

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

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Option énergétique



Mémoire de fin d'étude

Thème :

**Etude de l'Influence des paramètres de coupes
sur l'usure des outils de coupes en usinage**

Présenté par :

Lamri Sidali

Zioueche Mohamed

Membre du jury :

Encadreur : Merzouk Meziane

Président :

Examineur :

Année Universitaire 2023-2024

Remerciement

En premier lieu, nous devons remercier « **Allah** », le tout-puissant, de nous avoir donné tout le courage et la santé pour achever ce travail.

Un grand merci à Monsieur **Merzouk Meziane** pour son accompagnement tout au long de notre travail dans le cadre de ce mémoire, sa disponibilité et la compétence de son encadrement, ainsi que ses conseils précieux, méritent toute notre reconnaissance et notre respect.

Dédicace

À mon cher père.

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,

À cette source de tendresse, de patience et de

générosité, À ma mère !

À la famille Lamri

À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants

À tous les étudiants de la promotion 2023-2024

Lamri Sidali

Dédicace

À mes parents

À la famille Zioueche

A mes enseignants de l'école primaire jusqu'à
l'université

À toutes mes chers amis

À toute la promotion master mécanique 2023-2024.

À tous ceux qui me sont chers

Zioueche Mohamed

SOMMAIRE

Chapitre I

Introduction générale	
I.1. L'usinage par enlèvement de matière.....	3
I.1.1. Le tournage	3
I.1.1.1. Principales opérations de tournage	3
I.1.2. Le fraisage	8
I.1.2.1 Principales opérations de fraisage	8
I.2. L'usinage par déformation.....	11
I.2.1. Principales opérations d'usinage par déformation	11
I.3. L'usinage par découpage.....	14
I.3.1. Principales opérations d'usinage par découpage	15
Conclusion.....	17

Chapitre II

II.1. Notions	19
II.2. Les outils de coupe	19
II.3. Éléments de l'outil de coupe	20
II.3.2. Partie active de l'outil	20
II.3.3. Face de dépouille $A\alpha$	21
II.3.4. Arrêt tranchante principale S	21
II.3.5. Arrêt tranchante secondaire S'	21
II.3.6. Bec de l'outil	21
II.3.7. Plans de l'outil en main	21
II.3.8. Plans de l'outil en travail	22
II.3.9. Angles de l'outil. (Figure II.2)	23
II.3.10. Géométrie de l'arête de coupe.....	25
II.4. Les types de matériaux utilisés pour les outils tournage.....	26
II.4.1. les aciers rapides supérieurs.....	27
II.4.2. Les Carbures Métalliques.....	27
II.4.3. Outils à carbure brasé.....	28
II.4.4. Outils à plaquettes carbures.....	28

II.4.5. Les céramiques Techniques.....	29
II.4.6. Les diamants industriels.....	29
II.5. Outils et opérations de fraisage : (les fraises).....	30
II.6. Les outils de coupe perçage.....	31
Conclusion	33

Chapitre III

III.1. Définition de l'usure	35
III.2. Modes d'usure en usinage.....	35
III.2.1. Usure par abrasion	35
III.2.2. Usure par adhésion.....	36
III.2.3. Usure par fissuration.....	37
III.2.4. Usure par diffusion.....	37
III.2.5. Usure par corrosion	38
III.3. Influence des paramètres de coupe sur l'usure des outils de coupe.....	38
III.3.1. Vitesse de coupe.....	39
III.3.2. Avance fz	39
III.3.3 Profondeur de passe ap.....	40
III.3.4. Matériau d'outil.....	41
III.3.4. Lubrification.....	42
III.3.4.1. Types de Lubrifiants.....	42
Conclusion	43

Chapitre IV

IV.1. Méthode des éléments finis.....	45
IV.2. La coupe orthogonale élastoplastique	45
IV.3. Approche Lagrangienne	45
IV.4. Approche Eulérienne.....	46
IV.5. Logiciel DEFORM-2D	46
IV.6. La simulation sur DEFORM-2D.....	46
IV.6.1. Modélisation de l'outil de coupe	46
IV.6.2 Modélisation de la pièce à usiner	47
IV.6.3 Matières utilisées	47

IV.7. Les modèles de calculs utilisés	48
IV.7.1 Modèle d'Usui	48
IV.7.2 Modèle d'Archard	49
IV.8 Résultats	49
IV.8.1 L'influence de la vitesse de coupe sur la température de contact.....	49
IV.8.2 L'influence de la vitesse de coupe sur l'usure de l'outil de coupe	51
IV.8.3 L'influence de la vitesse d'avance sur l'usure de l'outil de coupe	52
IV.8.4 L'influence de Profondeur de passe ap sur l'usure de l'outil de coupe	53
IV.8.5 L'influence des différentes vitesses de coupe et vitesses d'avance sur l'usure	54
Conclusion	56

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.01 : Mouvement relatif outil/pièce en tournage [5]	3
Figure I.02 : Terminologie des organes principaux du tour [6]	4
Figure I.03 : L'opération de chariotage [7].....	4
Figure I.04 : L'opération de dressage.....	5
Figure I.05 : L'opération de chanfreinage [9]	5
Figure I.06 : Exemple sur le tournage conique.....	6
Figure I.07 : Opération d'un filetage extérieur [11].....	6
Figure I.08 : L'opération de tronçonnage [12].....	7
Figure I.09 : L'opération d'alésage [13]	7
Figure I.10 : L'opération de taraudage [14]	8
Figure I.11 : Mouvement relatif outil/pièce en fraisage [15]	8
Figure I.12 : L'opération de surfaçage [16].....	9
Figure I.13 : L'opération de rainurage [17]	9
Figure I.14 : L'opération de fraisage combiné [18].....	10
Figure I.15 : Méthode de pliage dans l'usinage par déformation [19]	12
Figure I.16 : Processus de forgeage à chaud [20]	12
Figure I.17 : Processus d'emboutissage en usinage par déformation [21]	13
Figure I.18 : Processus d'estampage en usinage par déformation [22]	13
Figure I.19 : Processus de laminage en usinage par déformation [23]	14
Figure I.20 : Processus de découpage au laser [24].....	15
Figure I.21 : Processus de découpage par jet d'eau [25].....	16
Figure I.22 : Schéma explicatif sur l'opération de poinçonnage [26]	16

Chapitre II

Figure II.01 : Eléments de l'outil	20
Figure II.02 : Plans et angles en main sur les outils courants : outil a charioté droit.....	22
Figure II.03 : Angle de direction d'arrêt de l'outil.....	23
Figure II.04 : Angle d'inclinaison d'arrêt	23
Figure II.05 : Angles des faces	24
Figure II.06 : Définition basique d'un outil en tournage.....	25
Figure II.07 : Géométrie de l'arrêt de coup	26
Figure II.08 : Description géométrique de l'outil	26
Figure II.09 : Outil de tournage en HSS	27
Figure II.10 : Outils tournage en CARBURES.....	28
Figure II.11 : Outils à carbure brasé	28
Figure II.12 : Outils à plaquettes carbures	29
Figure II.13 : Les céramiques	29
Figure II.14 : Les diamants industriels	30
Figure II.15 : Outils et Opérations de fraisage.....	31
Figure II.16 : Des forets en HSS.....	32
Figure II.17 : Des forets en carbure	32

Chapitre III

Figure III.01 : Processus d'usure par abrasion [35]	36
Figure III.02 : Approche de l'usure par adhésion	36
Figure III.03 : Le phénomène d'usure par corrosion [36]	38
Figure III.04 : L'influence de la vitesse de coupe sur la durée de vie de l'outil.....	39
Figure III.05 : L'influence de la profondeur de coupe sur la durée de vie de l'outil.....	40
Figure III.06 : L'impact de la lubrification sur la durée de vie des outils	43

Chapitre IV

Figure IV.O1 : Maillage initial de l'outil de coupe	46
Figure IV.O2 : Maillage initial de la pièce	47
Figure IV.O3 : Le positionnement Outil-Pièce durant l'usinage	48
Figure IV.O4 : La géométrie de l'outil de coupe utilisé	48
Figure IV.O5 : Température de contact en fonction de la vitesse de coupe	50
Figure IV.O6 : Variation de la profondeur d'usure en fonction de la vitesse de coupe.....	51
Figure IV.O7 : L'influence de la vitesse d'avance sur l'usure de l'outil de coupe	51
Figure IV.O8 : L'influence de Profondeur de passe ap sur l'usure de l'outil de coupe.....	52
Figure IV.O9 : L'influence de Profondeur de passe ap sur l'usure de l'outil de coupe	53
Figure IV.10 : L'influence des différentes vitesses de coupe et vitesses d'avance sur l'usure .	54

Résumé

Cette étude examine l'influence des paramètres de coupe sur l'usure des outils de coupe en usinage. Utilisant le logiciel de simulation **DEFORM-2D**, l'étude analyse comment la vitesse de coupe (**Vc**), la vitesse d'avance (**f**) et la profondeur de passe (**ap**) affectent la température de contact et la profondeur d'usure. Les résultats montrent que ces paramètres ont une relation directe avec la profondeur d'usure, offrant des perspectives pour optimiser les processus d'usinage et prolonger la durée de vie des outils, améliorant ainsi l'efficacité de la production et la qualité des pièces fabriquées.

.....

Abstract

This study investigates the influence of cutting parameters on tool wear in machining. Using the **DEFORM-2D** simulation software, the research analyzes how cutting speed (**Vc**), feed rate (**f**), and depth of cut (**ap**) affect contact temperature and wear depth. The results demonstrate that these parameters have a direct relationship with wear depth, providing insights for optimizing machining processes and extending tool life, thereby enhancing production efficiency and the quality of manufactured parts.

.....

ملخص

تسعرض هذه الدراسة تأثير معايير القطع على تآكل أدوات القطع في عمليات التشغيل. باستخدام برنامج المحاكاة **DEFORM-2D**، تحلل الدراسة كيف تؤثر سرعة القطع (**Vc**) ومعدل التغذية (**f**) وعمق القطع (**ap**) على درجة حرارة التصلب وعمق التآكل. أظهرت النتائج أن هذه المعايير لها علاقة مباشرة بعمق التآكل، مما يوفر رؤى لتحسين عمليات التشغيل وإطالة عمر الأدوات، وبالتالي تعزيز كفاءة الإنتاج وجودة الأجزاء المصنعة.

Introduction générale

L'usinage est un domaine qui repose sur des procédés sophistiqués et des technologies de pointe, façonne la matière brute pour créer des pièces aux spécifications minutieusement définies. L'efficacité de ces opérations d'usinage ne se mesure pas seulement à la qualité des pièces produites, mais aussi à la durabilité et à la performance des outils de coupe utilisés.

Un aspect crucial de l'usinage : l'usure des outils de coupe et ses implications sur la qualité des pièces et la productivité des opérations. Les professionnels de l'usinage font face à un défi constant en raison de l'usure des outils, qu'elle soit causée par l'abrasion, l'adhésion, la fissuration, la diffusion ou la corrosion. En effet, chaque fois qu'un outil s'érouse prématurément ou que la qualité de finition des pièces diminue, la productivité de l'atelier est compromise, entraînant des retards de production et des coûts supplémentaires.

Nous étudions aussi l'effet de paramètres tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur l'usure des outils et la qualité des pièces fabriquées. En ajustant de manière appropriée ces paramètres. Les professionnels de l'usinage peuvent non seulement prolonger la durée de vie des outils, mais aussi améliorer la qualité et la précision des pièces, contribuant ainsi à accroître l'efficacité globale des opérations d'usinage.

Dans l'industrie manufacturière, la simulation est cruciale pour assurer l'efficacité et la qualité. En effet, en recourant à des outils de simulation avancés, les professionnels de l'usinage peuvent virtuellement reproduire et analyser les processus de fabrication, anticiper les défauts potentiels, optimiser les paramètres de coupe et valider les stratégies de production avant même de passer à la phase concrète. Cette approche prédictive offre ainsi un avantage compétitif indéniable, permettant de réduire les coûts de développement, d'optimiser les performances des outils et de garantir la qualité des pièces produites, contribuant ainsi à une fabrication plus efficace et plus rentable.

