fait du grand côté du copeau en virgule, donc à l'effort maximal, tend à inverser brutalement la position des jeux, ce qui provoque un brusque à-coup de l'avance. La fraise tend alors à grimper sur la pièce, ce qui peut amener à la rupture d'une dent de la fraise, au coincement de la machine ou même au faussement de l'arbre porte fraise. Ceci signifie que l'on peut fraiser en avalant que sur une fraiseuse dont le mécanisme d'avance est muni d'un système efficace de ratrappage du jeu. Ce sera par exemple :

- Un écrou de mouvement doublé d'un second écrou, avec entre eux, un ressort précontraint.
- Une vis à billes à recirculation précontrainte, solution généralement adoptée sur les machines récentes.

La force de coupe résultante  $R$  est dirigée dans le même sens que  $M_a$ . Il a tendance à pousser la pièce contre la table, mais aussi à la tirer en raison du jeu fonctionnel dans le système vis-écrou.  
[9]

- **Influence sur la déformation de la pièce**

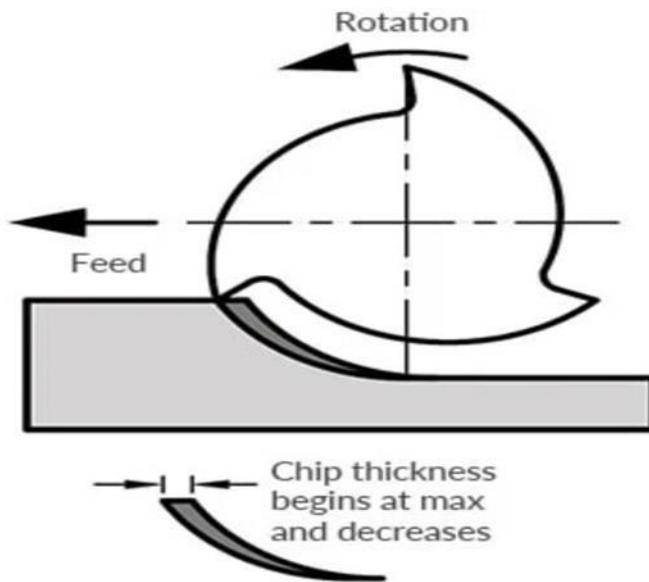
Le fraisage en avalant tend toujours à plaquer la pièce sur la table. Dès lors, la précision de forme sera toujours meilleure en avalant

- **Influence sur les conditions de coupe et sur la précision dimensionnelle**

En avalant, la fraise commencera son travail par le copeau maximal, ce qui permettra d'obtenir exactement la cote voulue. [10]

- **Formation du copeau**

Dans le fraisage en avalant l'épaisseur des copeaux est maximale à l'attaque (travail dû à l'impact, ce qui nécessite une réduction de l'avance), puis diminue progressivement jusqu'à zéro en fin de trajectoire de dent : bonnes conditions de coupe, meilleur état de surface. [6]



**Figure (13) :** Forme du copeau en fraisage en avalant

#### ➤ Avantages

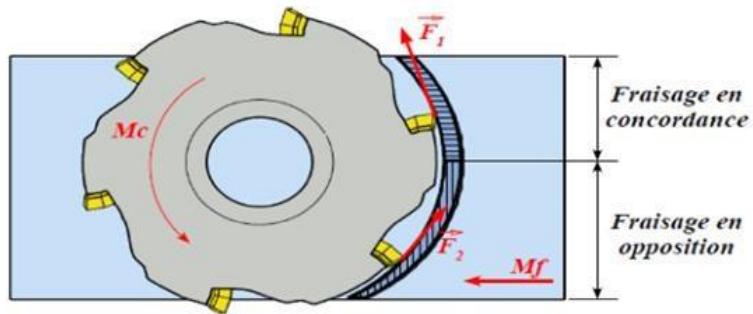
Ce mode de coupe est efficace et assure une durée de vie longue et fiable de l'outil, meilleur état de surface, spécialement dans les aciers inoxydables, les aluminiums ou les alliages de titane. [5]

#### ➤ Inconvénients

Risque de casse de dents, dus aux rattrapages de jeux possibles dans les déplacements, ou lorsque la machine manque de rigidité. [5]

### I.3.3 Fraisage en avalant et opposition simultanément

En fraisage de face, la zone fraisée est simultanément en opposition et en concordance. Dans la pratique, sur machines conventionnelles, il convient de désaxer la pièce, dans le but d'obtenir une zone fraisée en opposition plus large que la zone en concordance.

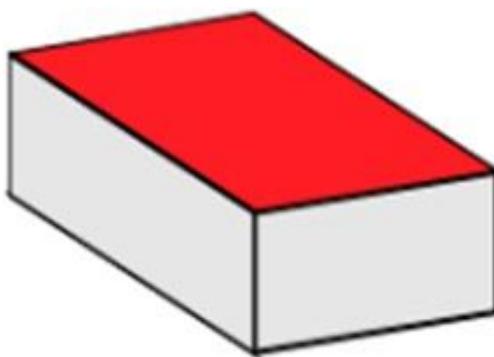


**Figure (14) :** Principe du Fraisage en avalant et opposition simultanément

## I.4 Opérations de fraisage

### I.4.1 Le surfaçage

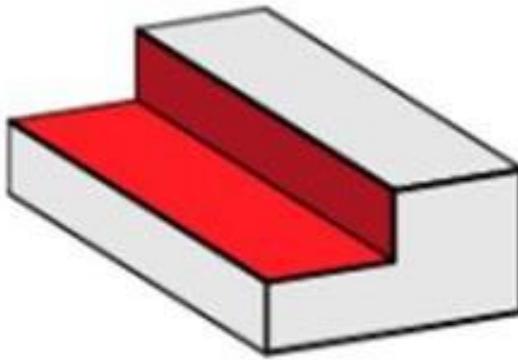
Le surfaçage est une opération d'usinage impliquant plusieurs arêtes de coupe agissant principalement celles situées à la périphérie et dans une moindre mesure, dans la partie centrale de l'outil. La fraise au contact de la pièce tourne perpendiculairement à la direction de l'avance radiale. [4]



**Figure (15) :** Surfaçage

#### I.4.2 L'épaulement

Est une opération qui consiste à usiner deux surfaces planes perpendiculaires associées. [7]



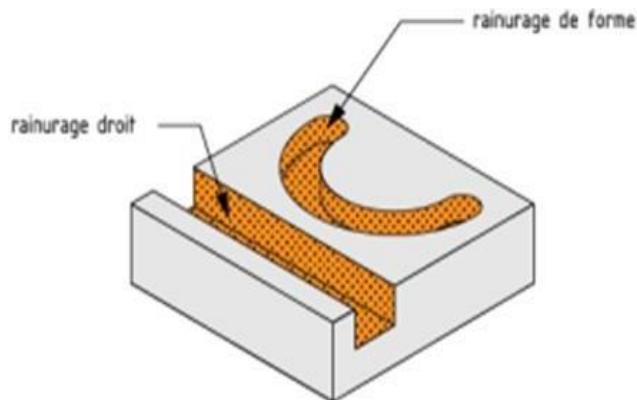
**Figure (16) : Epaulement**

#### I.4.3 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. [7]

#### I.4.4 Le rainurage

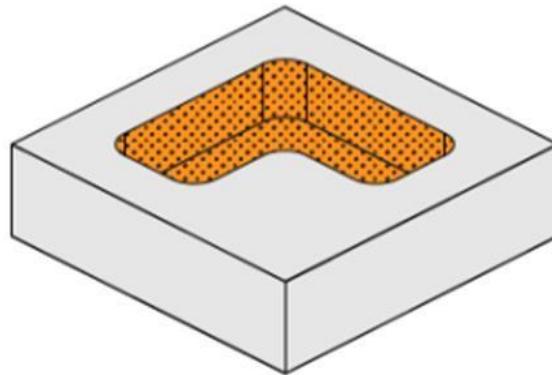
Le rainurage est une opération de fraisage qui consiste à usiner trois surfaces orthogonales entre elles. [7]



**Figure (17) : Rainurage**

#### I.4.5 L’usinage des poches

Une poche est une cavité délimitée par des surfaces verticales, éventuellement inclinées (avec dépouille), et par des surfaces planes de forme diverses. [7]



**Figure (18) :** Usinage des poches

#### I.4.6 Le perçage

Le processus de perçage, tout comme le tournage, combine deux mouvements : un mouvement de rotation et un mouvement linéaire. Toutefois la différence réside dans la formation et de l’évacuation des copeaux, qui sont plus délicates lors du perçage. Plus le trou est profond, plus il devint difficile de contrôler l’opération et d’évacuer les copeaux.

### I.5 Les conditions de coupe en fraisage

#### I.5.1 La vitesse de broche (tr/min)

La vitesse de broche correspond au nombre de tours effectués par l’outil de fraisage par minute [2]. Elle dépend du diamètre de la fraise ou du foret (fraisage/perçage). Ce paramètre est calculé à l’aide de la formule :  $N = 1000 * VC/p * D$

A partir des tableaux de fréquences de rotations disponibles sur les machines-outils, la valeur la plus proche est sélectionnée. [4]

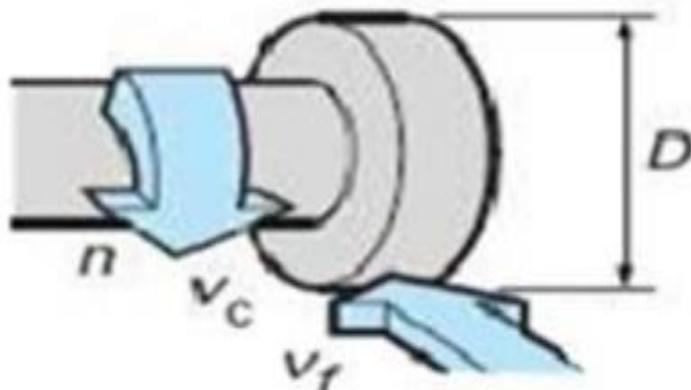


Figure (19) : Vitesse de coupe N

### I.5.2 La vitesse de coupe (Vc en m/min)

La vitesse de coupe exprime la distance relative en mètre par minute, parcourue par un point de l'outil par rapport à la pièce.

Ce paramètre a un effet direct sur la durée de vie de l'outil, il varie :

- En fonction de type de matériau à usiner et du matériau constituant l'outil.
- Selon la nature de l'opération (ébauche ou finition).
- Selon le type d'usinage effectué (utilisation d'un facteur de réduction pour les traitements délicats).

En fonction des conditions de lubrifications (usinage à sec ou lubrifié).

Les valeurs usuelles des vitesses de coupe, selon la matière à usiner et le matériau de l'outil, sont données dans des abaques. [5]

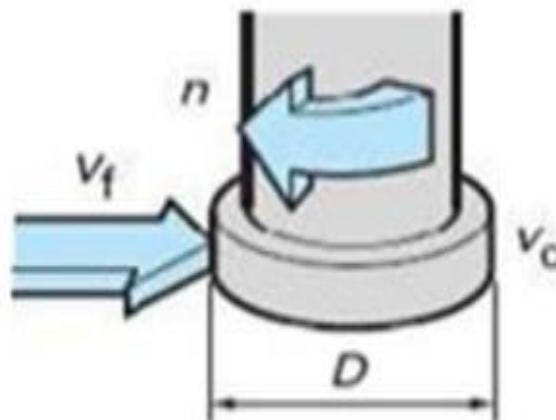


Figure (20) : Vitesse de coupe Vc

### I.5.3 La vitesse d'avance ou l'avance par minute (Vf en mm/min)

L'avance par minute est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. Egalement appelée avance de table, ce paramètre se calcule selon la formule :  $V_f = F_z * Z * N$  [5].

### I.5.4 L'avance par tour (f en mm/tr)

L'avance par tour est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfacer à travailler en finition. Elle indique la distance parcourue par l'outil au cours d'une rotation complète. [5]

### I.5.5 L'avance par dent (fz en mm/dent)

L'avance par dent s'exprime par le mouvement de la pièce.