CHAPITRE I

Procédés d'usinages

I.1. L'usinage par enlèvement de matière

L'usinage par enlèvement de matière consiste à fabriquer des pièces mécaniques en retirant de la matière pour obtenir les formes et dimensions souhaitées. On peut distinguer 2 classes essentielles en ce type d'usinage :

I.1.1. Le tournage

Le tournage est une technique d'usinage qui permet de créer des surfaces de révolution internes et externes, ainsi que des surfaces planes et d'autres types de surfaces telles que celles produites par filetage.

Pour façonner une surface cylindrique à l'aide d'un tour parallèle, il est crucial de coordonner deux mouvements entre la pièce et l'outil :

- . La rotation rapide et continue de la pièce, connue sous le nom de **mouvement de coupe** et désignée par **Mc**, fournit le mouvement circulaire nécessaire
- . La translation de l'outil, qui est généralement rectiligne, uniforme et lente, crée un mouvement connu sous le nom de **mouvement d'avance**, identifié par **Ma** ou **Mf**.
- . Pour permettre à l'outil de créer une surface en enlevant des copeaux, un ajustement de position est nécessaire. Ce troisième mouvement, appelé **mouvement de pénétration**, est identifié par **Mp**.

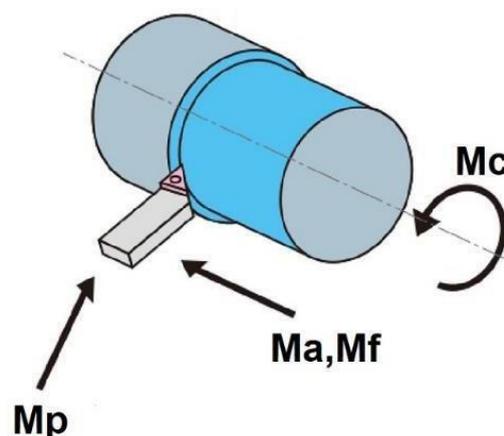


Figure I.01 : Mouvement relatif outil/pièce en tournage [5]

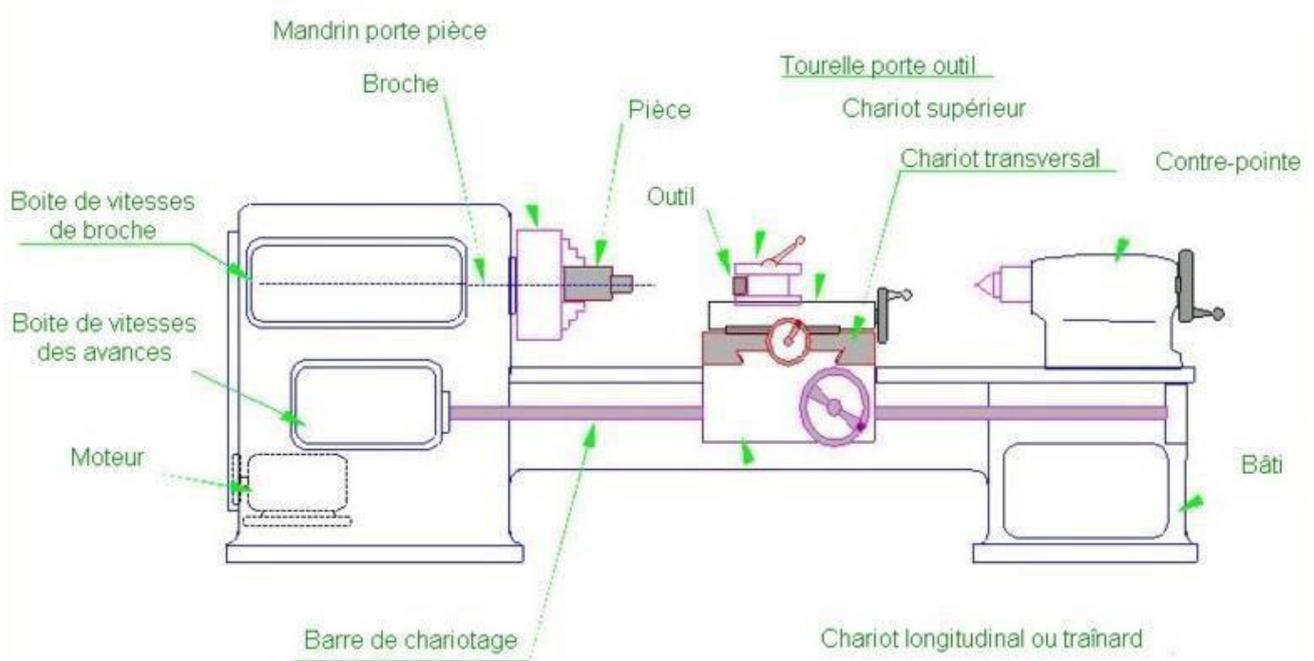


Figure I.02 : Terminologie des organes principaux du tour [6]

I.1.1.1 Principales opérations de tournage

➤ Chariotage

Le chariotage implique l'usinage d'un cylindre à l'aide d'un tour, où l'outil de coupe se déplace le long d'une trajectoire parallèle à l'axe de rotation de la pièce. [1]

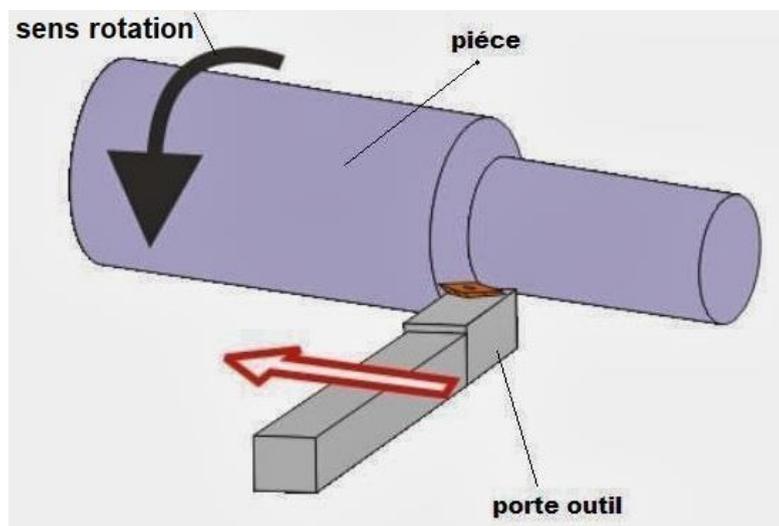


Figure I.03 : L'opération de chariotage [7]

➤ **Dressage**

L'opération de dressage consiste à réaliser l'usinage de faces planes sur un tour, en déplaçant l'outil de manière perpendiculaire à l'axe autour duquel la pièce tourne.



Figure I.04 : L'opération de dressage

➤ **Chanfreinage**

Le chanfreinage est un processus d'usinage permettant d'éliminer les arêtes des pièces, il vise à prévenir la rupture ou l'usure des arêtes.



Figure I.05 : L'opération de chanfreinage [9]

➤ Tournage conique

Il s'agit d'exécuter des pièces de révolution dont les génératrices ne sont pas parallèles.

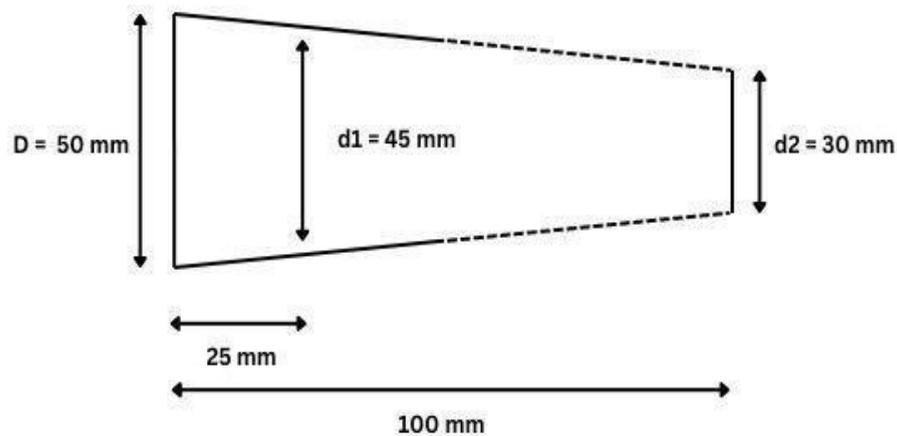


Figure I.06 : Exemple sur le tournage conique

L'exemple signifie que pour une longueur de 100 mm la différence du diamètre est de 20 mm.

On a :

$$\text{Pour } 1 \text{ mm} : D-d = (20 \cdot 1) / 100 = 0.2 \text{ mm.}$$

$$\text{Pour } 100 \text{ mm} : D-d_2 = (20 \cdot 100) / 100 = 20 \text{ mm.}$$

$$\text{Pour } 25 \text{ mm} : D-d_1 = (20 \cdot 25) / 100 = 5 \text{ mm} \Rightarrow d_1 = D - 5$$

$$\Rightarrow d_1 = 45 \text{ mm}$$

➤ Filetage

On parle de filetage lorsqu'on forme un ou plusieurs filets hélicoïdaux, il est aussi possible de trouver des filets ronds et carrés.

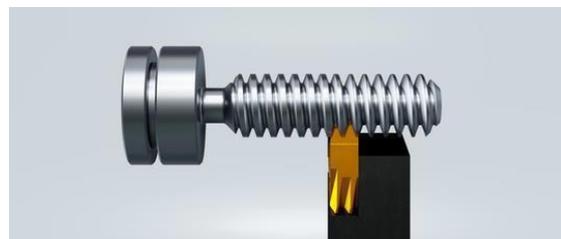


Figure I.07 : Opération d'un filetage extérieur [11]

➤ **Tronçonnage**

La technique de tronçonnage permet de diviser un objet en deux parties en créant une rainure jusqu'à l'axe de la pièce.

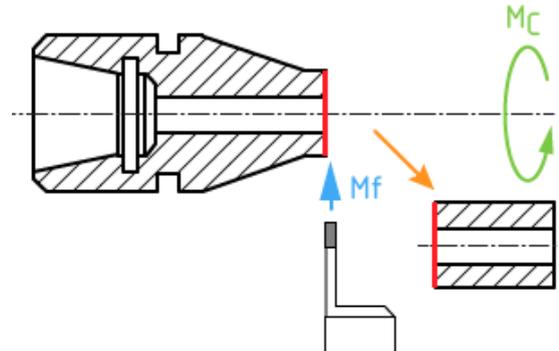


Figure I.08 : L'opération de tronçonnage [12]

➤ **Perçage**

L'opération de perçage consiste à créer un trou dans la pièce à l'aide d'une foreuse, généralement en alignant l'axe du trou avec celui de la pièce.

➤ **Alésage**

L'opération d'alésage permet d'usiner de manière précautionneuse la surface intérieure des pièces creuses.

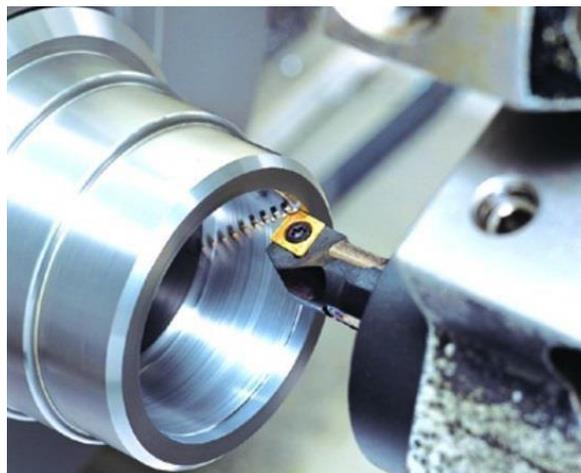


Figure I.09 / L'opération d'alésage [13]

➤ **Taraudage**

Le taraudage est une technique utilisée pour réaliser un filetage sur les parois d'un trou cylindrique à l'aide d'un taraud.

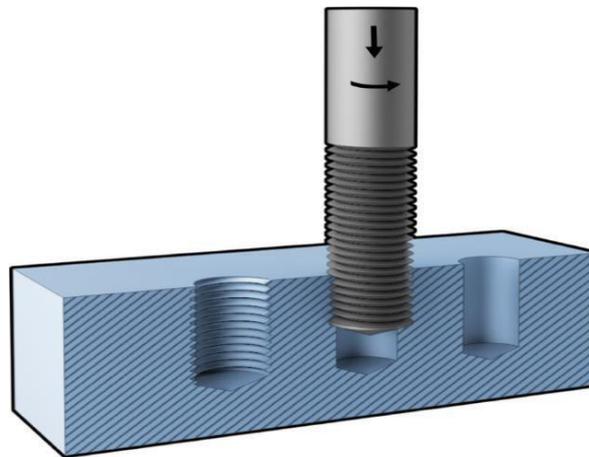


Figure I.10 : L'opération de taraudage [14]

I.1.2. Le fraisage

Le fraisage est une technique de fabrication qui met en œuvre deux mouvements : la rotation d'un outil utilisé pour découper et le déplacement d'une pièce à usiner. Il est possible de déplacer la pièce à usiner dans toutes les directions. [2]

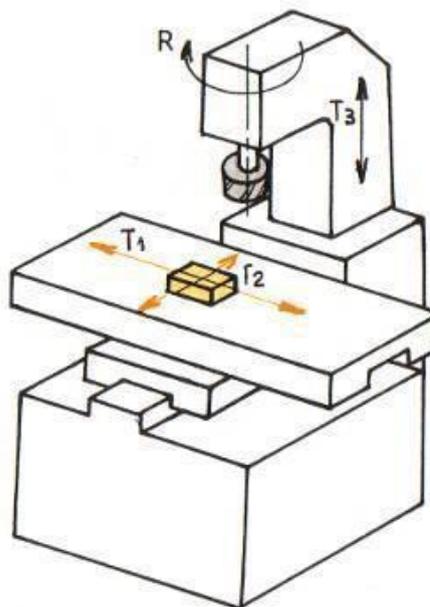


Figure I.11 : Mouvement relatif outil/pièce en fraisage [15]

I.1.2.1 Principales opérations de fraisage

➤ Surfaçage

La réalisation de plats de dimensions variées peut être effectuée de manière efficace grâce à l'opération de surfaçage.

On intègre l'opération de :

- Surfaçage en bout
- Surfaçage en roulant
- Surfaçage incliné

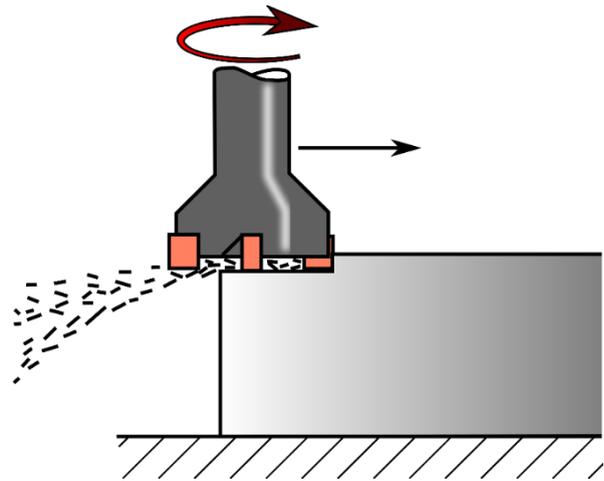


Figure I.12 : L'opération de surfaçage [16]

➤ Rainurage

Effectuer une rainure dans une pièce est une opération courante, et le fraisage d'une rainure est l'une des principales utilisations d'une défonceuse. Dans la plupart des cas, les rainures sont utilisées pour guider des pièces de mobilier ou pour assembler du bois. Il est donc nécessaire qu'elles soient rigoureusement rectilignes. On intègre l'opération de :

- Rainurage de profil en pleine matière
- Rainurage en vé
- Rainurage en Té

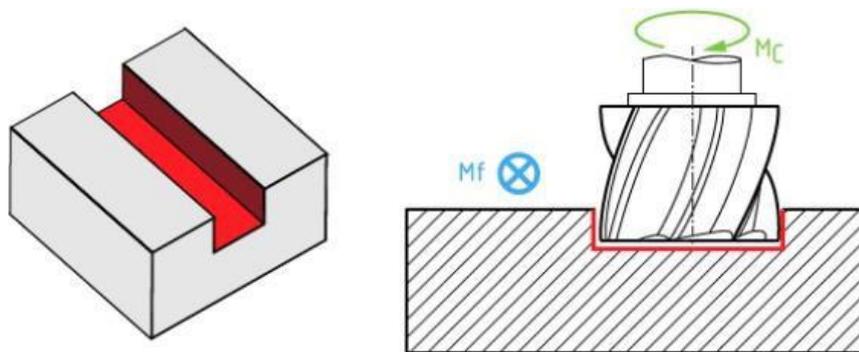


Figure I.13 : L'opération de rainurage [17]

➤ **Fraisage combiné**

Cette méthode permet de réaliser différentes opérations sur une pièce à l'aide d'une fraise quelque soit en roulant ou en bout, cela permet d'atteindre le résultat souhaité en une seule opération.

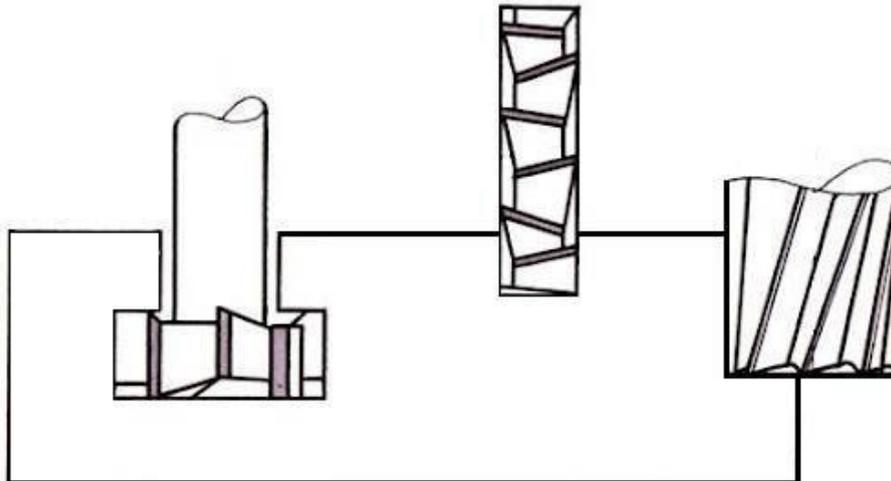


Figure I.14 : L'opération de fraisage combiné [18]

En plus des opérations déjà mentionnées, on ajoute l'opération de :

➤ **Centrage**

C'est l'opération qui consiste à déplacer la fraise ou la pièce à usiner pour aligner correctement l'axe de l'outil avec la référence ou l'axe de rotation de la pièce. Le centrage garantit un positionnement précis avant de commencer le fraisage.

➤ **Perçage**

C'est le processus de création de trous dans une pièce en utilisant une fraise spéciale appelée foret. Le perçage peut être effectué à différentes profondeurs et diamètres en fonction des besoins de la pièce.

➤ **Lamage**

Le lamage est une opération visant à créer une cavité conique ou cylindrique sur la surface d'une pièce. Cette cavité sert généralement à accueillir la tête d'une vis ou d'un boulon, assurant ainsi un assemblage solide entre plusieurs éléments.

➤ **Alésage**

L'alésage est le processus de création d'un trou cylindrique à l'intérieur d'une pièce déjà existante. Cette opération peut être effectuée pour ajuster les dimensions d'un trou existant ou pour créer un nouveau trou de diamètre spécifique.

➤ **Taraudage**

Le taraudage est le processus de création de filetages à l'intérieur d'un trou préalablement percé. Cela permet d'introduire des vis, des boulons ou d'autres éléments filetés pour l'assemblage de pièces.

➤ **Tronçonnage**

Le tronçonnage est une opération de coupe qui permet de diviser une pièce en segments de longueurs spécifiques à l'aide d'une fraise spéciale ou d'une scie. Cette technique est utilisée pour découper une pièce brute en morceaux de taille adéquate pour un traitement ultérieur ou pour l'assemblage.

I.2. L'usinage par déformation

L'usinage par déformation est un procédé de fabrication où la forme finale de la pièce est obtenue en appliquant une force contrôlée pour déformer le matériau sans enlever de matière. Ce processus peut inclure diverses techniques telles que le pliage, le formage, le forgeage, l'estampage, le laminage, et le matriçage.

Cette méthode est couramment utilisée pour fabriquer des pièces métalliques complexes.

La méthode est utilisée dans l'industrie automobile, aéronautique, de la construction, et dans d'autres domaines où des formes spécifiques doivent être obtenues avec précision.

I.2.1. Principales opérations d'usinage par déformation

➤ **Pliage**

Le pliage est une méthode où un matériau est plié ou déformé pour lui donner une forme particulière, sans retirer de substance. Cette méthode est fréquemment employée pour créer

des angles, des courbes ou des formes spécifiques sur des pièces métalliques ou d'autres matériaux.



Figure I.15 : Méthode de pliage dans l'usinage par déformation [19]

➤ **Forgeage**

Le forgeage est une méthode d'usinage où un matériau est formé par l'application d'une force compressive à haute température, pour obtenir la forme désirée, le matériau subit une déformation plastique lors du forgeage.



Figure I.16 : Processus de forgeage à chaud [20]

➤ **Formage (Emboutissage)**

L'emboutissage, aussi appelé formage par déformation plastique, est une méthode de façonnage du matériau à la forme voulue grâce à la pression exercée dans un moule ou une matrice.

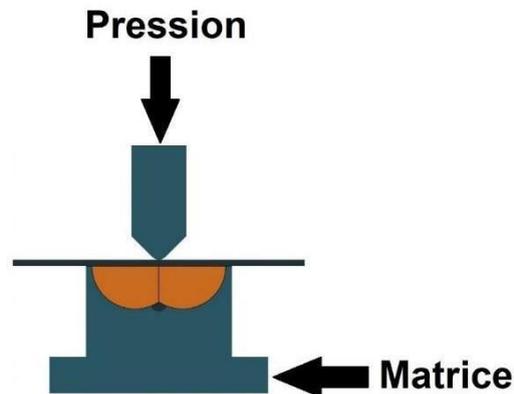


Figure I.17 : Processus d'emboutissage en usinage par déformation [21]

➤ **Estampage**

L'estampage en usinage par déformation est un processus de fabrication dans lequel une pièce de métal est formée en utilisant une force de compression pour la déformer dans une matrice ou un moule. On utilise fréquemment cette méthode pour fabriquer des pièces complexes, avec une grande précision dimensionnelle et une finition de surface impeccable. Lors de la phase d'estampage, une pièce de métal, habituellement une feuille ou une plaque, est placée entre deux matrices qui ont la forme souhaitée de la pièce finale. Après cela, la pièce de métal est soumise à une force, généralement à l'aide d'un mécanisme hydraulique ou mécanique, pour qu'elle adopte la forme de la matrice.

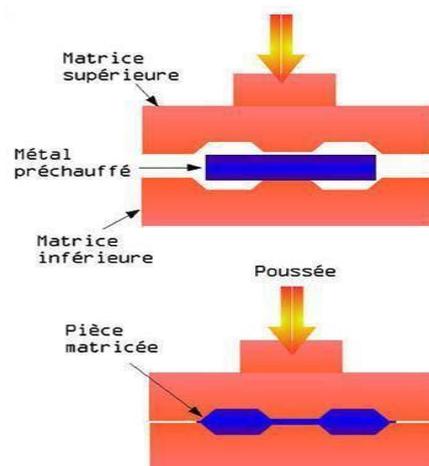


Figure I.18 : Processus d'estampage en usinage par déformation [22]

➤ **Laminage**

Le processus de fabrication du laminage en usinage par déformation implique de déformer un élément métallique. En plaçant ce matériau entre deux rouleaux ou cylindres, en général en acier, on peut le rendre plus épais et lui donner une forme spécifique. Ce processus est largement employé dans l'industrie pour produire une vaste gamme de produits plats, comme des feuilles, des plaques, des bandes et des profilés.