L'avance détermine principalement la rugosité de la surface. Elle est généralement plus importante en ébauche qu'en finition. Les valeurs d'avances, en fonctions de l'état de surface souhaitées, sont également données par des abaques. [4]

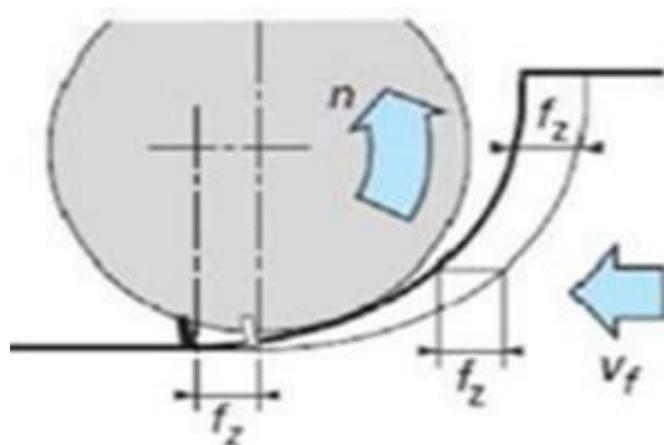


Figure (21) : L'avance par dent fz

### I.5.6 La profondeur de coupe, axiale (ap)

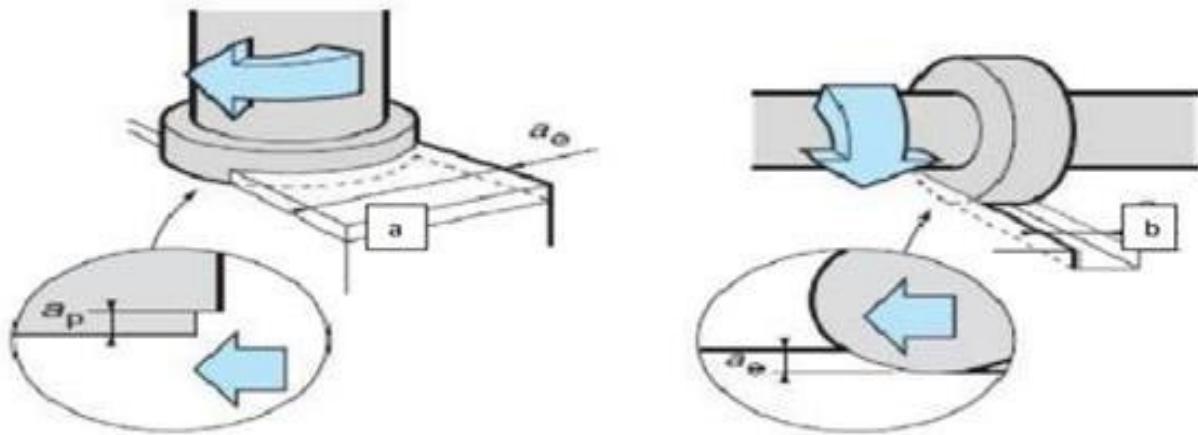
La profondeur de coupe axiale (ap), en surfaçage, ou radiale (ae), lors du fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. [2]

Elle diminue à mesure que les exigences dimensionnelles, géométrique ou d'état de surface deviennent plus rigoureuses. Cependant, la profondeur de passe ne doit pas être

inférieur à l'épaisseur minimale du copeau. Sa valeur maximale est limitée par la dureté de l'outil et la puissance de la machine. [4]

### I.5.7 La largeur de coupe ou profondeur de coupe radiale (ae)

La largeur de coupe ou profondeur de coupe radiale (ae) en surfaçage, et axiale (ap) en fraisage d'épaulements, représente la distance parcourue par l'outil sur la surface de la pièce. [5]



**Figure (22) :** Profondeur de coupe radiale en surfaçage (a) et axiale pour le fraisage d'épaulement

### I.6 Formation des copeaux en fraisage

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, l'arête de l'outil pénètre dans la pièce et enlève le copeau. Ce phénomène résulte de plusieurs efforts mécaniques complexes tels que la compression de la matière sur la face d'attaque, le cisaillement dynamique du copeau le long du plan de cisaillement et l'écoulement du copeau. [4]

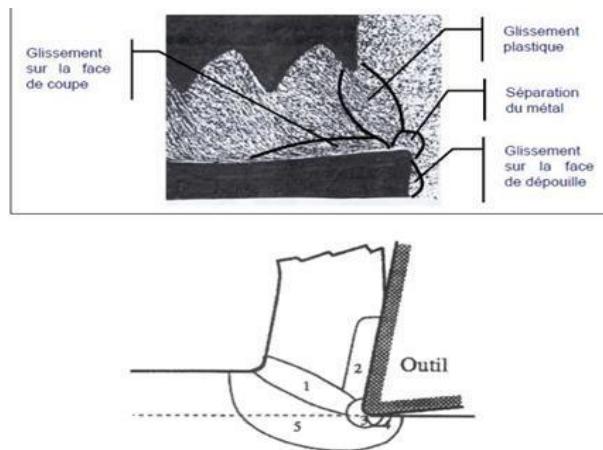
L'outil suit une trajectoire relative à la pièce à usiner, ses déplacements étant assurés par le composant constitutif de la machine-outil. Le frottement du copeau sur la face de coupe et celui

de la pièce sur la face de dépouille provoquent une augmentation importante de la température, pouvant entraîner une fusion locale du copeau. Les principaux facteurs qui affectent la formation du copeau et l'état des surfaces usinées sont les paramètres de coupe. Pour obtenir des résultats satisfaisants, ceux-ci doivent être soigneusement choisis et ajustés. [9]

### I.6.1 Zones de formation du copeau

Les observations micrographiques mettent généralement en évidence la présence de cinq zones lors de la formation du copeau.

- **Zone 1 :** (zone du cisaillement primaire) : Liée au changement de direction d'écoulement de la matière ; cette zone est le siège d'un cisaillement intense et de forts taux de cisaillement, entraînant une élévation thermique importante due à la dissipation.
- **Zone 2 :** (zone de cisaillement secondaire) : Induite par le frottement du copeau sur l'outil, elle est soumise à des taux de cisaillement élevés et à une forte augmentation de température engendrée par le frottement.
- **Zone 3 :** (zone de séparation du métal en pointe d'outil) : Dans cette région, l'outil exerce un effort de compression qui refoule le matériau et provoque la séparation entre le copeau et la pièce usinée. La présence d'un chanfrein entre la face de la coupe et la face de dépouille au niveau de cette zone favorise la formation d'arêtes rapportées.
- **Zone 4 :** (zone de frottement au niveau de la surface de dépouille) : zone de frottement entre la face de dépouille et la surface usinée ; les interactions y sont moins intenses que dans la zone secondaire, mais la matière de la pièce y est directement sollicitée.
- **Zone 5 :** (zone d'amorce de déformations). La formation du copeau engendre des déformations plastiques et élastiques en amont de l'outil, conduisant à des contraintes résiduelles en surface de la pièce usinée. [4]



**Figure (23) : Principales zones de cisaillement du copeau**

### I.6.2 La géométrie des brises copeaux

Lorsque le copeau est produit de façon continue, il peut s'enrouler autour de la pièce ou de l'outil, son évacuation devient délicate et dangereuse, et l'état de surface de la pièce peut se détériorer. Il est donc nécessaire de fractionner le copeau. Ce rôle est assuré par le brise-copeau (dents en taillées), terme désignant l'aménagement des formes de la face de coupe des plaquettes carbure. [4]

### I.6.3 La fragmentation des copeaux

La fragmentation des copeaux dépend de nombreux paramètres parmi lesquels deux jouent un rôle essentiel : l'avance par tour (s) et la profondeur de coupe (a). [4]

### I.6.4 Classification des formes des copeaux en fraisage

Les copeaux de fraisage présentent généralement une forme hélicoïdale. Leurs extrémités se trouvent à l'intérieur de la spirale, elles se forment lorsque l'arête de coupe pénètre dans le matériau.

En fraisage à scandant, cette extrémité est la plus épaisse.

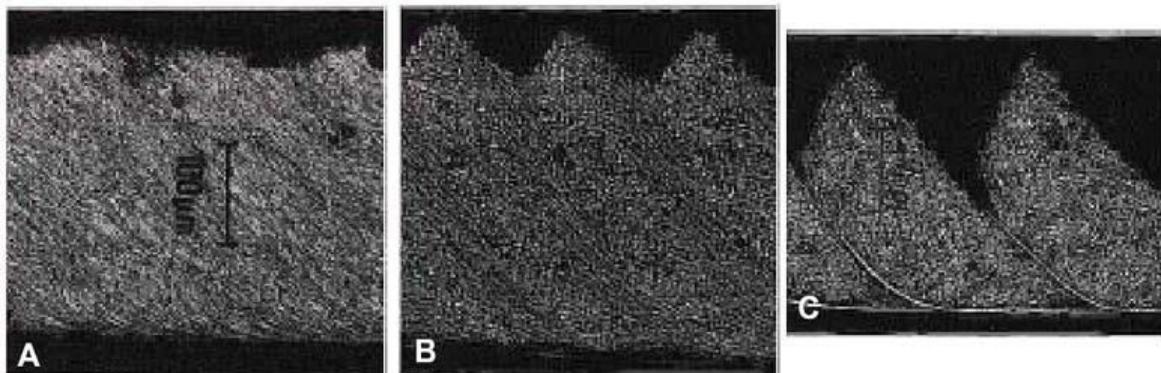
En raison de la complexité du mécanisme de formation du copeau, il est difficile de maîtriser totalement les résultats de la coupe en termes de forme et de nature du copeau obtenu. Les copeaux peuvent être classés en deux types distincts : continus et discontinus.

#### - **Les copeaux continus (avec ou sans bande)**

Les copeaux sont formés sous un état de déformation plastique stationnaire, typiquement lors d'un processus de cisaillement adiabatique.

#### - **Les copeaux discontinus (avec ou sans segmentation)**

Les copeaux sont formés dans un état de déformation plastique non stationnaire. La segmentation des copeaux résulte de phases de fissuration et de rupture du matériau usiné.



**Figure (24) :** microstructure, a) copeau continu, b) copeau dentelé, c) copeau segmenté

### I.7 Contrôle des copeaux

Le contrôle du fraisage par mesure et observation des copeaux :

- La hauteur dépend de la profondeur de coupe ou les copeaux les plus élevés sont obtenus par le contournage.
- La longueur dépend de la largeur de passe et du diamètre de l'outil ; plus le diamètre de l'outil est grand, plus le copeau long.

- L'épaisseur est proportionnelle à l'avance par dent et à la largeur de passe.
- Les copeaux de fraisage doivent être réguliers.
- Les copeaux de fraisage doivent avoir une couleur homogène.
- Lors de l'arrosage, il ne doit pas y avoir de traces d'échauffement sur le copeau.[10]

## I.8 Les outils de coupe

### I.8.1 Les types

Les outils de fraisage peuvent être classés en : ARS ; à plaquettes en carbure amovibles et à plaquettes en carbure brasées



**Figure (25) :** Types des outils de fraisage

### I.8.2 Caractérisation

#### a. La taille

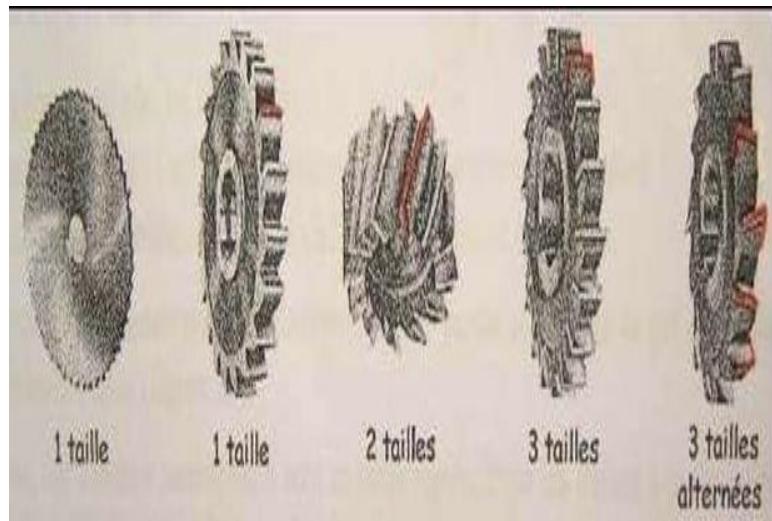
Il existe des fraises disponibles en différentes tailles, définies notamment par le nombre d'arêtes tranchantes par dent. Ces fraises peuvent être classées en une taille, deux tailles ou trois tailles différentes [4]

#### b. Dimensions

Pour une fraise deux tailles : diamètre et hauteur taillée.

Pour une fraise trois tailles : diamètre de l'outil, épaisseur, diamètre de l'alésage.

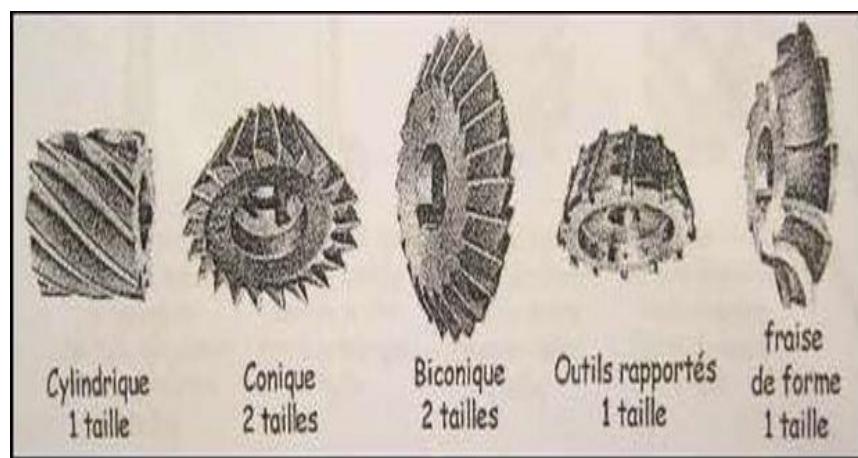
Pour une fraise conique : l'angle, le diamètre de l'outil et l'épaisseur.



**Figure (26) : Différentes tailles des fraises**

### c. La forme

En fonction de l'orientation des génératrices par rapport à l'axe de l'outil, on distingue différents types de fraises : les fraises cylindriques, coniques et les fraises de forme.