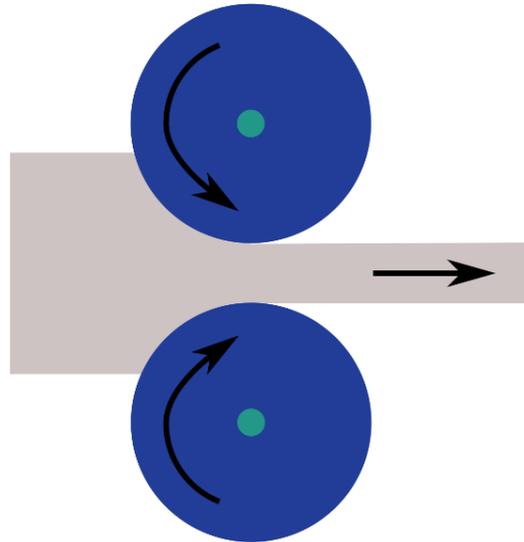


Figure I.19 : Processus de laminage en usinage par déformation [23]

I.3. L'usinage par découpage

L'usinage par découpage, aussi appelé découpe industrielle, est un procédé de fabrication utilisé pour façonner des matériaux en les coupant avec des outils spécifiques. Dans l'industrie manufacturière, ce processus est couramment utilisé pour fabriquer des pièces et des composants dans une grande variété de formes et de tailles. L'usinage par découpage peut être réalisé de plusieurs manières, notamment par le biais de techniques telles que le découpage au laser, le découpage par jet d'eau, le découpage au plasma, le poinçonnage etc. Chaque méthode de découpage présente ses propres avantages et est adaptée à différents matériaux et exigences de précision.

I.3.1. Les principales opérations d'usinage par découpage

➤ Le découpage au laser

Le découpage au laser est une méthode de découpe industrielle qui utilise un faisceau laser concentré pour découper différents matériaux. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie manufacturière en raison de sa grande précision, de sa vitesse élevée et de sa capacité à couper une grande variété de matériaux, y compris le métal, le plastique, le bois, le verre, le caoutchouc et bien d'autres. La découpe au laser consiste à utiliser un laser concentré, habituellement un laser CO2 ou un laser à fibre, qui est dirigé vers la surface du matériau à découper. La chaleur intense du laser chauffe rapidement et vaporise la matière à l'endroit précis où la coupe doit être effectuée. Grâce aux mouvements contrôlés de la tête de coupe au laser, il est possible de découper des formes complexes avec une grande précision.



Figure I.20 : Processus de découpage au laser [24]

➤ Découpage par jet d'eau

Le découpage par jet d'eau consiste à utiliser un jet d'eau à haute pression pour découper différents matériaux. Dans ce processus, de l'eau est pressurisée à des niveaux très élevés, souvent mélangée à des abrasifs comme du sable ou des particules de diamant pour augmenter son pouvoir de coupe. Après cela, l'eau est dirigée avec précision vers le matériau à découper, le traversant et le séparant en morceaux selon le tracé souhaité. Ce procédé est souvent utilisé pour découper des matériaux sensibles à la chaleur, tels que le verre,

le plastique, le caoutchouc, ainsi que des matériaux plus robustes comme le métal et la pierre. Sa capacité à découper avec une grande précision et à produire des bords nets, sans déformation causée par la chaleur est grandement appréciée. De plus, il est respectueux de l'environnement car il ne fait généralement pas usage de produits chimiques nocifs et produit peu de déchets.



Figure I.21 : Processus de découpage par jet d'eau [25]

➤ Poinçonnage

Pour perforer ou estampiller des trous, des formes ou des motifs dans un matériau, généralement du métal, du plastique ou du papier, on utilise le poinçonnage. Cette technique est couramment utilisée dans l'industrie de la fabrication pour créer des pièces avec des caractéristiques spécifiques, telles que des trous pour les boulons, des ouvertures pour les câbles, des découpes pour les composants, etc. Le processus de poinçonnage implique généralement l'utilisation d'une presse ou d'une machine de poinçonnage qui applique une force concentrée sur une matrice, entraînant ainsi la découpe ou la perforation du matériau. Il est possible de concevoir des matrices pour produire une grande variété de formes et de tailles, ce qui permet une personnalisation adaptée aux besoins spécifiques du projet.

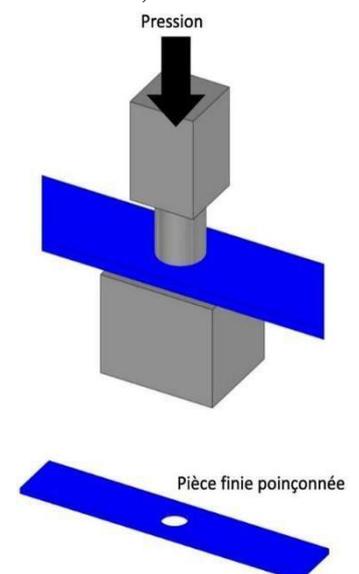


Figure I.22 : schéma explicatif sur l'opération de poinçonnage [26]

Conclusion

En conclusion de ce premier chapitre consacré aux procédés d'usinage, nous avons exploré les différentes techniques fondamentales utilisées dans l'industrie manufacturière.

Du tournage au fraisage, en passant par la déformation et le découpage, chaque méthode a été examinée sous un éclairage analytique, mettant en lumière ses spécificités, ses applications et ses exigences. À travers cette étude, nous avons pu saisir la richesse et la diversité des pratiques utilisées pour façonner la matière brute en pièces mécaniques de haute précision.

CHAPITRE II

Les outils de coupe

II.1. Notions

La sélection judicieuse d'un matériau et d'une palette chromatique pour le processus d'usinage revêt une importance primordiale pour la réussite de ladite opération.

Pour la réussite d'une opération d'usinage, il est crucial de choisir un matériau et une nuance de coupe appropriés.

Pour effectuer une sélection judicieuse en vue d'une application spécifique, une appréhension approfondie des propriétés intrinsèques des matériaux de coupe et de leurs performances s'avère primordiale. Les paramètres à considérer englobent la nature de la matière à usiner, la configuration et les dimensions de la pièce, les paramètres d'usinage ainsi que le niveau de finition requis à chaque phase.

La dureté, la ténacité et la résistance à l'usure constituent des caractéristiques distinctives des matériaux de coupe, lesquels sont catégorisés en une pléthore de nuances présentant des propriétés spécifiques.

En général, les matériaux utilisés pour la coupe doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Résistance : capacité à faire face à l'usure en dépouille et à la déformer.
- Persévérance : refus de se séparer.
- La neutralité chimique, définie comme l'absence de réaction chimique avec le matériau en cours d'usinage, est un principe bien établi dans le domaine scientifique.
- Une stabilité chimique : une résistance à l'oxydation et à la diffusion.
- Une capacité à résister aux variations thermiques brusques.

II.2. Les outils de coupe

Les outils de coupe sont des dispositifs utilisés pour réaliser l'opération d'usinage en détachant la matière sous forme de copeaux. [31]. Il y a un large choix d'outils de coupe : différentes formes, matériaux et revêtements. Malgré leur utilité différente et leur apparence extérieure différente, n'importe quel outil est doté d'une partie active, Cette procédure concerne spécifiquement l'action directe de l'élimination des fragments de matériau. Peu importe leur configuration, la composante active de tous les instruments de coupe partage une similitude avec l'outil conventionnel de tournage. Alors que les dents des instruments de coupe spécialisés, tels que la meule, sont saturées de particules abrasives capables d'extraire

les fragments de matériau grâce à leurs arêtes [31]. L'outil doit posséder les caractéristiques suivantes :

- La quantité d'énergie nécessaire pour façonner la pièce selon les spécifications requises. L'exactitude des dimensions à réaliser.
- La qualité de la surface de la pièce à produire.
- L'influence de la productivité du travail sur l'efficacité.
- La résistance (persistance).
- Un coût de production réduit.

II.3. Éléments de l'outil de coupe

Les propriétés fondamentales des différents outils sont comparables. Un instrument de coupe peut se différencier par sa géométrie arrondie et son orientation spatiale, définie par des angles de coupe normalisés. [33]

En général, on peut trouver ces éléments dans un outil de coupe (Figure II.01) : [30]

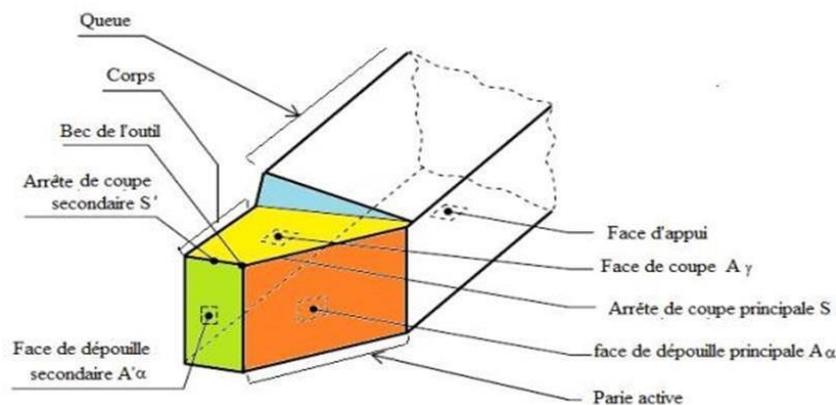


Figure II.01 : Éléments de l'outil

II.3.1. Corps de l'outil

Cela concerne la section de l'outil qui supporte les composants essentiels de l'outil, tels que les éléments tranchants ou les plaquettes, et qui est utilisée pour leur fixation et leur positionnement sur la machine.

II.3.2. Partie active de l'outil

Il s'agit de la section directement impliquée dans le processus de coupe. La face de coupe, les faces en dépouille, et les arêtes tranchantes forment la partie active de l'outil. [30]

Face de coupe : $A\gamma$

C'est à cet emplacement que le copeau se déplace pendant le processus de coupe.

II.3.3. Face de dépouille $A\alpha$

Il s'agit de la surface où l'outil effectue la coupe. Elle est constituée de la face principale et de la face secondaire. Cette surface est la principale face en dépouille. L'arête tranchante principale se situe à l'intersection de la face de coupe.

II.3.4. Arrêt tranchante principale S

Il s'agit de l'arête tranchante permettant l'enlèvement de matière, formée par l'intersection entre la face de coupe $A\gamma$ et la face en dépouille principale $A\alpha$.

II.3.5. Arrêt tranchante secondaire S'

Il s'agit d'une arête secondaire qui commence à la fin de l'arête principale et s'étend dans une direction différente. Elle résulte de l'angle de coupe $A\gamma$ et de l'angle de dépouille secondaire $A\alpha$. Certains outils sont équipés de plusieurs arêtes secondaires.

II.3.6. Bec de l'outil

C'est la zone de raccordement entre l'arête principale et l'arête secondaire. Elle a la possibilité d'être rectiligne, arrondie ou pleine.

Plans de l'outil. (Figure II.02)

II.3.7. Plans de l'outil en main

- Le plan d'orientation de l'outil, noté Pr , est défini différemment selon le type d'outil utilisé. Pour un outil rotatif, Pr est le plan passant par le point de l'arête de coupe et contenant l'axe de rotation de l'outil. Pour un outil non rotatif, Pr est le plan parallèle au plan de référence servant de support au corps de l'outil.
- Le plan d'arête de l'outil, noté Ps , est un plan qui s'aligne avec l'arête de coupe en un point précis et est perpendiculaire au plan de référence de l'outil, Pr .
- Le plan de travail standard, désigné Pf , est un plan parallèle au plan de référence de l'outil, Pr . Ce plan est situé au niveau de l'arête de coupe et est également parallèle à la direction présumée de l'avance de l'outil.
- Le plan inférieur de l'outil, noté Pp , est défini comme un plan perpendiculaire à la fois au plan de référence de l'outil, Pr , et au plan de travail standard, Pf , en passant par le point de l'arête de coupe.