**Figure (27) : Les formes de fraises**

#### d. La denture

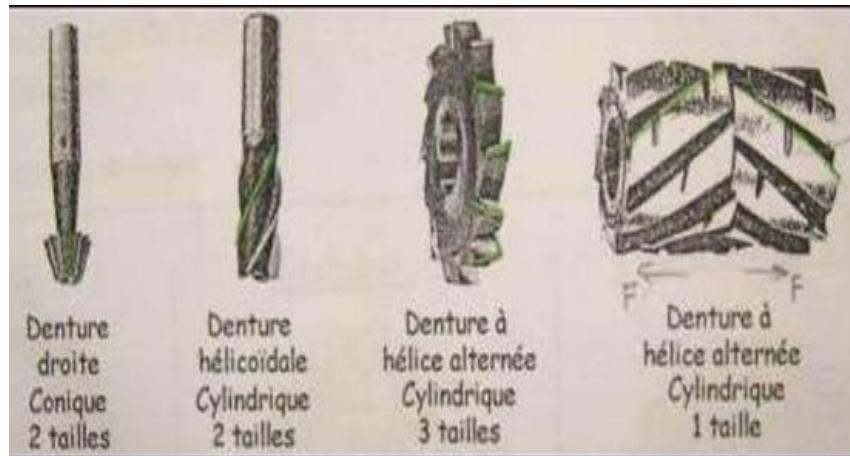
Les dentures des fraises peuvent être classées en fonction de l'inclinaison de leurs arêtes tranchantes par rapport à l'axe de la fraise. On distingue ainsi les dentures hélicoïdales à droite, les dentures hélicoïdales à gauche et les dentures à double hélice alternées. Lorsque l'arête tranchante est parallèle à l'axe de la fraise, la denture est considérée comme droite. [12]



**Figure (28) :** Nombre de dents des fraises

#### e. Mode de fixation

Il existe déférent mode de fixation frais a trou taraude, frais a trou lisse fraise à queue cylindrique, frais à queue conique.



**Figure (29) : Mode de fixation**

## I.9 Les matériaux à outils

### I.9.1 Les aciers

Les outils en HSS sont les plus couramment utilisés car ils sont les moins chers, mais ont une durée de vie plus courte, surtout ceux renforcés de fibre de verre. Leur qualité de coupe est bonne à moyenne. [8]

### I.9.2 Les carbures

Les outils en carbures métalliques ont une résistance à l'abrasion supérieure à celle des aciers rapides et ont un bon rapport prix/performance. Les carbures métalliques (de tungstène mais aussi de cobalt, de titane ou de tantale), sont obtenus par frittage. L'outil peut être entièrement en carbure ou, couramment (parce que c'est moins cher), constitué d'une plaquette rapportée et fixée sur un support métallique classique. [8]

Ces outils possèdent une dureté proche de celle du diamant, bien que fragiles et sensibles aux variations de température, les carbures métalliques conservent leurs duretés jusqu'à 1000°C. L'avantage de ce type de matériaux est la possibilité d'utiliser des vitesses de coupe élevées et d'effectuer de fortes passes dans l'usinage de divers matériaux. [5]

### I.9.3 Les plaquettes céramiques

Les céramiques possèdent une dureté comparable à celle des carbures métalliques. Ces matériaux conservent leurs propriétés jusqu'à des températures proches de 1200°C.

Ces plaquettes sont utilisées pour la superfinition ou pour l'usinage des fontes en ébauches lourdes à vitesses de coupe élevée. [5]

### I.9.4 Les plaquettes diamants

Les plaquettes en diamants poly cristallin permettent l'usinage de tous les matériaux ferreux durs et abrasifs et offrent un excellent état de surface. [5]

## I.10 Les fraiseuses

### I.10.1 Différents types des fraiseuses

#### a- Fraiseuses d'outillage (généralement universelles)

Les fraiseuses universelles sont celles qui combinent les fonctions des fraiseuses horizontales et verticales.

Dans les fraiseuses universelles, la table porte-pièces peut également être rotative elles conviennent à des travaux ponctuels et de petites séries. [14]

#### b- Fraiseuses de production (à programme, commande numérique)

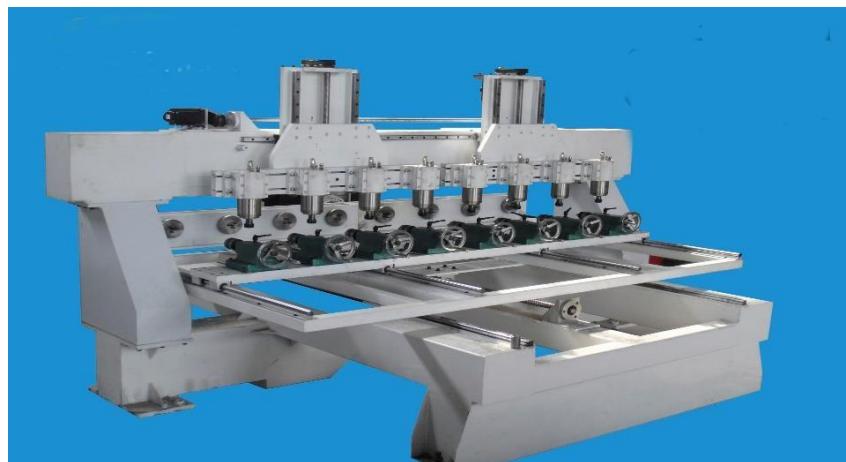
Les fraiseuses CNC sont utilisées pour le traitement de de profils ou de surface complexes.[1]



**Figure (30) :** Machine à commande numérique

**c- Fraiseuses spéciales** (à reproduire, multibroches, etc.)

Les fraiseuses spéciales comme son nom l'indique, elles sont utilisées pour des processus particuliers, tels que la fabrication des clés, de sculpture ou des pièces rainurées.[14]



**Figure (31) :** Fraiseuse spéciale

### I.10.2 Caractéristiques des fraiseuses

#### A. Fonctionnelles

- Puissance du moteur
- Gamme de vitesses de broche et d'avances.
- Orientation de la broche (typehuré, gamin, etc.)

#### B. Dimensionnelles

- Type et numéro du cône de la broche (SA40, Cm4...).
- Longueur et largeur de la table.
- Courses de table, chariot transversal et console.
- Hauteur en traitable et broche.
  - Distance en traitable et glissière verticale.

## I.11 Référentiel machine

Les formes, dimensions, positions d'un objet sont déterminées par rapport à trois axes perpendiculaires, qui constituent le référentiel orthonormé

\*l'axe OX détermine la direction du Ma, du chariot longitudinal.

\*l'axe OY détermine la direction du Ma, du chariot transversal.

\*l'axe OZ détermine la direction du Ma, du chariot vertical.[14]

## I.12 La lubrification

L'opération d'usinage génère à la fois un échauffement important lié à la déformation plastique du matériau usiné et au frottement du copeau sur l'arête de coupe.

Afin de garder une longue durée de vie des outils et un état de surface de la pièce satisfaisants, il est nécessaire d'utiliser un liquide d'arrosage constitué principalement d'eau, d'huile minérale et d'additifs chimique assure le refroidissement de l'outil (longue durée de vie), la diminution du coefficient de frottement, et assure aussi une évacuation facile des copeaux.

Le choix de ce liquide de coupe est donné par les fabricants de machines ou d'outils de coupe. [4]

## I.13 La rugosité des surfaces usinée

### I.13.1 Définition

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière.

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication. [12]

### I.13.2 Mesure de la rugosité

On utilise un rugosimètre détermine de manière sûre et précise un certain nombre de paramètres de rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ...). Parmi les applications industrielles nécessitant l'utilisation d'un rugosimètre on peut citer les domaines suivants. [13]

- **Mécanique**

L'optimisation de la rugosité permet un meilleur ancrage mécanique, notamment au sein de dispositifs où les forces de friction jouent un rôle fonctionnel prépondérant (ex : cônes morses).

- **Qualité**

L'utilisation d'un rugosimètre permet le contrôle de la qualité de finition en bout de chaîne de production, permettant de détecter et de corriger d'éventuels problèmes survenus durant l'usinage.

- **Recherche**

La mesure de la rugosité permet d'évaluer la qualité d'un nouvel enduit ou procédé de traitement de surface. [12]

«Ra» : écart moyen, c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale. On admet

Couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu globale d'un procédés d'usinage, et ce en commençant par la définition de l'usinage, les différents procédés, les modes et conditions de coupe, nous avons également étudié la formation des copeaux dans le fraisage, les outils de coupe les matériaux utilisés, les différents types de fraiseuses et leurs caractéristiques, référentiel machine, la lubrification, et enfin, les caractéristiques des surfaces usinées.

## *Chapitre II*

### *Matériels d'étude et méthodes expérimentale*

**Introduction :**

Dans ce chapitre, nous présentons une série d'essais mécaniques réalisés dans le but d'étudier l'influence de divers paramètres de coupes tels que la profondeur de passe, l'avance, la vitesse de rotation, la température, et la géométrie de l'outil, sur la qualité de la surface d'une pièce mécanique. L'étude porte également sur les déformations en longueur et en largeur des copeaux ainsi que sur leurs formes, obtenues selon les deux modes de fraisage.

**II.1 Matériaux et dispositif d'usinage :****II.1.1 Présentation du matériel****A. Machine-outil :**

Les essais ont été réalisés à l'aide d'une fraiseuse verticale ALMO, d'une puissance de **4.49 kW** sur la broche, et offrant une gamme de vitesses de **45 à 2000 tr/mn.**

**B. Outil de coupe :**

Les outils de coupe utilisés lors de ces essais, sont des fraises de **4** et de **2** lèvres en acier rapide supérieur, de diamètres respectifs **16mm et 8mm.**

**C. Appareil de mesure de l'état de surface**

La rugosité de la surface usinée a été mesurée avec un rugosimètre se déplaçant à **2mm/sec**, équipé d'un palpeur inductif.

**D. Appareil pour observer la structure des copeaux :**

Afin d'observer la géométrie et la structure des copeaux obtenus lors des essais, un microscope optique, d'une précision de  $5\mu\text{m}$ , a été utilisé.

**E. Machine pour le traitement thermique :**

Le traitement thermique consiste à chauffer la pièce usinée à hautes températures à l'aide d'un four.

La figure ci-dessous montre un aperçu global de l'appareillage utilisé lors de la série d'essais



**Figure (32) :** Appareillage utilisé lors des essais

**II.1.2 Matériaux de la pièce à usiner :**

La pièce brute utilisée est un bloc rectangulaire en aluminium pur, de **17mm** de longueur et **4mm** de largeur.

**II.2 L'Aluminium :**

L'aluminium est un métal qui fait partie des éléments les plus abondants dans la croûte terrestre. En raison de sa légèreté et de sa résistance, l'aluminium est largement utilisé dans de nombreux domaines tels que la construction, les transports, l'électronique et l'industrie aéronautique.

**II.2.1 Principales propriétés de l'aluminium :****A. Propriétés physiques :**

L'aluminium est un métal léger et un bon conducteur de la chaleur et de l'électricité, ce qui le rend utile et idéal pour les applications qui nécessitent un matériau léger mais solide et une bonne conductivité.

<i>Propriétés physiques</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Numéro atomique</i>	<b>13</b>
<i>Masse atomique</i>	<b>26,98154 g/mole</b>
<i>Electronégativité de Pauling</i>	<b>1,5</b>
<i>Masse volumique</i>	<b>2,7g/cm<sup>3</sup> à 20°C</b>
<i>Structure cristalline</i>	<b>Cubique à faces centrées</b>
<i>Température de fusion</i>	<b>660,4°C</b>
<i>Température d'ébullition</i>	<b>2467°C</b>
<i>Rayon atomique (VanDerWaals)</i>	<b>0,143 nm</b>
<i>Rayon ionique</i>	<b>0,05 nm</b>
<i>Isotopes naturels</i>	<b>1</b>
<i>Isotopes artificiels</i>	<b>16</b>
<i>Configuration électronique</i>	<b>1S<sup>2</sup>2S<sup>2</sup>2P<sub>6</sub>3S<sup>2</sup>3P<sub>1</sub></b>
<i>Energie de première ionisation</i>	<b>577,4 KJ/mole</b>
<i>Energie de deuxième ionisation</i>	<b>1816,1 KJ/mole</b>
<i>Energie de troisième ionisation</i>	<b>2744,1 KJ/mole</b>
<i>Potentiel standard</i>	<b>-1,67 v</b>

Tableau II.1 : Carte d'identité de l'aluminium

### B. Propriétés mécaniques :

En raison de sa structure en CFC (cubique à faces centrées), l'aluminium pur présente une excellente déformabilité à froid et à chaud, ce qui le rend très ductile. Sa plasticité élevée à l'état recuit facilite grandement les processus de corroyage. En revanche, son usinage demeure difficile. Cependant, les propriétés de l'aluminium dépendent :

- Des traitements mécaniques (forgeage, laminage...).
- Des traitements thermiques (trempe, recuit...).
- Des éléments d'additions (fer, Cu, Mn, Si, Mg...).

**C. Propriétés chimiques :**

L'aluminium est un métal très réactif à l'oxydation, mais il se distingue par sa résistance élevée à la corrosion. A la différence de la plupart des métaux, il est utilisable même s'il oxydé en surface.

**II.3 Procédure expérimentale :**

Des passes longitudinales ont été effectuées sur la pièce rectangulaire fixée dans l'étau afin d'étudier la forme géométrique des copeaux et l'état de surface de la pièce selon les deux modes de fraisage, en variant à chaque essai les paramètres de coupe.