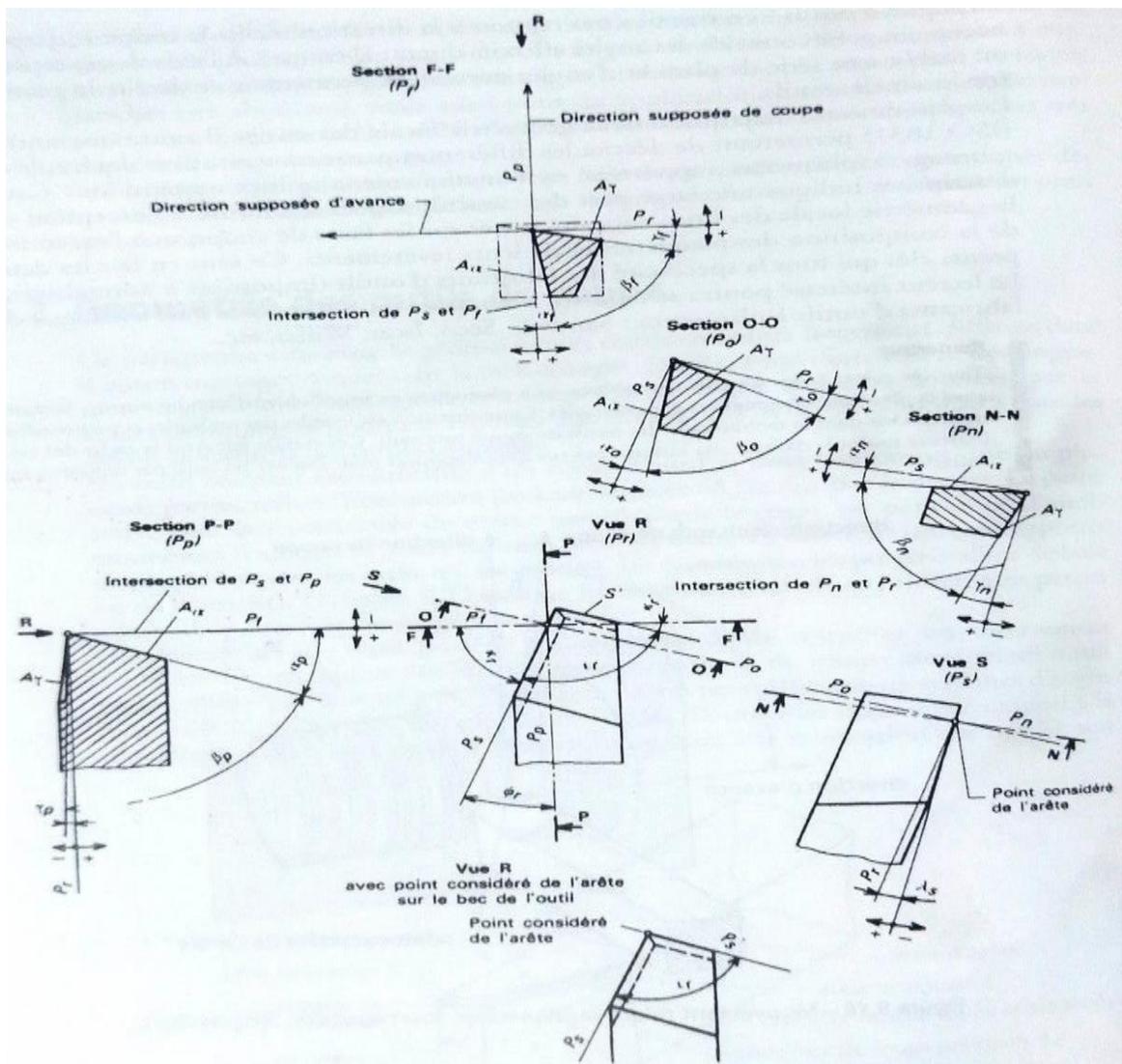


Figure II.02 : plans et angles en main sur les outils courants : outil à charioter droit

II.3.8. Plans de l'outil en travail

- Le plan de référence en travail, désigné P_{re} , est un plan perpendiculaire à l'arête de coupe au point considéré. Il est également perpendiculaire à la direction de la vitesse résultante de la coupe, laquelle correspond à la direction instantanée du mouvement combiné de coupe et d'avance à ce point.
- Le plan de travail d'arête, noté P_{se} , est un plan en contact avec l'arête de coupe et perpendiculaire au plan de référence en travail, P_{re} . Ce plan indique la direction de la vitesse résultante de la coupe.

- Le plan de travail, désigné P_{fe}, représente la direction de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance au point spécifique de l'arête. Ce plan est parallèle au plan de référence en travail, P_{re}.
- Le plan arrière, noté P_{pe}, est situé derrière le plan de travail et est perpendiculaire à la fois au plan de référence en travail, P_{re}, et au plan de travail, P_{fe}, en passant par le point de l'arête.

II.3.9. Angles de l'outil. (Figure II.2)

II.3.9.1. Angles d'arête de l'outil en main

L'angle de l'arête de l'outil, noté κ_r (Figure II.3), est déterminé par la mesure de l'angle aigu formé dans le plan de référence P_r entre le plan d'arête P_s et le plan de travail P_f. Cette mesure est effectuée en fonction de la distance entre la trace de P_s dans P_r et la pointe de l'outil.

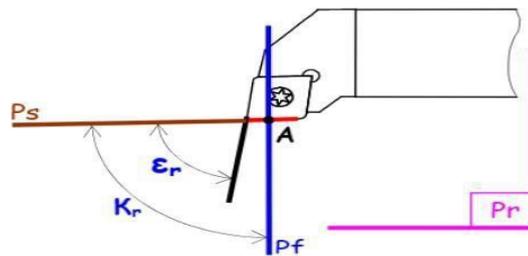


Figure II.03 : Angle de direction d'arrêt de l'outil

Dans la Figure II.04, l'angle d'inclinaison de l'arête de l'outil, désigné λ_s , est mesuré dans le plan d'arête P_s entre l'arête de coupe et le plan de référence P_r. Lorsque l'on s'éloigne de la pointe de l'outil, l'arête se trouve en dessous du plan P, ce qui est considéré comme une valeur positive.

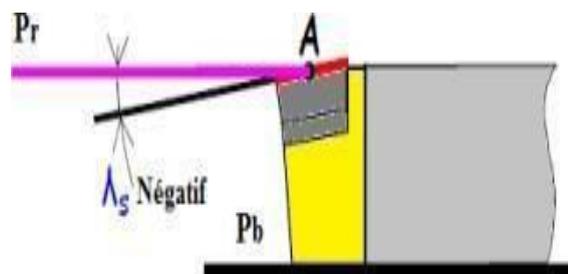


Figure II.04 : Angle d'inclinaison d'arrêt

- L'angle de l'outil ϵ_r est établi en mesurant l'angle entre les plans P et le plan d'arête secondaire P_s.

- L'angle d'orientation de l'arête secondaire de l'outil, noté k' , est défini comme l'angle mesuré dans le plan de référence Pr entre le plan de travail traditionnel Pf et la projection de l'arête secondaire dans le plan de référence de l'outil Pr

La relation suivante établit une corrélation entre l'angle de direction d'arête de l'outil, la pointe de l'outil et la direction d'arête secondaire de l'outil :

$$K_r + \varepsilon_r + K_r' = 180^\circ$$

II.3.9.2. Angle d'arête de l'outil en travail

- Dans le contexte du plan de référence Pre , l'angle d'orientation de l'arête en travail, désigné kre , est évalué dans l'espace situé entre les plans Pfe et Pse . Cette mesure est réalisée selon la convention de sens préalablement définie pour l'angle kre .
- Dans le contexte de l'analyse de l'arête en travail, l'angle λ est défini comme l'angle mesuré dans le plan Pse , entre l'arête de coupe et le plan de référence Pre . Pour cet angle λ , la convention de signe est cohérente avec celle de l'angle λ_s .

II.3.9.3. Angles des faces.

Pour la création des parties de l'outil, les surfaces de coupe et de dépouille sont représentées dans des plans de section particuliers qui passent tous par un point spécifique de l'arête (voir Figure II.05). Quel que soit le plan choisi pour définir la section, le résultat est le suivant :

[30]

- L'angle de dépouille, noté α , émerge de la symétrie entre la face de dépouille $A\alpha$ et le plan d'arête Ps (ou Pse).
- L'angle de taillant, β , représente une variation significative de l'angle entre le côté de coupe $A\gamma$ et le côté de dépouille $A\alpha$.
- L'angle de coupe, γ , est défini comme un angle aigu qui sépare la face de coupe $A\gamma$ du plan de référence Pr .

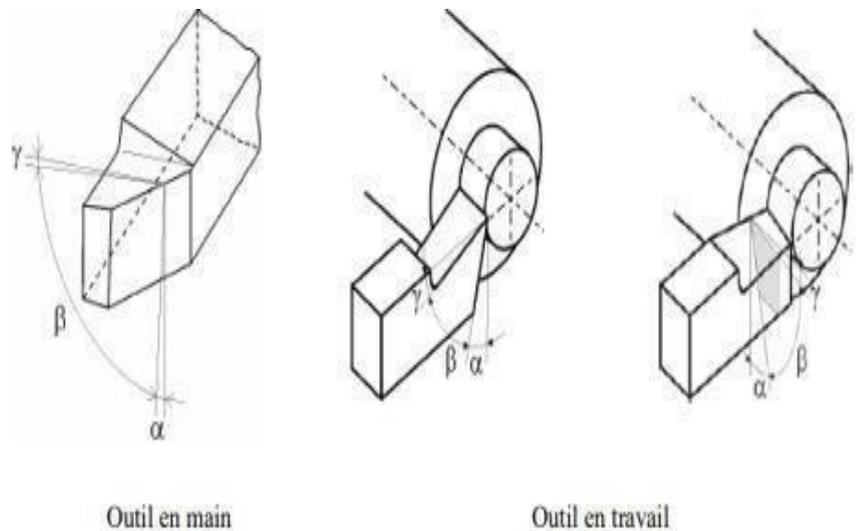


Figure II.05 : Angles des faces.

- Dans un même plan de section, que ce soit dans le système de l'outil en main ou dans celui de l'outil en travail, ces trois angles sont liés par l'équation : $(\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ)$ [32]. Les valeurs des angles sont déterminées en fonction des exigences dans l'un des plans de section suivants :
- Le plan orthogonal de l'outil, noté P_o (ou P_{oe}), est défini par sa perpendicularité dans le processus de travail. Ce plan est perpendiculaire à la fois au plan de référence P_r (ou P_{re}) et au plan d'arête P_s (ou P_{se}), au niveau du point spécifique considéré de l'arête (voir Figure II.06).
- Le plan P_n (ou P_{ne}) est défini comme étant le plan normal à l'arête, c'est-à-dire un plan perpendiculaire à l'arête jusqu'à la position considérée. En d'autres termes, le plan P_n est équivalent au plan P_{ne} .
- Le plan P_f , également désigné comme le plan de travail traditionnel, correspond au plan de travail P_{fe} .
- Le plan P_p désigne le plan dirigé vers l'arrière de l'outil, précisément désigné comme le plan vers l'arrière en travail (P_{pe}).

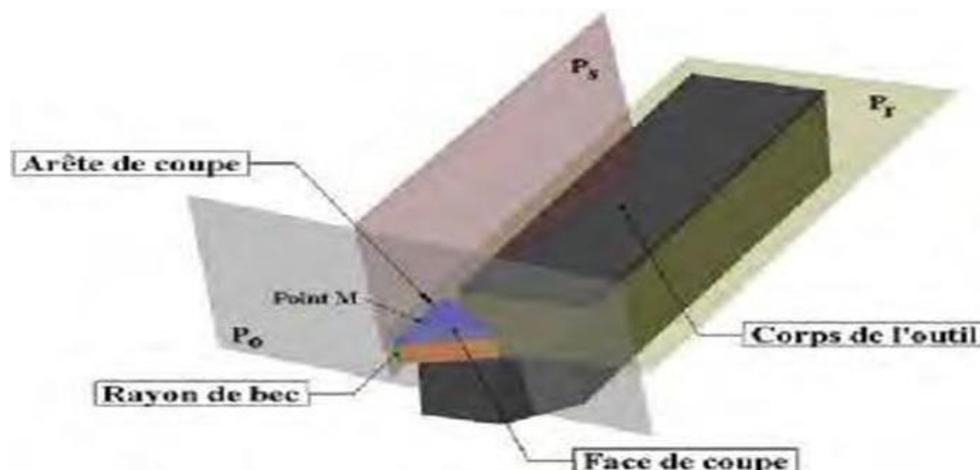


Figure II.06 : Définition basique d'un outil en tournage

II.3.10. Géométrie de l'arête de coupe

La plupart des modèles de coupe en trois dimensions représentent l'outil en utilisant trois plans distincts, illustrés par la face de coupe et les faces de dépouilles principale et secondaire (voir Figure II.7.a) [34]. La zone de coupe de l'outil se compose en effet de trois plans

reliés par deux rayons (voir Figure II-7.b) : le rayon de bec r_e et le rayon d'acuité R de l'arête de coupe, souvent omis dans de nombreux modèles [33].