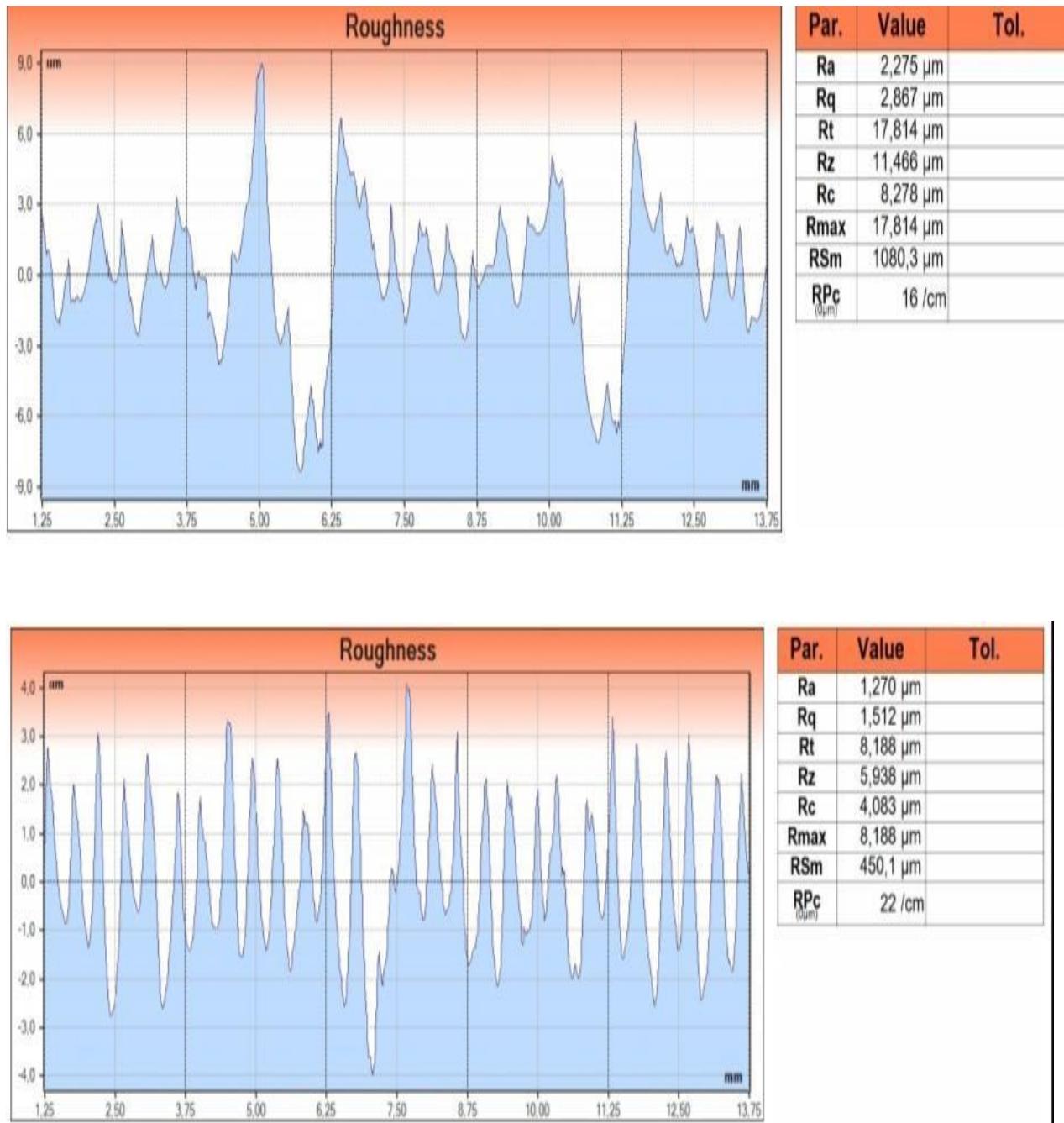
Les premiers tests ont été réalisés par usinage à une température ambiante, en changeant uniquement les conditions de coupe (vitesse de rotation, l'avance par dent et la profondeur de passe).

Pour étudier l'effet de la température, la pièce a été mise dans un four, ensuite elle est directement usinée.

Au cours de tous ces essais, l'usinage à sec (sans lubrification) a été effectué.

Ensuite, dans le but d'étudier l'influence de la lubrification ; un test a été réalisé dans les mêmes conditions ; en utilisant de l'eau et du savon comme lubrifiant.

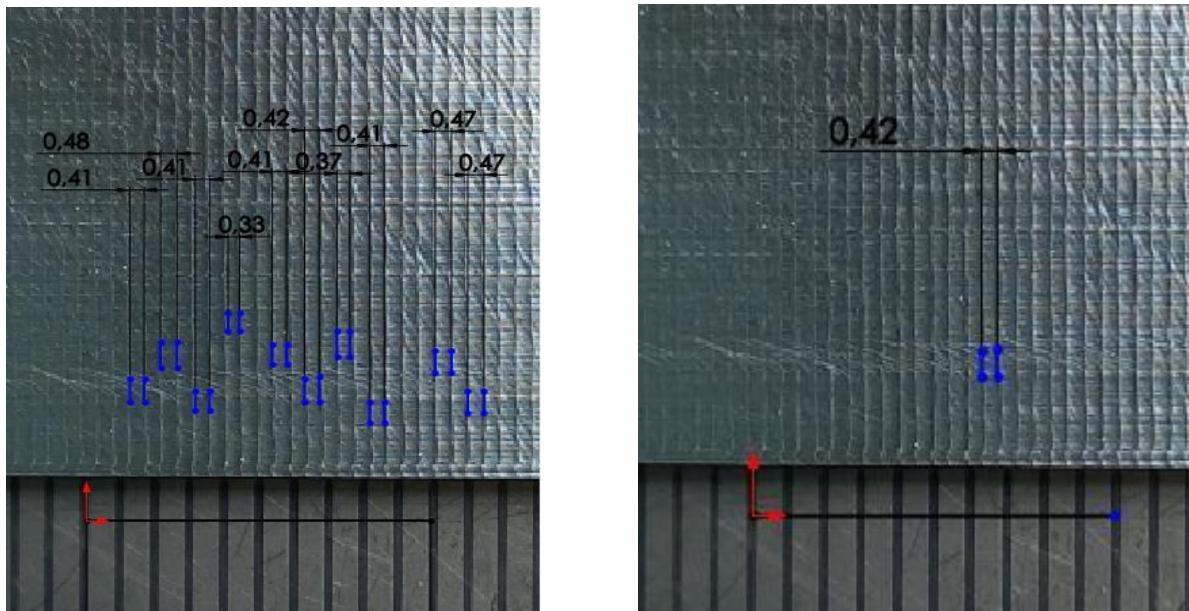
Après chaque essai d'usinage, des photos de copeaux collectés et des surfaces obtenues ont été prise afin d'évaluer leurs qualités, et ce en analysant leurs rugosités (ra) (moyenne de deux valeurs indiquer sur les bords de la pièce).



**Figure (33) :** Diagramme de rugosité

**Exemple :** La moyenne de la rugosité égale à **Ra=3.64 $\mu\text{m}$** .

Toute les mesures des écarts des tries de la pièce usinée ont été effectué dix fois sur la même surface, et les valeurs présentées correspondent aux moyennes obtenues.



**Figure (34) :** La moyenne des stries de la pièce

Afin d'identifier l'influence de la profondeur de passe (ap), l'avance par dent (f), la température (T), la vitesse de rotation (N) et la lubrification sur la forme géométrique des coupeaux et l'état de surface d'une pièce en aluminium pure usinée en avalant et en opposition, un ensemble de tests ont été réalisé,

Le tableau suivant résume les conditions et paramètres de coupe utilisés lors des essais d'usinage :

		N (tr/min)		F (mm/dent)				Ap (mm)		Z		Lubrification		Température	
<i>Conditions</i>		71 0	35 5	0.0 55	0.0 88	0. 11	0.2 2	0. 2	0.4 	2 	4 	Avec 	Sans 	Avec 	Sans 
<i>Essais</i>															
1	<i>Avalant</i>	+				+		+			+		+		+
	<i>Opposition</i>	+				+		+			+		+		+
	<i>Avalant</i>	+				+		+			+		+		+
	<i>Opposition</i>	+				+		+			+		+		+
2	<i>Avalant</i>	+					+	+			+		+		+
	<i>Opposition</i>	+					+	+			+		+		+
	<i>Avalant</i>	+		+				+			+		+		+
	<i>Opposition</i>	+		+				+			+		+		+
3	<i>Avalant</i>	+				+		+			+		+		+
	<i>Opposition</i>	+				+		+			+		+		+
4	<i>Avalant</i>	+				+		+			+	+			+
	<i>Opposition</i>	+				+		+			+	+			+
5	<i>Avalant</i>	+				+		+			+		+		+
	<i>Opposition</i>	+				+		+			+		+		+
6	<i>Avalant</i>		+					+			+		+		+
	<i>Opposition</i>		+					+			+				+

**Tableau II.2 :** les paramètres de coupe utilisés lors des essais d'usinage

**Conclusion**

Ce chapitre illustre les différentes méthodes et mode opératoire exploitées pour le contrôle de la qualité des surfaces d'aluminium usinées, ainsi que pour l'analyse de la forme et de la taille des copeaux obtenus selon les variations des paramètres de coupe (l'avance, la profondeur de passe, la vitesse de rotation, la lubrification, le nombre de dents, la température).

## *Chapitre III*

### *Résultat et discussion*

### Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus lors de l'usinage d'une pièce d'aluminium en changeant les différents paramètres de coupe dans le fraisage en avalant et en opposition.

### Influence de la profondeur de passe sur l'état de surface et la forme des copeaux :

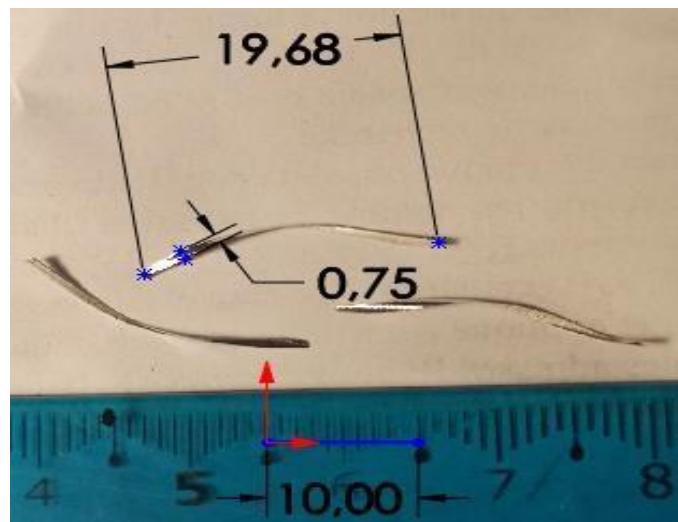
Dans cette étude un ensemble de paramètres de coupe ont été choisis et fixés (**N=710tr/min**, **VF=315 mm/min**, **F=0.11mm/dent**), avec une profondeur de passe variante (**AP = 0.2mm** et **AP=0.4mm**). Les résultats de cette étude sur les deux modes de fraisage sont montrés ci-dessous.

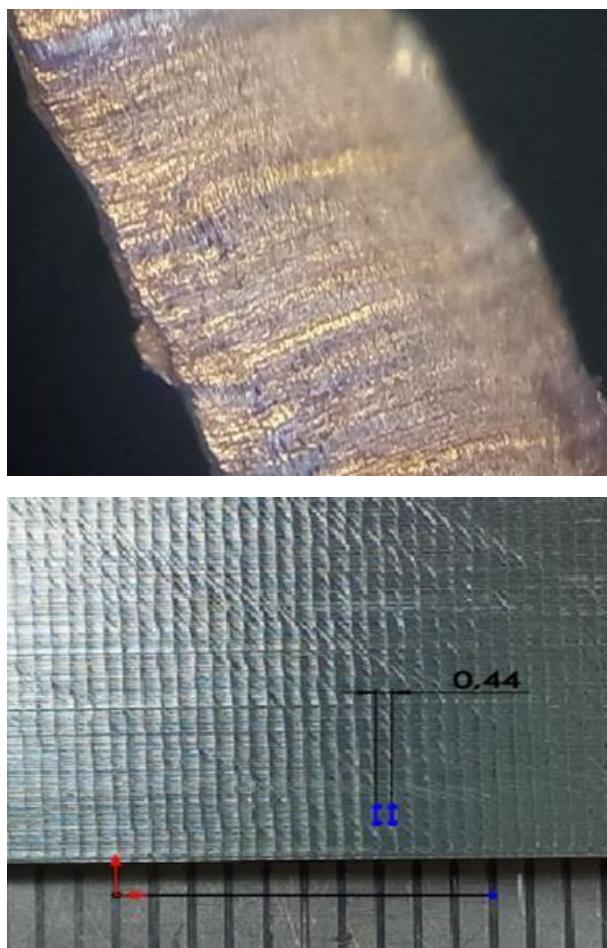
#### A. Une profondeur de passe de 0.2mm :

##### ➤ Fraisage en Avalant :

En mesurant à l'aide de Solid Works les copeaux continus de forme d'arc, leurs longueurs et leurs largeurs sont respectivement **19.68mm** et **0.75mm**, et les stries mesurées sur la surface usinée égale à **0.44mm** (c'est une moyenne de 10 mesures).

La moyenne de la rugosité dans ce cas est égale à **Ra=0.81µm**.