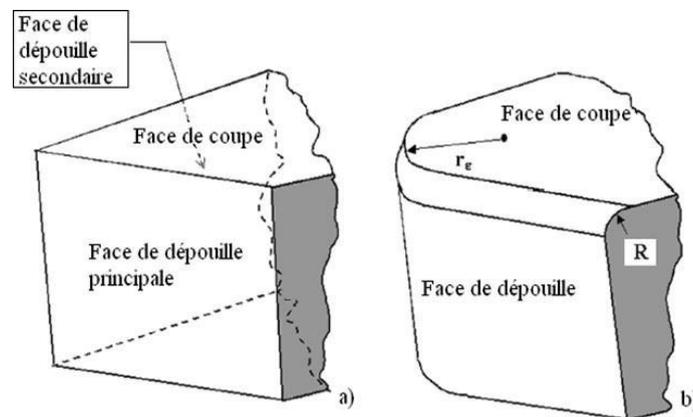


Figure II.07 : Géométrie de l'arrêt de coup

II.3.11. Description géométrique du contact en tournage

La surface de contact tridimensionnelle entre l'outil et la pièce présente une complexité relative. La définition donnée ci-dessous (voir Figure II.8) fait la distinction entre la surface de contact, une ligne directrice (ou ligne d'arête), et une ligne d'approximation (ou ligne de coupe) [33].

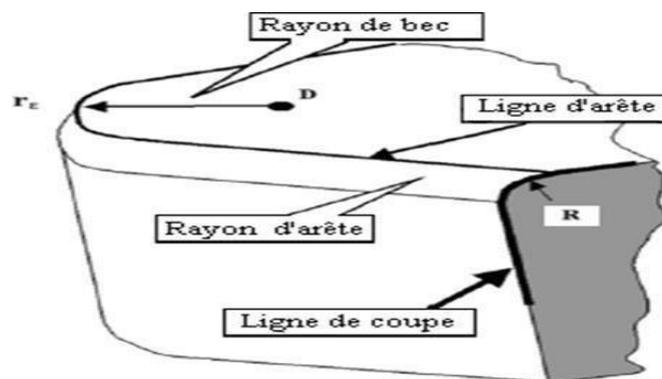


Figure II.08 : Description géométrique de l'outil

II.4. Les types de matériaux utilisés pour les outils tournage

Les composants actifs des outils de coupe, ainsi que les matériaux utilisés pour leur fabrication, doivent posséder des caractéristiques spécifiques. Un excellent niveau de résistance au frottement mécanique - résistance à l'usure.

Les outils de coupe doivent posséder plusieurs caractéristiques essentielles pour leur efficacité

- Une solidité face aux chocs, aussi appelée ténacité.
- Une résistance solide à la pénétration, connue sous le nom de dureté.
- Une excellente résistance à la chaleur pour maintenir ces caractéristiques à des températures élevées, comme la dureté à chaud.
- Une résistance adéquate à la pression.
- Une résistance chimique élevée face au matériau fabriqué et à l'environnement (air, liquide de coupe, etc.).
- Une résistance limitée au matériau fabriqué sous haute pression et haute température.
- Un coût abordable pour l'achat et la mise en forme, ainsi qu'une grande variété d'options de composition.
- Divers matériaux sont utilisés dans la production des outils de tournage pour répondre à ces exigences.

II.4.1. Les aciers rapides supérieurs

L'acier rapide (AR), ou ARS pour "acier rapide supérieur", désigne les aciers d'outils qui conservent leur trempe à des températures élevées. Principalement utilisés pour des opérations de coupe à haute vitesse, tels que le perçage rapide (forets...), ces aciers sont désignés en anglais par l'abréviation HSS pour "High Speed Steel" [28]. En général, les aciers rapides sont privilégiés en raison de leur grande dureté (> 60 HRC) et de leur résistance acceptable, caractéristique d'un matériau capable de résister à la propagation des fissures. Ils présentent généralement une forte résistance à l'usure grâce à leur alliage solide et à la présence significative d'éléments formant des carbures durs, comme le tungstène et le vanadium [28]



Figure II.09 : Outils de tournage en HSS

II.4.2. Les Carbures Métalliques

Les carbures coupants, formés par l'alliage de tungstène et de titane, liés par du cobalt, incarnent une robustesse inégalée.

Leur résistance à la chaleur, marquée par un indice de dureté de 70 HR à 800°C, défie toute tentative de réduction. Cette caractéristique singulière ouvre les portes à des vitesses de coupe vertigineuses, surpassant de loin les capacités des aciers conventionnels. Comparativement, ils surpassent les aciers rapides quatre fois et les aciers au carbone seize fois en termes de vitesse.

Cependant, cette remarquable dureté des carbures s'accompagne d'une certaine fragilité, rendant leur affûtage ardu et laborieux. Ce défi technique n'est pas insurmontable pour les experts, mais il impose des contraintes qui orientent leur utilisation vers des tâches spécifiques. Ainsi, les carbures coupants excellent dans les opérations d'ébauche et de finition, où ils permettent des vitesses de coupe variant généralement de 50 à 200 m/min.



Figure II.10 : Outils tournage en CARBURES

II.4.3. Outils à carbure brasé

Ces outils sont dotés d'un corps en acier conventionnel, surmonté d'une plaquette en carbure brasée. Leur polyvalence les destine aussi bien à la haute vitesse de coupe qu'aux opérations de finition. Leur ajustabilité permet de les adapter aux besoins spécifiques de l'usinage et au niveau de finition requis. Cette configuration offre également une protection à la plaquette en carbure, vulnérable aux chocs, ce qui peut significativement prolonger sa durée de vie. [28].



Figure II.11 : Outils à carbure brasé

II.4.4. Outils à plaquettes carbures

Les carbures, résultant de l'alliage de cobalt et de divers carbures via le processus de frittage, conservent leur solidité même à des températures extrêmes. Leur capacité à maintenir des vitesses de coupe élevées, atteignant jusqu'à 200 mètres par minute, en fait des alliés précieux dans l'usinage.

Pour travailler des matériaux d'une dureté remarquable, les outils adoptent souvent un angle d'affûtage négatif, similaire à celui des plaquettes brasées. Ce choix d'angle vise à optimiser la

performance de coupe. De plus, les plaquettes présentent généralement trois ou quatre arêtes de coupe sur chaque face, offrant une polyvalence appréciable dans diverses situations d'usinage.

Un autre avantage significatif réside dans la précision du système de fixation, permettant de pivoter la plaquette sur son support sans nécessiter de réajustement par rapport à la pièce en cours d'usinage. Cette facilité de réglage contribue à accroître l'efficacité et la précision de l'ensemble du processus. [28].

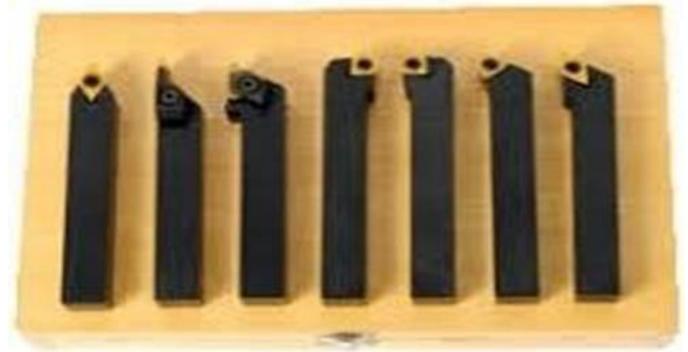


Figure II.12 : Outils à plaquettes carbures

II.4.5. Les céramiques Techniques

Ces composés constituent des oxydes d'alumine d'une dureté exceptionnelle, agglomérés avec des oxydes de chrome comme agent liant, puis frittés à une température atteignant 1800°C. Les carbures rivaux affichent une remarquable dureté naturelle à chaud de 82 HR, sans générer de copeaux sur l'outil, ce qui permet des vitesses de coupe élevées allant de 100 à 800 mètres par minute. Toutefois, leur sensibilité aux chocs et aux vibrations représente un défi notable.

Le brasage des plaquettes en céramique s'avère impossible, nécessitant ainsi un ajustement et une fixation précis sur le corps de l'outil. Bien qu'elles ne puissent être réaffûtées, ces plaquettes céramiques offrent, à l'instar des carbures, une variété d'options de coupe pour une utilisation régulière. [28].



Figure II.13 : Les céramiques

II.4.6. Les diamants industriels

L'emploi de diamants industriels, enchâssés à l'extrémité d'une tige en acier, révolutionne l'usinage du cuivre, du bronze et de l'aluminium. Grâce à cette configuration, les machines peuvent fonctionner à des vitesses de rotation vertigineuses, tandis que l'avance est maintenue à un niveau bas. Le résultat ? Une surface d'une finesse exceptionnelle, presque aussi lisse qu'un miroir. Ce procédé ouvre de nouvelles perspectives

dans l'industrie, offrant des possibilités jusqu'alors inédites en termes de finition et de précision. [28].



Figure II.14 : Les diamants industriels

II.5. Outils et opérations de fraisage : (les fraises)

La fabrication de pièces prismatiques complexes à partir d'une pièce brute requiert l'utilisation de fraises pour enlever la matière par un mouvement rotatif.

Un éventail de choix s'offre en termes d'outils de fraisage, adaptés à différentes applications :

- Les fraises à surfacer : idéales pour obtenir des surfaces planes et lisses.
- Les fraises à rainurer : utilisées pour créer des rainures et des cannelures.
- Les fraises à queue d'aronde : spécialement conçues pour usiner des queues d'aronde et des assemblages similaires.
- Les fraises à chanfreiner : destinées à réaliser des chanfreins et des angles biseautés.
- Les fraises à fileter : essentielles pour tailler des filets et des pas de vis.
- Les fraises hélicoïdales : employées pour réaliser des coupes en spirale ou hélicoïdales.

Chaque type d'outil offre des caractéristiques uniques, permettant de répondre aux besoins spécifiques de chaque opération de fraisage, et contribue ainsi à la fabrication précise et efficace de pièces prismatiques complexes.

Pour fabriquer des pièces prismatiques complexes à partir d'une pièce brute, on utilise des fraises pour retirer la matière en effectuant un mouvement de rotation. [27].

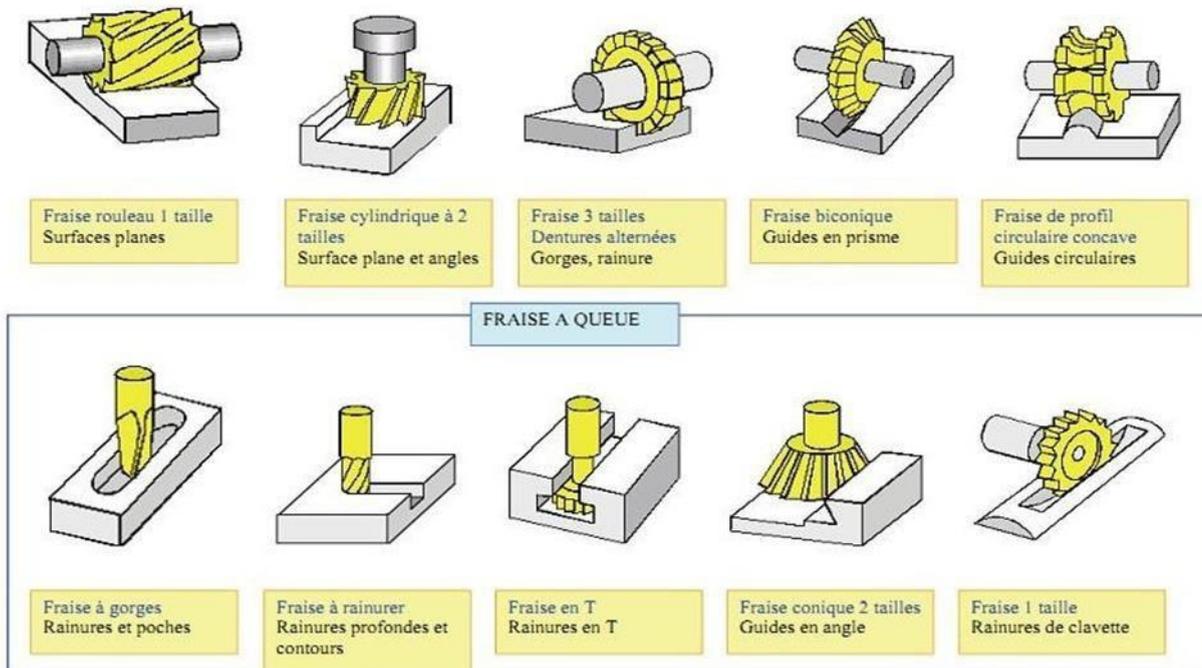


Figure II.15 : Outils et Opérations de fraisage

II.6. Les outils de coupe perçage

Les outils de perçage sont tous constitués d'une machine tournante (généralement un moteur, mais parfois une manivelle pour le perçage à main, voire autrefois une corde enroulée autour de l'axe des scies à arc), d'un système de couplage (mandrin), et d'un outil de découpe, le tout pouvant être à la fois libre (outil portatif) ou fixé à un bâti avec des accessoires (par exemple sur une perceuse à colonne ou sur un tour). Pendant la majorité des cas, la pièce à percer est fixée et l'outil est mobile, mais il est possible de fixer le foret et de faire tourner la pièce, comme pour des perçages concentriques au tour, par exemple. [27] [29]



Figure II.16 : Des forets en HSS



Figure II. 17 Des forets en carbure

Conclusion

Les outils de coupe jouent un rôle central dans les processus d'usinage, leur sélection étant cruciale pour assurer des performances optimales. Les caractéristiques telles que la dureté, la ténacité, la neutralité chimique, la stabilité thermique et la résistance aux variations thermiques sont fondamentales dans le choix des matériaux de coupe.