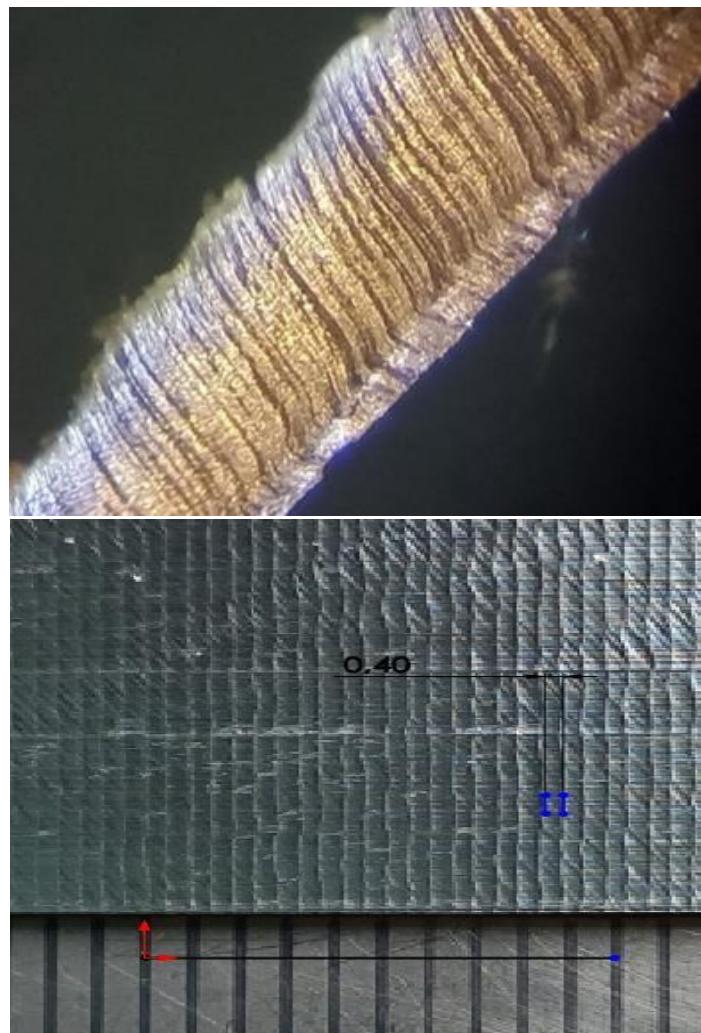


**Figure (35) :** (fraisage en avalant, N=710tr/min, VF=315mm/min, F=0.11mm/dent, AP=0.2mm)

➤ **Fraisage en Opposition :**

Dans l'usinage en opposition, les coupeaux ondulés d'une géométrie continu, observés à l'aide d'un microscope optique sont d'une longueur moyenne de **19.62mm** et d'une largeur moyenne de **0.44mm**. Et les stries mesurées sur la surface usinée sont de **0.40mm** (ceci est une moyenne de 10 mesures).

La moyenne de la rugosité dans ce cas est de **R<sub>a</sub>=1.77 μm**.



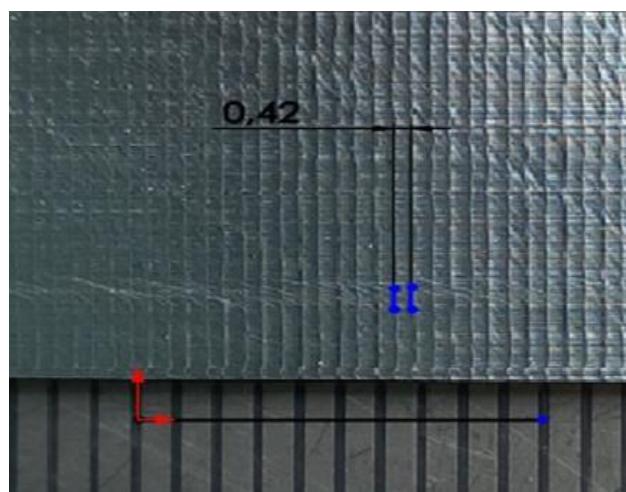
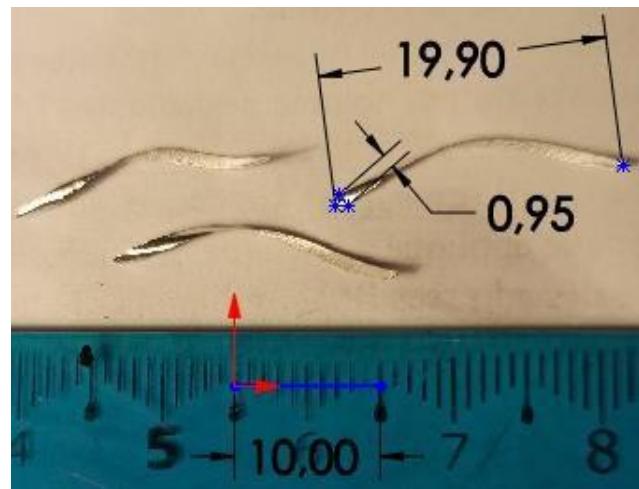
**Figure (36) :** (fraisage en opposition, N=710tr/min, VF=315mm/min, F=0.11mm/dent, AP=0.2mm)

Pour une profondeur de passe de **0.2**, les stries de la surface usinée et les copeaux dans le fraisage en avalant et en opposition ont la même longueur, par contre, la différence réside dans la largeur des copeaux (plus large dans le premier cas) et aussi dans leurs formes (forme d'arc en avalant et ondulé en opposition), ainsi que leurs rugosités qui montrent un meilleur état de surface dans l'usinage en avalant.

#### B. Une Profondeur de passe de **0.4mm** :

##### ➤ **Fraisage en Avalant**

En changeant la profondeur de passe, les copeaux sont continus en forme d'arc avec une longueur de **19.90 mm** et une largeur de **0.95mm**, et les stries de la surface usinée d'une largeur moyenne égale à **0.42mm**.

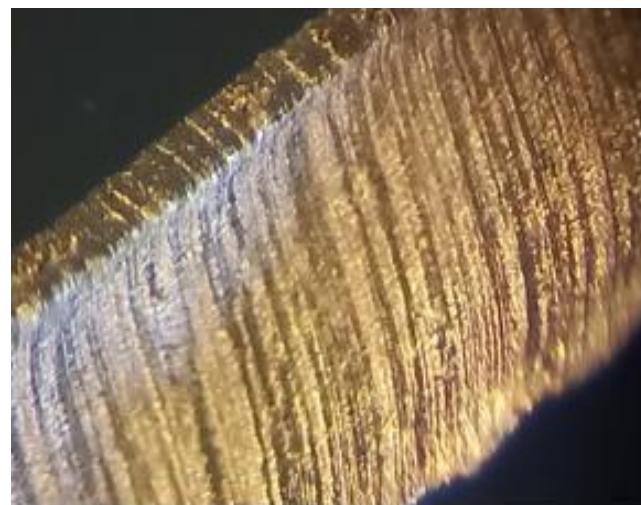
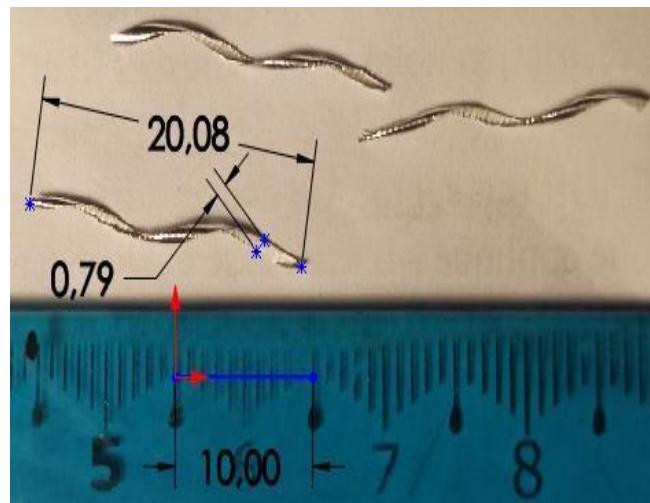


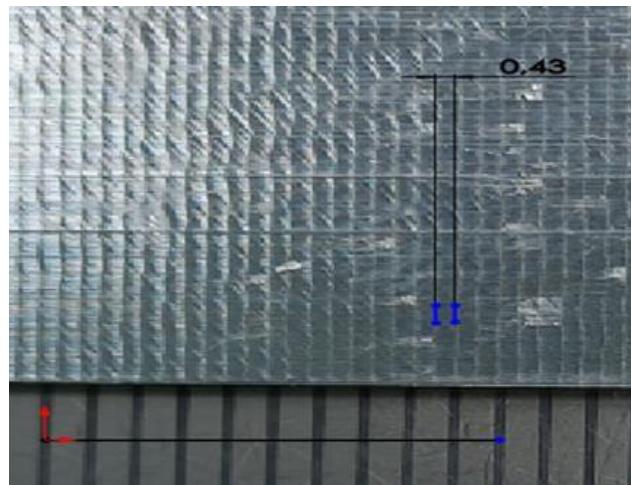
**figure (37) :** (fraisage en avalant, N=710tr/min, VF=315mm/min, F=0.11mm/dent, AP=0.4mm)

➤ **Fraisage en opposition :**

Dans ce mode de fraisage, les copeaux sont ondulés d'une géométrie continue, leurs longueurs et leurs largeurs sont respectivement **20.08mm** et **0.79mm**.

La largeur des stries de la surface usinée est égale à **0.43mm**.





**Figure (38) :** (fraisage en opposition,  $N=710\text{tr/min}$ ,  $VF=315\text{mm/min}$ ,  $F=0.11\text{mm/dent}$ ,  $AP=0.4\text{mm}$ )

Pour une profondeur de passe de 0.4, les stries de la surface de la pièce et les copeaux dans le fraisage en avalant et en opposition ont la même longueur, par contre les copeaux obtenus dans le cas du fraisage en avalant sont plus larges et leurs formes change également (en arc en fraisage en avalant et ondulé en fraisage en opposition).

Les résultats montrent que la profondeur de passe n'a pas d'influence notable sur la longueur des stries et des copeaux, mais agit sur leur largeur, leurs formes et l'état de surface de la pièce.

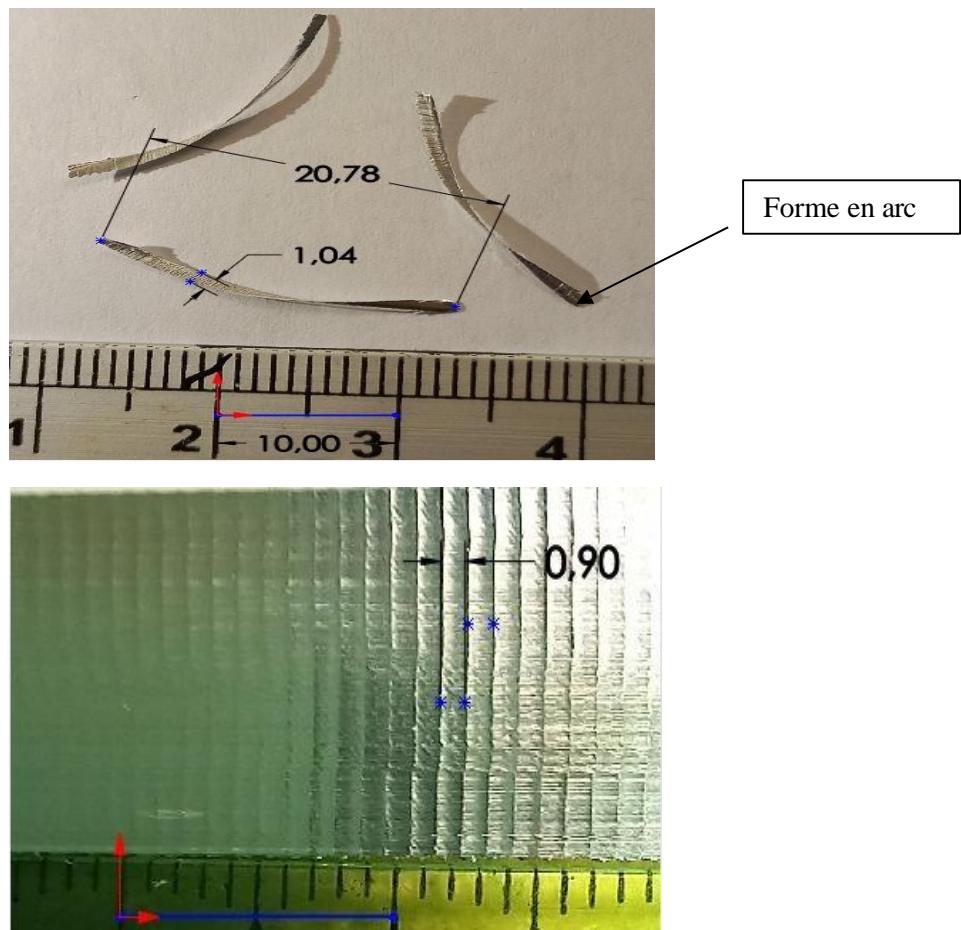
### III.1 Influence de la vitesse d'avance sur l'état de surface et la forme des copeaux :

Cette étude est faite en appliquant la même vitesse de rotation et la même profondeur de passe dans tous les tests ( **$N=710\text{tr/min}$** ,  **$Ap=0.4\text{mm}$** ), et ce en variant seulement l'avance  **$f_1=0.22\text{mm/dent}$**  et  **$f_2=0.055\text{mm/dent}$** . Les résultats de ces essais pour le fraisage en avalant et le fraisage en opposition sont représentés ci-dessous :

#### A. L'avance **$f_1=0.22\text{mm/dent}$** :

##### ➤ Fraisage en Avalant

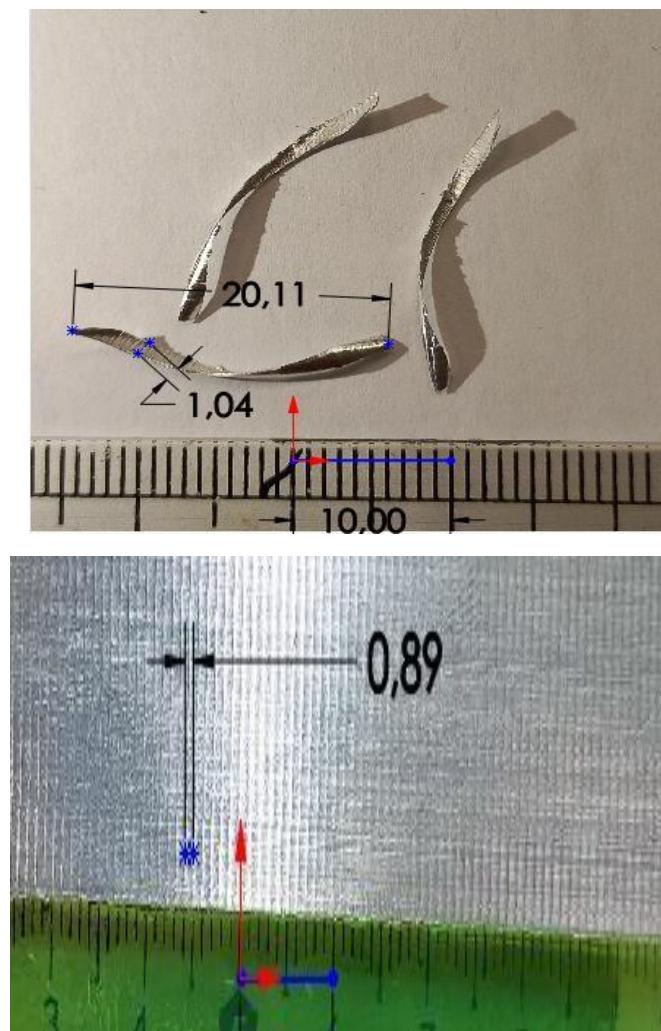
Pour le fraisage en concordance, les copeaux de forme en arc et de géométrie continue ont une longueur de **20.78mm** et une largeur de **1.04mm**, avec une largeur importante de stries de la pièce usinée égale à **0.90mm**.



**Figure (39) :** (fraisage en avalant, N=710tr/min, VF=630mm/min, F=0,22mm/dent, AP=0,4mm)

➤ **Fraisage en Opposition :**

Lors du fraisage conventionnel, les copeaux obtenus sont continus avec une forme d'arc, d'une longueur de 20.11mm et d'une largeur de 1.04mm, et un écart important entre les stries qui est égale à 0.89mm été mesurées sur la surface usinée.

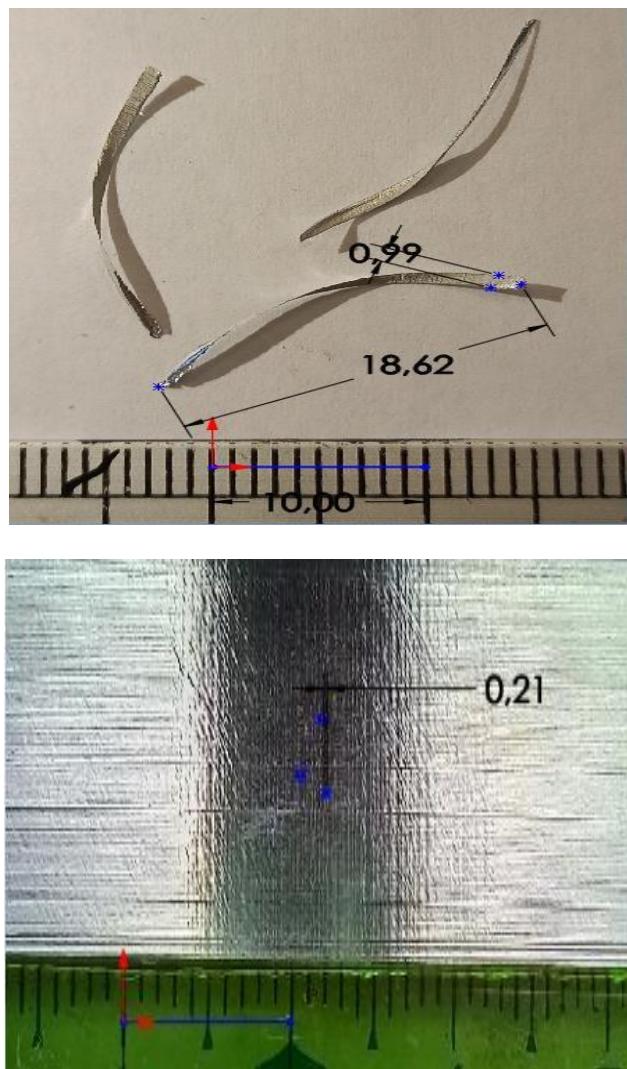


**Figure (40) :** (fraisage en opposition, N=710tr/min, VF=630mm/min, F=0,22mm/dent, AP=0,4mm)

Pour une avance de **0,22mm/dent**, les stries sur la surface de la pièce et les copeaux ont la même largeur et la même forme pour les deux modes de fraisage sauf que la différence réside dans leurs longueurs.

**B. L'avance  $f_2=0.055\text{mm/dent}$  :****➤ Fraisage en Avalant :**

En modifiant l'avance, les copeaux continus de forme en arc mesurent **18.62mm** de longueur et **0.99mm** de largeur, et des stries de faible largeur égale à **0.21mm** sur la surface usinée, avec une rugosité de **ra=0.64um**.



**Figure (41) :** (fraisage en avalant, N=710tr/min, VF=156mm/min, F=0.055mm/dent, AP=0,4mm)

**Remarque :**

Sur la figure suivante on présente l'effet de l'arrêté rapportée sur l'état de surface de la pièce usinée où on remarque clairement l'apparition d'une ligne (montrée par une flèche rouge).

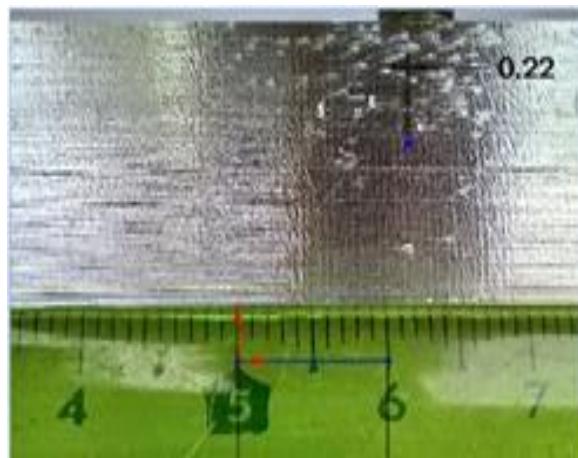


**Figure (42) :** Présentation de l'effet de l'arrêté rapportée sur la surface de la pièce usinée

**➤ Fraisage en opposition :**

Pour ce mode de fraisage, les copeaux continus de forme ondulée mesurent **18.52mm** de longueur et **0.93mm** de largeur, les stries sur la surface usinée sont de **0.22mm** de largeur, avec une rugosité de **1.45  $\mu\text{m}$** .





**Figure (43) :** (fraisage en opposition,  $N=710$ tr/min,  $VF=156$ mm/min,  $F=0.055$ mm/dent,  $AP=0,4$ mm)

Pour une avance de 0.055mm/dent, l'écart des stries de la surface usinée ainsi que les copeaux ont la même largeur, par contre la forme des copeaux et leurs longueurs changent pour les deux modes de fraisage.

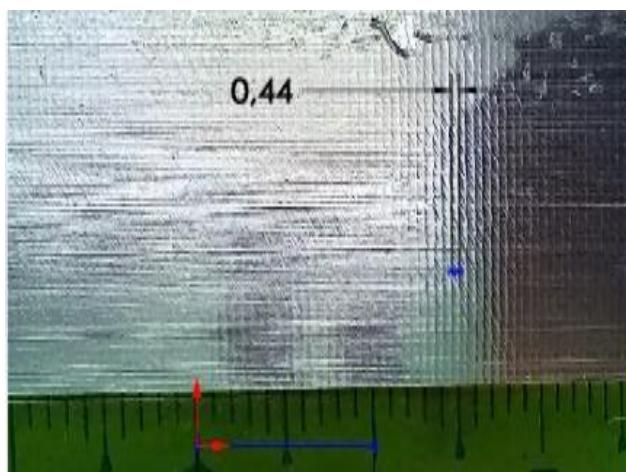
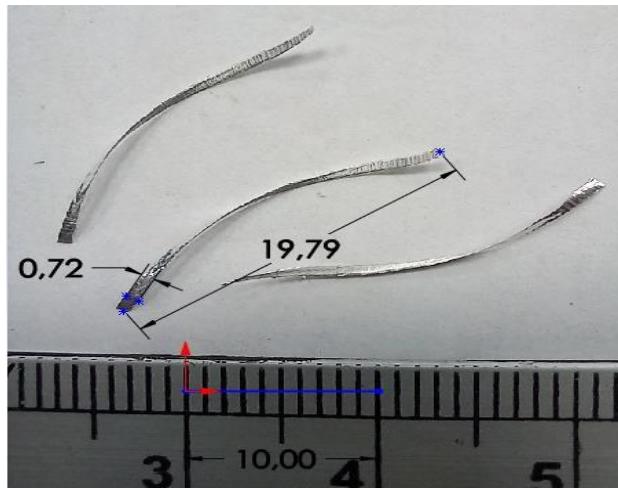
Les résultats obtenus, indiquent une influence significative de l'avance sur la taille, la forme des copeaux et sur les stries de la surface usinée pour les deux modes de fraisage. Au fur et à mesure que l'avance réduite, l'écart des stries de la surface et la taille des copeaux diminue également en conséquence.

### III.2 Influence de la température sur l'état de surface et la forme des copeaux :

En chauffant la pièce à une température de **90°C**, et en fixant les paramètres de coupe ( **$N=710$ tr/min,  $f= 0.11$ mm/dents et  $ap= 0.4$ mm**) pour les deux modes de fraisage, un ensemble de résultats ont été trouvés et représentés comme suit :

➤ **Fraisage en Avalant :**

Dans l'usinage en avalant, les coupeaux continus de forme en arc observés (figure5) sont d'une longueur moyenne de **19.79mm** et d'une largeur moyenne de **0.72mm**. Et les stries mesurées sur la surface usinée sont de **0.44mm**. Avec une moyenne rugosité **R<sub>a</sub>=0.64μm**

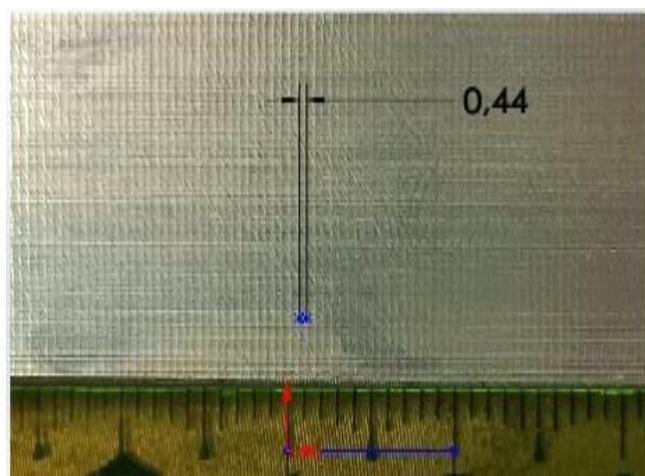
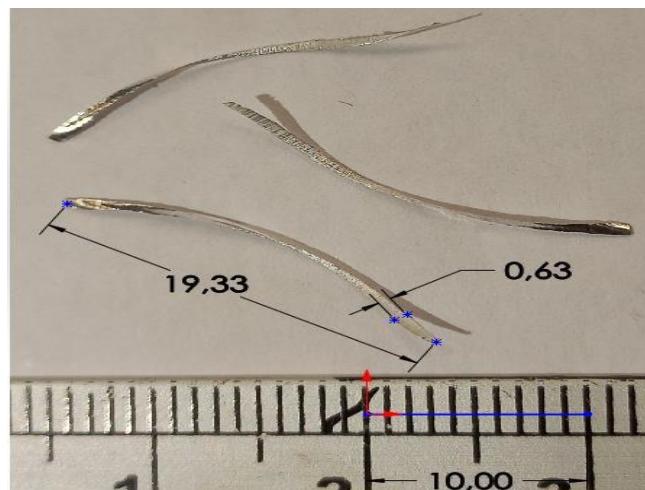


**Figure (44) :** (fraisage en avalant N=70tr/min, Vf=315mm/min, f=0.11mm/dent, ap=0.4mm)

➤ **Fraisage en Opposition :**

Lors du fraisage conventionnel, les copeaux obtenus sont continus avec une forme d'arc, d'une longueur de **19.33mm** et d'une largeur de **0.63mm**, et un écart important entre les stries qui est égale à **0.44mm** a été mesurées sur la surface usinée.