Disponibles dans une multitude de formes, géométries, matériaux et revêtements, les outils de coupe sont utilisés pour le tournage, le fraisage, le perçage et d'autres opérations. Tous ces outils sont dotés d'une partie active qui permet d'extraire les copeaux, tandis que des critères comme la pression d'exécution, la précision dimensionnelle, la qualité de surface et l'efficacité sont essentiels pour garantir des performances optimales.

Les instruments de coupe se composent du corps, de la partie active avec la face de coupe, les faces en dépouille et les arêtes tranchantes, ainsi que du bec. Les plans de référence, de coupe, de travail et de recul, ainsi que les angles associés, définissent la géométrie de l'outil, influençant directement sa performance et les résultats obtenus.

En somme, le choix approprié des outils de coupe et la gestion de leur usure sont des éléments fondamentaux pour assurer le succès des opérations d'usinage. Une compréhension approfondie des caractéristiques des matériaux de coupe, de la structure des outils et des phénomènes d'usure est indispensable pour améliorer les performances et obtenir des résultats de qualité supérieure dans les processus industriels.

CHAPITRE III

Usure et paramètres de coupe en usinage

III.1. Définition de l'usure

L'usure désigne la dégradation progressive des outils de coupe utilisés lors de l'usinage, dont le but est de retirer des matériaux d'une pièce brute pour l'ajuster à des dimensions et des formes précises. Plusieurs facteurs peuvent provoquer cette usure :

- **Frottement** : Le contact entre l'outil et le matériau usiné génère une friction, entraînant une usure progressive de l'outil.
- **Température** : La chaleur produite pendant l'usinage peut accélérer l'usure des outils, qui peuvent se déformer ou se détériorer sous l'effet des températures élevées.
- **Abrasion** : Certains matériaux, comme les métaux durs, peuvent causer une abrasion significative des outils de coupe.
- **Adhérence** : Des particules du matériau usiné peuvent adhérer à la surface de l'outil, augmentant ainsi son usure.
- **Impact des copeaux** : Les copeaux produits durant l'usinage peuvent endommager les arêtes de coupe de l'outil, provoquant une usure prématurée.

III.2. Modes d'usure en usinage

III.2.1. Usure par abrasion

L'usure par abrasion est un phénomène causé par l'érosion progressive des matériaux en contact, résultant de forces de frottement répétées. Cela se produit souvent lorsque des particules dures ou des surfaces rugueuses sont présentes, ce qui intensifie le processus d'usure. Ce type de dégradation est fréquemment observé dans des équipements tels que les machines, les engrenages, les moteurs et les roulements, où les surfaces en mouvement sont constamment en contact les unes avec les autres.

L'abrasion se manifeste par la formation de rainures ou de stries sur la surface des matériaux, conduisant à une détérioration progressive de leurs propriétés fonctionnelles. Les particules abrasives, souvent des fragments de matériaux plus durs, pénètrent la surface de contact et arrachent des particules du matériau plus tendre, accélérant ainsi l'usure.

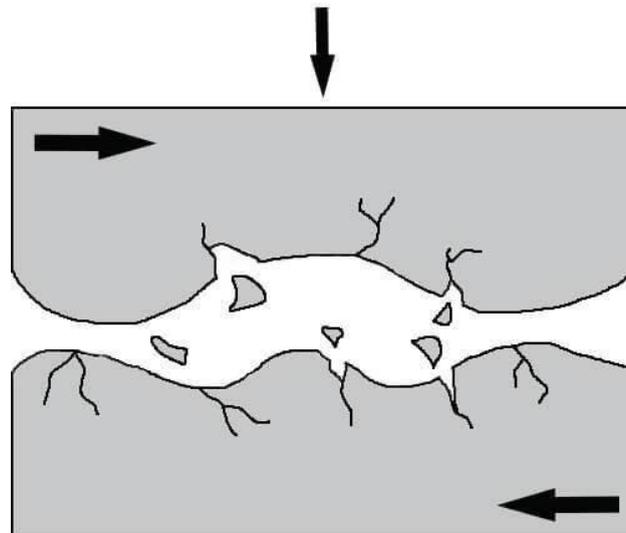


Figure III.01 : Processus d'usure par abrasion [35]

III.2.1. Usure par adhésion

Lorsque deux pièces en mouvement se frottent, elles peuvent détacher des fragments de matière et finir par se coller, provoquant ainsi une usure adhésive. Cela se produit souvent en cas de lubrification insuffisante ou de charges élevées et de mouvements fréquents. Les micro-aspérités des surfaces métalliques peuvent temporairement se souder sous l'effet de la pression et de la chaleur, laissant des traces après leur détachement, ce qui accroît l'usure.

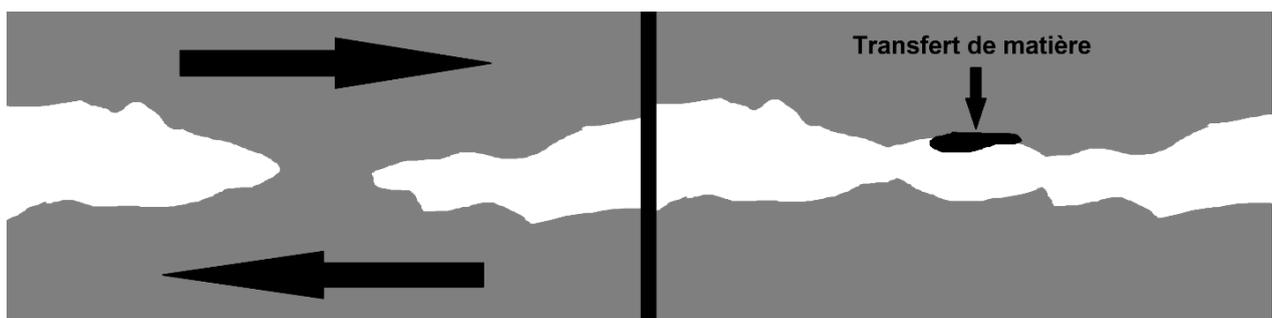


Figure III.02 : Approche de l'usure par adhésion

III.2.1. Usure par fissuration

L'usure par fissuration est un processus de dégradation des matériaux résultant de la formation et de la propagation de fissures. Ces fissures apparaissent sous l'effet de diverses contraintes, qu'elles soient mécaniques, thermiques, ou dues à des cycles répétés de charge et décharge. Les contraintes mécaniques peuvent inclure des forces de compression, de traction, et de flexion qui dépassent les limites d'élasticité du matériau. Les contraintes thermiques, quant à elles, sont souvent causées par des variations rapides de température, qui induisent des expansions et contractions différentielles au sein du matériau, générant ainsi des tensions internes.

Dans le domaine de l'usinage, les outils de coupe sont particulièrement vulnérables à ce type d'usure en raison des conditions de travail rigoureuses auxquelles ils sont soumis. Les forces de coupe élevées, nécessaires pour retirer de la matière, engendrent des contraintes mécaniques intenses qui peuvent provoquer l'apparition de fissures. De plus, les cycles thermiques rapides, dus à l'alternance de périodes de coupe et de non-coupe, peuvent causer des chocs thermiques, accentuant le phénomène de fissuration.

III.2.1. Usure par diffusion

L'usure par diffusion est un phénomène de dégradation des matériaux qui se produit lorsque des atomes migrent à la surface d'un matériau soumis à de hautes températures. Ce processus peut entraîner une diminution du matériau, des modifications de forme et des dommages structurels. L'usure par diffusion est particulièrement préoccupante dans les applications où les températures sont suffisamment élevées pour permettre aux atomes de se déplacer plus facilement.

Dans le cas des outils de coupe, l'usure par diffusion se manifeste lorsque les températures élevées et les contraintes mécaniques lors de l'usinage favorisent le déplacement des atomes entre l'outil et le matériau travaillé. Ce phénomène peut altérer la composition chimique de l'outil, réduisant sa dureté et sa résistance à l'usure. Par exemple, des éléments de l'outil peuvent diffuser dans le matériau usiné, ou inversement, des éléments du matériau usiné peuvent pénétrer dans l'outil, modifiant ses propriétés.

III.2.1. Usure par corrosion

Provoquée par une réaction chimique entre le matériau et des substances corrosives telles que l'eau, l'oxygène, les acides ou les bases. Les surfaces de coupe des outils, comme les forets, fraises et lames de scie, peuvent se détériorer en raison de cette réaction chimique.



Figure III.03 : Le phénomène d'usure par corrosion [36]

III.3. Influence des paramètres de coupe sur l'usure des outils de coupe

Les paramètres de coupe, comme la vitesse de coupe, l'avance par dent, la profondeur de coupe, la géométrie de l'outil et le matériau utilisé, influencent grandement la performance et la longévité des outils de coupe. Comprendre leur impact est crucial pour optimiser les processus d'usinage, améliorer l'efficacité de la production et prolonger la durée de vie des outils.

III.3.1. Vitesse de coupe

Symbolisée par V_c , elle représente la vitesse à laquelle l'outil de coupe retire la surface de la pièce. Elle est calculée par l'équation : $V_c = (\pi.D.N) / 1000$ (m/min)

Où :

D : le diamètre de la pièce

N : la fréquence de rotation.

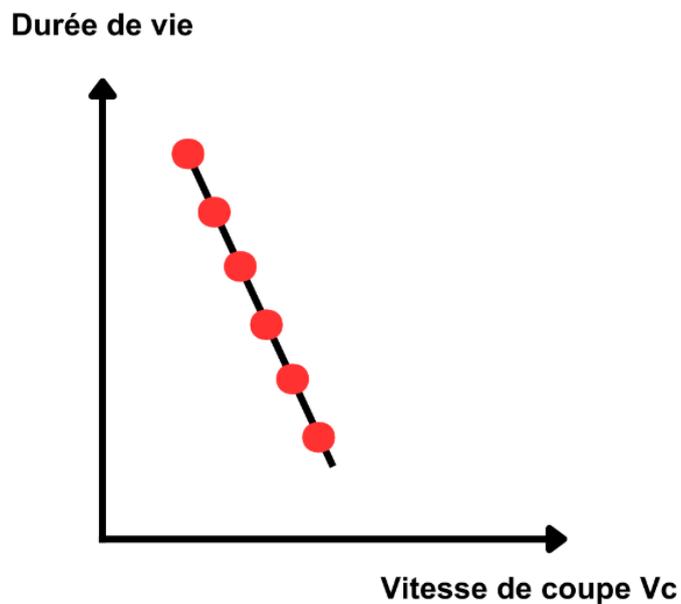


Figure III.04 : L'influence de la vitesse de coupe sur la durée de vie de l'outil

III.3.1. Avance f_z

Mesure de la distance parcourue par l'outil le long de la pièce à chaque rotation, influençant la force exercée sur l'outil et la qualité de la surface usinée. Une avance par dent élevée augmente l'usure de l'outil. La relation est donnée par : $V_f = f_z * N * Z$

Où :

V_f : Vitesse d'avance (mm/min).

f_z : Avance (mm/tr.dent).

N : Fréquence de rotation (tours par minute, tr/min).

Z : Nombre de dents de l'outil de coupe (unité sans dimension).

III.3.3 Profondeur de passe a_p

Quantité de matière enlevée à chaque passage de l'outil de coupe.