La moyenne de la rugosité pour ce test égale à **R<sub>a</sub>=1.24µm**.



**Figure (45) :** (fraisage en opposition, N=710tr/min, VF=315mm/min, F=0.11mm/dent, AP=0.4mm)

Ce test montre que la température n'affecte pas l'écart des stries, la largeur ni la forme des copeaux dans le fraisage en avalant et en opposition, mais influence sur leurs longueur. D'autre part l'augmentation de la température de la pièce contribue à la déformation du copeau et changer sa structure.

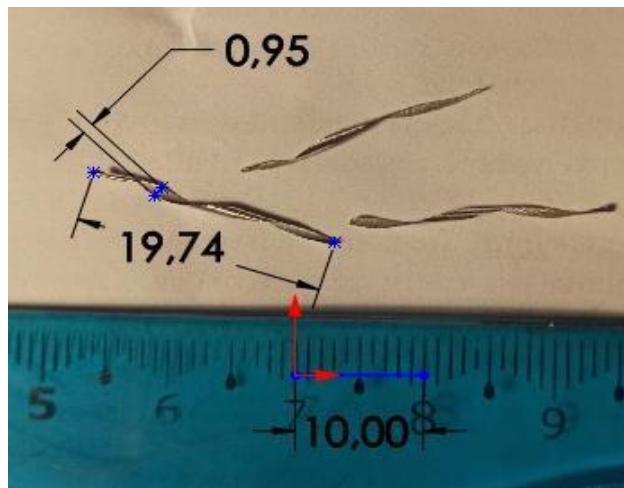
### III.3 Influence de la lubrification sur l'état de surface et la forme des copeaux :

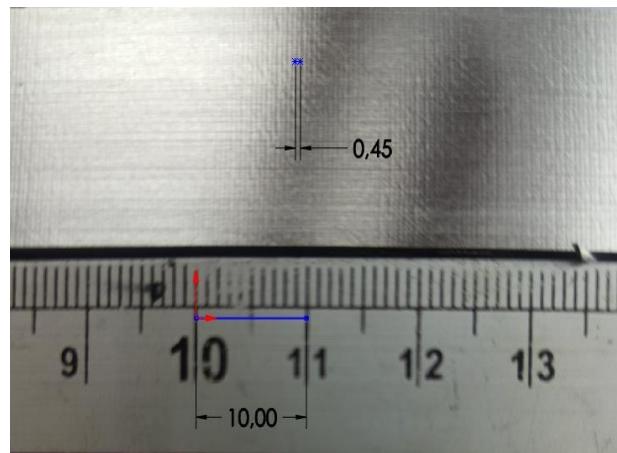
Cette étude est faite en utilisant la même vitesse de rotation, la même avance, et la même profondeur de passe que le test précédent (**N=710tr/min, f=0.11mm/dent, Ap=0.4mm**), et ce en appliquant une lubrification (l'eau et du savon) durant l'usinage dans les deux modes de fraisage, les résultats sont les suivants :

#### ➤ Fraisage en Avalant :

Pour le fraisage en concordance, les copeaux sont ondulés avec une géométrie continue, ils ont une longueur de **19.74mm**, une largeur de **0.95mm**, et une largeur de stries de la pièce de **0.45mm**.

La rugosité de la surface usinée dans ce test est égale à **R<sub>a</sub>=1.24 μm**





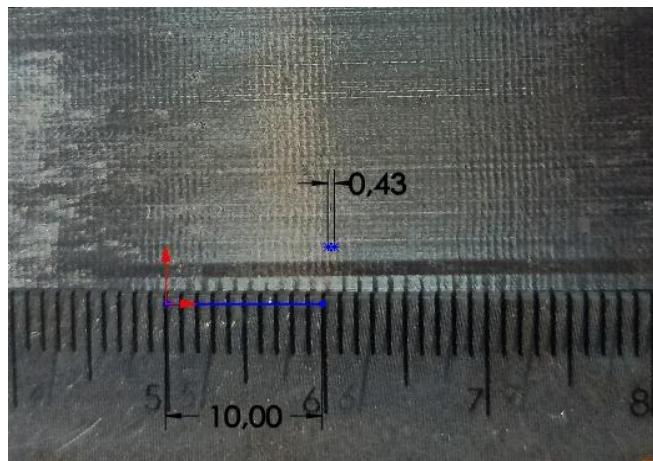
**Figure (46) :** (fraisage en avalant, N=710tr/min, VF=315 mm/min, F=0.11mm/dent, AP=0.4mm)

➤ **Fraisage en Opposition :**

En mesurant les copeaux continus de formes ondulées, leurs longueurs et leurs largeurs sont respectivement **20.44mm** et **1.04mm**, et les stries mesurées sur la surface usinée sont en moyenne égales à **0.43 mm** (c'est une moyenne de 10 mesures).

La rugosité dans ce cas est égale à **R<sub>a</sub>=3.98µm**.





**Figure (47) :** (fraisage en opposition,  $N=710\text{tr/min}$ ,  $VF=315\text{mm/min}$ ,  $F=0.11\text{mm/dent}$ ,  $AP=0.4\text{mm}$ )

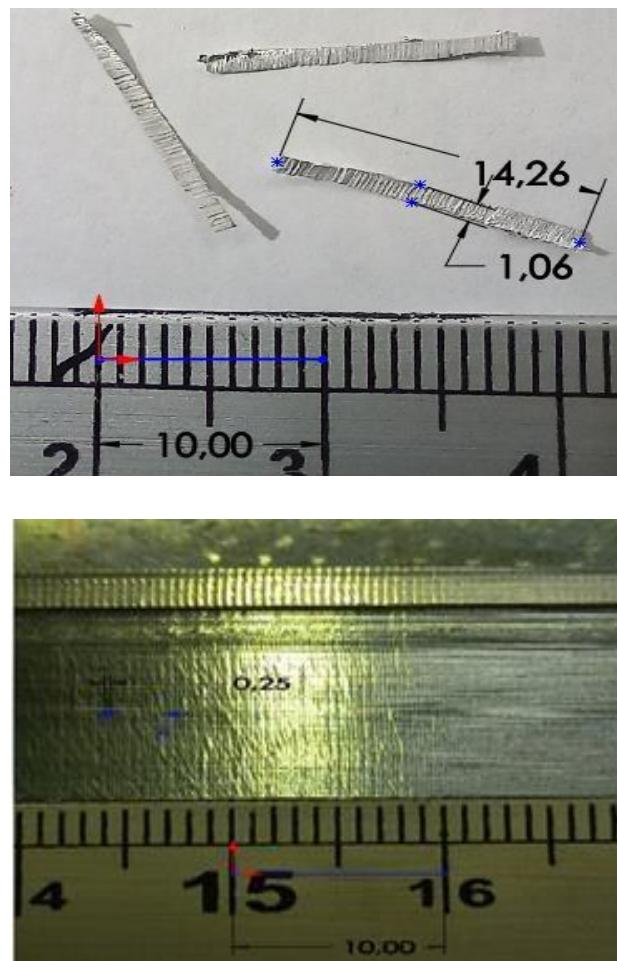
Les résultats montrent qu'il n'existe aucune influence notable du lubrifiant sur la largeur, la forme des copeaux, et sur les stries de la surface usinée pour les deux modes de fraisage, mais une influence sur leur longueur.

#### III.4            **Influence de nombre de dents de la fraise sur l'état de surface et la forme des copeaux :**

Ces tests ont été effectués en remplaçant la fraise 4 dents par une fraise 2 dents, en fixant tous les autres paramètres de coupe ( **$N=710\text{tr/min}$ ,  $f=0.11\text{mm/dent}$ ,  $Ap=0.4\text{mm}$** ) et ce pour le fraisage en avalant et le fraisage en opposition. Les résultats de ces tests sont représentés ci-dessous :

##### ➤ **Fraisage en Avalant :**

Dans ce test, les copeaux résultants sont d'une géométrie discontinue et d'une forme d'arc, ils mesurent **14.26mm** en longueur et **1.06mm** en largeur, avec un écart de stries sur la surface usinée est égale à **0.25mm**.

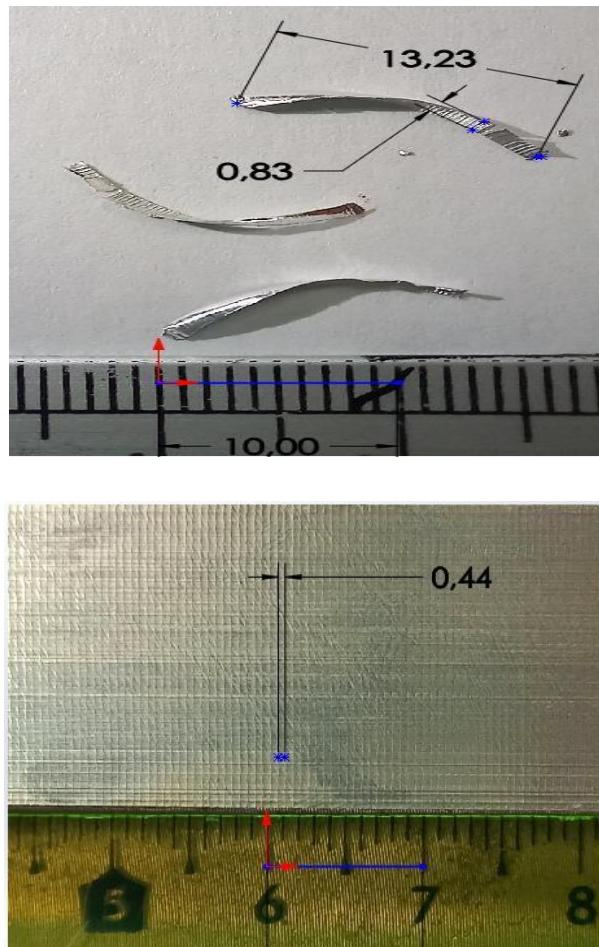


**Figure (48) :** (fraisage en avalant, N= 710 tr/min, VF=160mm/min, F=0.11mm/dent, AP=0.4 mm, Z=2dents)

#### ➤ Fraisage en opposition

Ce test a permis d'obtenir des copeaux discontinus en arc de **13.23mm** de longueur et

**0.83mm** de largeur et des stries de la pièce d'une largeur moyenne de **0.44mm**.



**Figure (49) :** (fraisage en opposition,  $N=710$ tr/min,  $VF=160$ mm/min,  $F=0.11$ mm/dent,  $AP=0.4$ mm,  $Z=2$  dents)

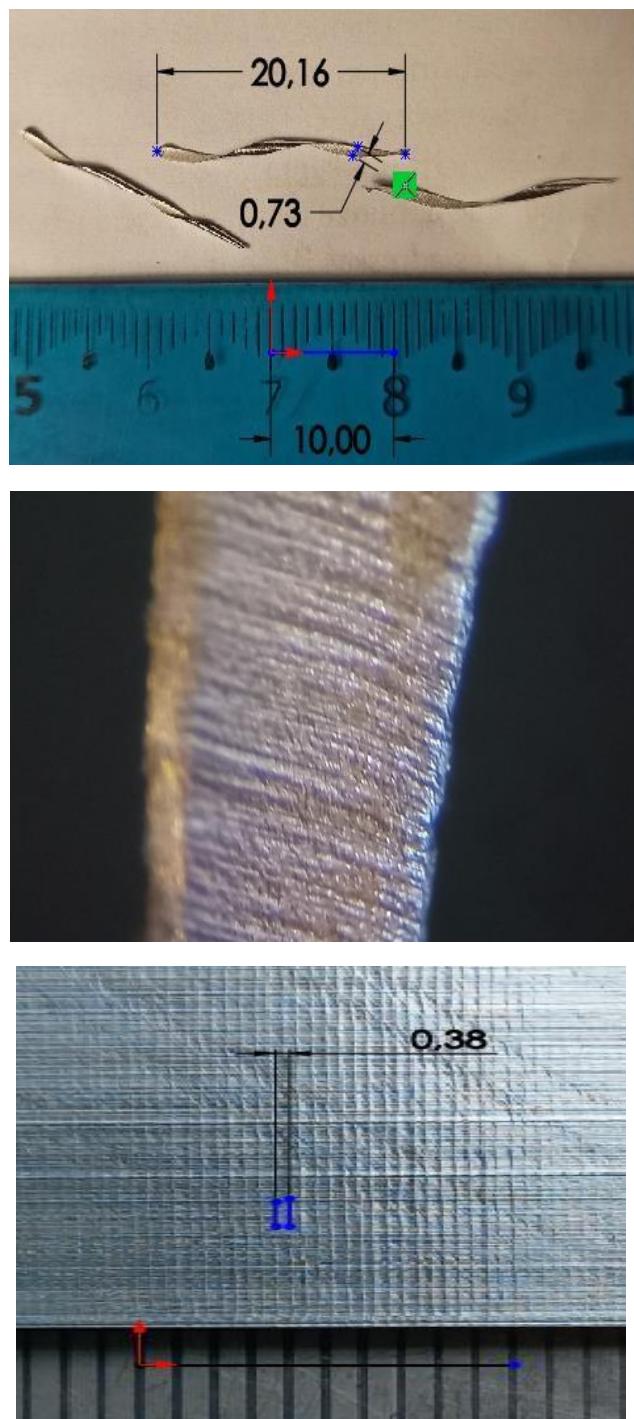
Les résultats obtenus lors de ces essais, montrent qu'il existe une influence du nombre de dents de la fraise sur la taille et la forme des copeaux, ainsi que sur les stries de la surface usinée pour les deux modes de fraisage.

### III.5 Influence de la vitesse de rotation sur l'état de surface et la forme des copeaux :

Dans le but d'étudier l'influence de la vitesse de rotation sur l'état de surface, la forme des copeaux et leurs structures dans une pièce en aluminium 7000 usiné en avalant et en opposition, un changement de cette vitesse a été effectuer ( $N=355$ tr/min), accompagné d'un changement de vitesse d'avance ( $VF=125$ mm/min). Cet essai est réalisé en utilisant une profondeur de passe ( $Ap=0,4$ mm). Les résultats de cette étude sont montrés ci-dessous :

➤ **Fraisage en Avalant :**

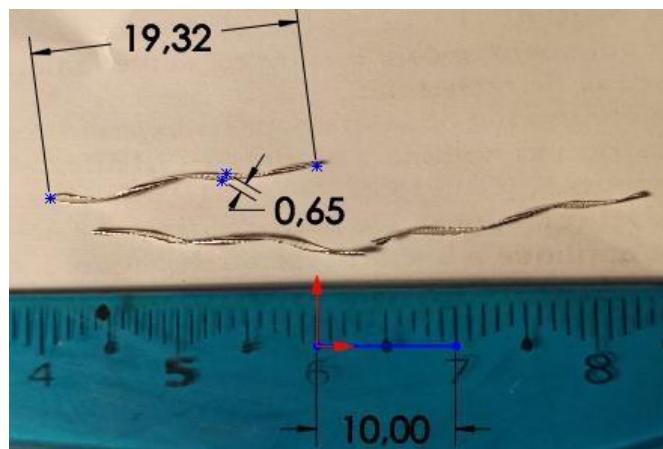
Cet usinage a permis d'obtenir des copeaux continus d'une longueur de **20.16mm** et d'une largeur de **0.73mm**, et une surface avec des stries de largeur moyenne égale à **0.38 mm**, qui sont mesurés en utilisant Solid Works en prenant la moyenne de 10 mesures et copeaux



**Figure (50) :** (fraisage en avalant, N=355tr/min, VF=125mm/min, F=0.088mm/dent, ap=0.4mm)

➤ **Fraisage en opposition :**

Dans le contournage en opposition des coupeaux continus ont été obtenus, d'une longueur de **19.32mm** et de largeur de **0.65mm**, ainsi qu'une surface avec des stries de largeur moyenne égale à **0.34mm**.



**Figure (51) :** (fraisage en opposition, N=355tr/min, VF=125mm/min, F=0.088mm/dent, ap=0.4mm)

En comparant les résultats obtenus dans les deux essais, aucune différence dans la largeur des stries de la pièce, la largeur et la forme des copeaux dans les deux modes de fraisage. Par contre différence dans la longueur des copeaux est remarquable.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Essais	Essais	La largeur des stries	La rugosité	La longueur de copeau	La largeur de copeau	La forme de copeau
1	Avalant	0.44	0.81	19.68	0.75	En arc
	Opposition	0.40	1.77	19.62	0.44	Ondulé
	Avalant	0.42		19.90	0.95	En arc
	Opposition	0.43		20.08	0.79	Ondulé
2	Avalant	0.90		20.78	1.04	En arc
	Opposition	0.89		20.11	1.04	En arc
	Avalant	0.21	0.64	18.62	0.99	En arc
	Opposition	0.22	1.45	18.52	0.93	Ondulé
3	Avalant	0.44	0.64	19.79	0.72	En arc
	Opposition	0.44	1.24	19.33	0.63	En arc
4	Avalant	0.45	1.24	19.74	0.95	Ondulé
	Opposition	0.43	3.98	20.44	1.04	Ondulé
5	Avalant	0.25		14.26	1.06	En arc
	Opposition	0.44		13.23	0.83	En arc
6	Avalant	0.38		20.16	0.73	Ondulé
	Opposition	0.34		19.32	0.65	Ondulé

**Tableau III.1 :** les résultats des essaies

### **III.6 Discussion des résultats**

Après analyse des résultats de ces différents essais, nous déduisons que l'usinage dans les deux modes de fraisage (opposition et avalant) :

- La profondeur de passe influence sur la forme des copeaux, leurs largeurs (relation proportionnelle), ainsi que l'état de surface qui est considéré bon dans le fraisage en avalant.
- L'avance influence sur la forme des copeaux, leurs longueurs, l'écart des stries (relation proportionnelle), l'état de surface qui est meilleur dans l'usinage en avalant.
- La lubrification et le traitement thermique ont un effet sur la longueur des copeaux, et l'état de surface qui est mauvais dans les deux modes de fraisage en utilisant le lubrifiant, par contre, en augmentant la température de la pièce son état de surface s'améliore dans l'usinage en avalant.
- Le nombre de lèvre de l'outil influence sur l'écart des stries de la pièce usinée, la taille des copeaux, avec un état de surface catastrophique dans les différents modes de fraisage.
- La vitesse de rotation n'influence que sur la longueur des copeaux.

### **Conclusion**

Ce chapitre montre les résultats des différents tests effectués sur l'aluminium dans le fraisage en avalant et en opposition, ainsi que l'effet de chaque paramètre de coupe sur l'état de surface de la pièce usinée et les copeaux obtenus lors de ce procédé.

## *Conclusion générale*

Les travaux présentés dans ce mémoire ont porté sur l'influence des paramètres de coupe sur la forme et la taille des copeaux obtenus lors de l'usinage d'une pièce en aluminium pur, selon les deux modes de fraisage : en opposition et en avalant, ainsi que son état de la surface usinée.

Six paramètres de coupe ont été étudiés pour les deux modes de fraisage (opposition et avalant) : la profondeur de passe, l'avance, la vitesse de rotation, la température, la lubrification et le nombre de dents de la fraise.

Les analyses obtenues à partir des différents tests ont montré que :

- La profondeur de passe a un effet sur la taille des copeaux en particulier leur largeur selon une relation proportionnelle : ce qui elle diminue lorsque la profondeur diminue, cette tendance est observée dans les deux modes de fraisage. Toutefois, la forme des copeaux diffère : en arc en fraisage en avalant et ondulée en fraisage en opposition. L'état de surface est jugé meilleur en fraisage avalant (avec une moyenne de rugosité plus faible).
- L'avance a un effet sur la longueur des copeaux et l'écart de stries de la surface usinée (relation proportionnelle) ; cette influence est observée lors de la variation de l'avance, d'ailleurs la moyenne de rugosité diminue en fraisage en avalant, ce qui conduit à un meilleur état de surface, en revanche, le changement de mode de fraisage n'entraîne aucune différence notable.
- La lubrification à un effet sur la longueur des copeaux (plus longs en opposition), cependant, l'état de surface reste insatisfaisant dans les deux modes de fraisage.
- Le traitement thermique agit sur la longueur des copeaux (plus longs en avalant), et améliore la rugosité moyenne. Une observation visuelle montre que l'augmentation de la température contribue à une déformation des copeaux et un changement dans leurs structures.
- Le nombre de lèvres de l'outil a un effet sur la forme des copeaux qui devient discontinue (dentelés plutôt que segmenté avec une fraise 2 dents), tandis qu'ils sont plus réguliers avec une fraise à 4 dents. Les copeaux à 2 dents sont plus courts et plus larges, et la surface usinée présente une rugosité plus élevée, indiquant un état de surface dégradé.
- 
- La vitesse de rotation n'influence que sur la longueur des copeaux (plus long dans le fraisage en avalant).

L'analyse de l'ensemble des essais montre que les paramètres de coupe influencent significativement sur l'écart des stries de la pièce usinée, lequel dépend de l'avance (égale à la profondeur \* l'avance), ainsi la forme et la taille des copeaux. D'autre part, quel que soit le

paramètre de coupe, la qualité de surface est toujours supérieure en fraisage avalant, notamment avec de petites avances et un traitement thermique préalable. En revanche le fraisage en opposition donne un mauvais état de surface, souvent marqué par des traces de copeaux collés.

Nous constatant également que ces paramètres influencent dans les deux modes de fraisage sur la largeur des copeaux (liée à la profondeur de passe), et leur longueur (non influencés par cette profondeur). Les copeaux en fraisage en avalant sont généralement plus longs, tandis que ceux obtenus en fraisage en opposition sont plus ondulés ;

En conclusion, la taille et la forme des copeaux varient selon les paramètres de coupe, et le mode de fraisage (opposition et avalant)

## *Référence bibliographique*

- [1] CLICOURS. (S.D.). GENERALITES SUR L'USINAGE. [HTTPS://WWW.CLICOURS.COM/GENERALITES-SUR-LUSINAGE/](https://www.clicours.com/generalites-sur-lusinage/)
- [2] MECANIQUE PACQUET. (S.D.). PROCEDES D'USINAGE. [HTTPS://WWW.MECANIQUE-PACQUET.COM/PROCEDES-D-USINAGE](https://www.mecanique-pacquet.com/procedes-d-usinage)
- [3] RAPIDDIRECT. (S.D.). TYPES D'OPERATIONS DE FRAISAGE. [HTTPS://WWW.RAPIDDIRECT.COM/FR/BLOG/TYPES-OF-MILLING-OPERATIONS](https://www.rapiddirect.com/fr/blog/types-of-milling-operations)
- [4] UNIVERSITÉ DE LILLE. (S.D.). CHAPITRE 2.4.2 : ANALYSE DE FABRICATION. [HTTPS://ANALYSE-FABRICATION.UNIV-LILLE.FR/CO/CHAPITRE\\_2\\_4\\_2](https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/chapitre_2_4_2)
- [5] AUTEUR INCONNU. (S.D.). FRAISAGE 1 [PRESENTATION POWERPOINT]. SCRIBD. [HTTPS://FR.SCRIBD.COM/PRESENTATION/491436380/FRAISAGE-1](https://fr.scribd.com/presentation/491436380/FRAISAGE-1)
- [6] REMACLE, B. (2014). FORMATION IFPM : USINAGE, TOURNAGE, FRAISAGE. BRUXELLES : IFPM.
- [7] WAYKEN RAPID MANUFACTURING. (2023, 12 JUILLET). TYPES D'OPÉRATIONS DE FRAISAGE. WAYKEN. [HTTPS://WAYKENRM.COM/FR/BLOGS/TYPES-OF-MILLING/](https://waykenrm.com/fr/blogs/types-of-milling/)
- [8] DESSARTHE, A. (1999, 10 AVRIL). SPECIES DES COMPOSITES A L'USINAGE : USINAGE DES COMPOSITES A MATRICE POLYMERIQUE. [HTTPS://WWW.COMMERCE-MACHINES-OCCASION.FR/FONCTIONNEMENT-DIFFERENTS-TYPES-DE-FRAISEUSES/](https://www.commerce-machines-occasion.fr/fonctionnement-differents-types-de-fraiseuses/)
- [9] D., J.-F. (2006). USINAGE. PARIS : DUNOD.
- [10] ALLCUT. (2001, 10 JANVIER). ARTICLE DE BASE SUR LE FRAISAGE. [HTTPS://WWW.ALLCUT.BIZ](https://www.allcut.biz)
- [11] MESURE.COM. (2003, OCTOBRE). PRINCIPE DE LA RUGOSITE. [HTTPS://WWW.MESURE.COM/ARCHIVES/758](https://www.mesure.com/archives/758)
- [12] ZANI, M.-L. (S.D.). PRINCIPE DE LA RUGOSITE. [MESURE.COM. HTTPS://WWW.MESURE.COM/ARCHIVES/758](https://www.mesure.com/archives/758)
- [13] PHILIBERT, J., VIGNES, A., BRECHET, Y., & COMBARDE, P. (S.D.). METALLURGIE DU MINERAL AU MATERIAU. PARIS : MASSON.

## *Résumé*

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de l'usinage de l'aluminium par fraisage, en mettant l'accent sur l'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface et la formation des copeaux. Deux modes d'usinage sont examinés : le fraisage en avalant et le fraisage en opposition, qui se distinguent par leurs mécanismes de coupe et leurs effets sur la qualité des surfaces usinées.

L'objectif de ce travail est de mieux comprendre l'influence de ces paramètres sur la qualité des surfaces et sur la formation des copeaux, afin de proposer des orientations permettant d'optimiser le procédé, d'améliorer la qualité géométrique et fonctionnelle des pièces usinées, et de renforcer la performance et la durabilité des opérations de fraisage de l'aluminium.

**Mots-clés** : Usinage, Fraisage, Aluminium, Paramètres de coupe, Copeaux, État de surface, Avalant, Opposition, Optimisation.

---

## Abstract

This thesis investigates the machining of aluminum by milling, with a particular focus on the influence of cutting parameters on surface quality and chip formation. Two milling modes are considered: down milling and up milling, which differ in their cutting mechanisms and their effects on the integrity of machined surfaces.

The overall objective of this study is to develop a clearer understanding of the interactions between cutting parameters, surface quality, and chip formation. The findings aim to provide guidance for process optimization, ensuring higher efficiency, improved surface finish, and enhanced durability in aluminum milling operations.

**Keywords:** Machining, Milling, Aluminum, Cutting parameters, Chip formation, Surface finish, Down milling, Up milling, Optimization.