Une profondeur de passe trop élevée peut :

- surcharger l'outil
- provoquer des vibrations excessives
- Provoquer une mauvaise finition de la surface

tandis qu'une profondeur trop faible peut :

- prolonger l'usinage
- causer une usure prématurée.

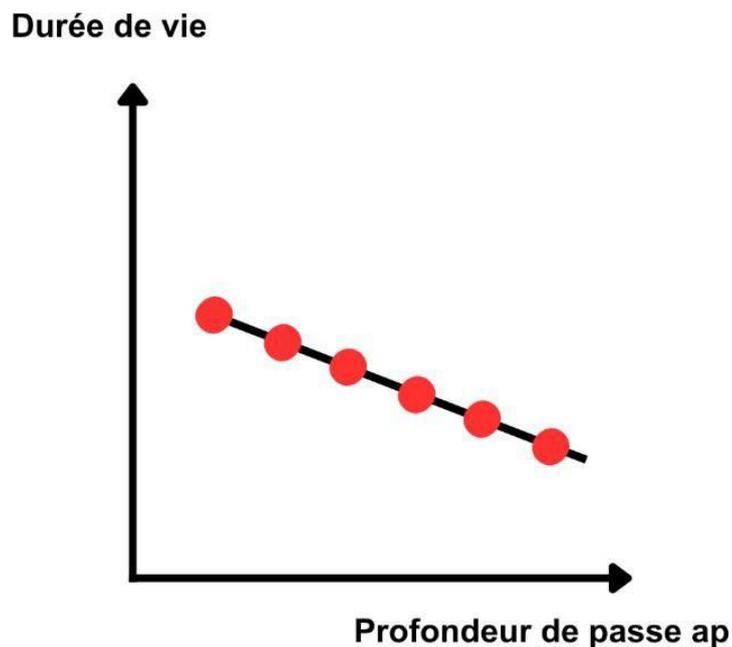


Figure III.05 : L'influence de la profondeur de coupe sur la durée de vie de l'outil

III.3.4. Matériau d'outil

Le choix du matériau de l'outil dépend de ses composants d'alliage, traitements thermiques, et dureté. Les pièces à usiner sont classées selon la norme ISO en six familles : aciers non alliés et faiblement alliés (ISO P), aciers à outils (ISO H), aciers inoxydables (ISO M), fontes (ISO K), métaux non ferreux (ISO N), et plastiques et composites (ISO S).

- **Aciers non alliés et faiblement alliés (ISO P)** Les aciers non alliés et faiblement alliés sont principalement composés de fer et de carbone, avec parfois de petites quantités d'autres éléments. Ils sont utilisés dans une variété d'applications nécessitant une résistance mécanique adéquate sans exigences spécifiques en termes de résistance à la corrosion ou de haute dureté.
- **Aciers à outils (ISO H)** Ces aciers sont conçus pour fabriquer des outils de coupe, d'emboutissage, de formage ou d'autres outils destinés à travailler les métaux. Ils sont caractérisés par une haute ténacité, une grande résistance à l'usure et à la chaleur, pour résister aux conditions de travail sévères.
- **Aciers inoxydables (ISO M)** Les aciers inoxydables contiennent du chrome, du nickel, du fer et du carbone, leur conférant une excellente résistance à la corrosion et une bonne ductilité. Ils sont utilisés dans des applications nécessitant une haute résistance à la corrosion, telles que les industries chimique, alimentaire et médicale.
- **Fontes (ISO K)** Les fontes sont principalement des alliages de fer contenant du carbone, du silicium et du manganèse. Selon leur composition et leurs propriétés mécaniques, elles peuvent être classées en fontes grises, ductiles ou blanches. Les fontes sont souvent employées pour des pièces nécessitant une bonne résistance à la compression et une bonne usinabilité.
- **Métaux non ferreux (ISO N)** Cette catégorie inclut divers métaux tels que l'aluminium, le cuivre, le zinc, le plomb et le titane. Ces métaux sont largement utilisés dans divers secteurs pour leurs caractéristiques uniques comme la légèreté, la conductivité électrique et la résistance à la corrosion.
- **Plastiques et composites (ISO S)** Cette famille regroupe une vaste gamme de matériaux polymères et composites, tels que les polyéthylènes, les polycarbonates et les fibres de verre renforcées. Ces matériaux sont largement employés dans de nombreuses industries pour leurs propriétés, notamment la légèreté, la résistance chimique et l'isolation électrique.

III.3.4. Lubrification

La lubrification réduit la friction entre deux surfaces en mouvement relatif en utilisant des lubrifiants tels que l'huile ou la graisse. Les liquides de coupe sont spécialement conçus pour assurer le refroidissement, la lubrification et l'évacuation efficaces des copeaux, améliorant ainsi la qualité et la productivité des processus de fabrication.

III.3.4.1. Types de Lubrifiants

- **Lubrifiants Solides** : Graphite, bisulfure de molybdène, disulfure de tungstène. Utilisés dans des conditions extrêmes.
- **Lubrifiants Liquides** : Huiles minérales, synthétiques, végétales. Fournissent une lubrification continue et s'adaptent à diverses conditions.
- **Lubrifiants Gazeux** : Air comprimé, gaz inertes. Employés où la lubrification liquide ou solide n'est pas pratique, comme dans des environnements propres.

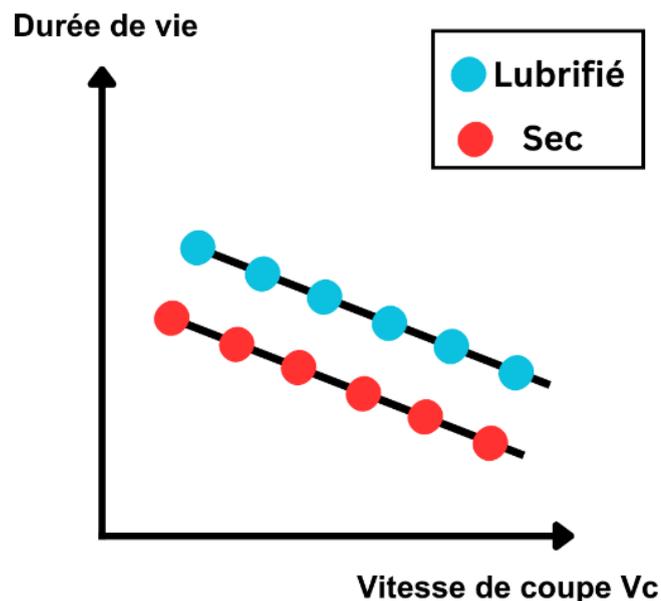


Figure III.06 : L'impact de la lubrification sur la durée de vie des outils

Conclusion

Ce chapitre a analysé les différents modes d'usure et leurs impacts sur la performance des outils de coupe. La gestion efficace de l'usure est cruciale pour la durabilité des outils et la qualité des pièces produites. Comprendre l'influence des paramètres de coupe permet d'optimiser les processus d'usinage, améliorer la productivité et réduire les coûts de fabrication.

CHAPITRE IV

Simulations et Résultats

IV.1. Méthode des éléments finis

La méthode des volumes finis est une technique numérique largement utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles qui modélisent des phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, l'écoulement des fluides, la diffusion, etc. En termes simples, cette méthode découpe le domaine de calcul en petits volumes finis, puis résout les équations physiques à l'intérieur de chaque volume. Elle se distingue par l'intégration numérique des équations de conservation sur chaque volume élémentaire, prenant en compte les flux entrants et sortants à travers les surfaces des volumes. Cela permet une approche précise de la modélisation des phénomènes physiques tout en maintenant une bonne conservation des propriétés (comme la masse, l'énergie, la quantité de mouvement, etc.) à travers le domaine. En résumé, la méthode des volumes finis offre une approche robuste et flexible pour simuler divers phénomènes physiques en découpant le domaine en volumes discrets et en résolvant les équations appropriées sur chaque volume.

IV.2. La coupe orthogonale élastoplastique

La coupe orthogonale élastoplastique est un concept utilisé dans le domaine de la mécanique des solides pour décrire le comportement d'un matériau lorsqu'il est soumis à des charges importantes. Lorsqu'un matériau subit des contraintes importantes, notamment près de sa limite d'élasticité, il peut entrer dans un régime de déformation plastique, où il subit des déformations permanentes même après la libération des contraintes. Dans le cas d'une coupe orthogonale élastoplastique, on suppose que le matériau reste élastique dans la direction perpendiculaire à la direction de chargement principale, tandis qu'il subit une déformation plastique dans la direction de chargement principale.

IV.3. Approche Lagrangienne

Dans cette approche, on suit le mouvement en suivant chaque particule individuellement. Cela signifie que chaque particule est associée à ses propres coordonnées dans l'espace et dans le temps. Ainsi, les équations du mouvement sont formulées en fonction de ces coordonnées particulières. Cette approche est souvent utile pour décrire des systèmes où le

mouvement des particules individuelles est important, par exemple dans la dynamique des fluides où l'on suit le mouvement d'un élément de fluide donné.

IV.4. Approche Eulérienne

Contrairement à l'approche Lagrangienne, l'approche Eulérienne consiste à observer le mouvement à des points fixes de l'espace, enregistrant ainsi les variations dans l'espace et le temps. Au lieu de suivre le mouvement des particules individuelles, on étudie comment les propriétés physiques (comme la densité, la vitesse, etc.) changent en fonction de la position et du temps dans un système donné. Cette approche est souvent utilisée pour décrire le comportement global d'un fluide ou d'un matériau, et elle est couramment utilisée dans les simulations numériques.

IV.5. Logiciel DEFORM-2D

Pour notre projet, nous avons utilisé le logiciel DEFORM-2D, un outil professionnel réputé, pour effectuer des calculs numériques. En ingénierie, la méthode des éléments finis est largement utilisée pour cette simulation. Plus précisément, elle fait partie de la formulation lagrangienne, une méthode fondamentale pour modéliser le comportement des matériaux déformables.

IV.6. La simulation sur DEFORM-2D

IV.6.1. Modélisation de l'outil de coupe

La modélisation de l'outil de coupe est réalisée en utilisant une génération de maillage comprenant 115 éléments et 136 nœuds. Le maillage est réparti de manière quadratique. Appliqué uniformément à toute la surface de l'outil, mais avec une plus grande densité de maillage appliquée sur la face d'attaque de l'outil pour obtenir des résultats plus précis.

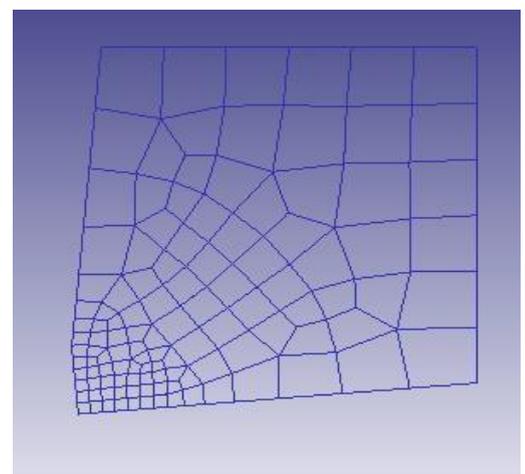


Figure IV.O1 : Maillage initial de l'outil de coupe

IV.6.2 Modélisation de la pièce à usiner

Dans notre cas :

Aucune déformation élastique n'est prise en compte pour la pièce lors de l'analyse.

Les seuls éléments pris en compte sont les comportements plastiques.

Il y a un total de 676 éléments de type quadrilatéral dans le maillage des éléments finis.

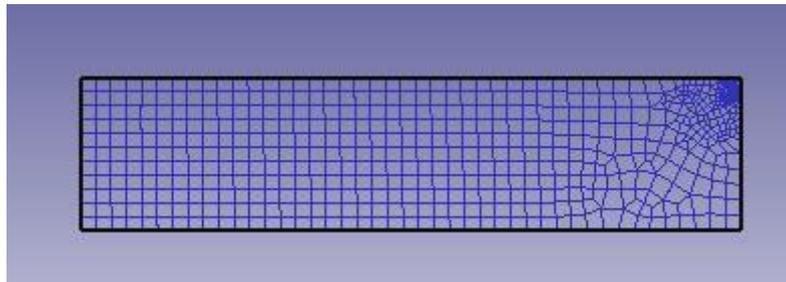


Figure IV.O2 : Maillage initial de la pièce

IV.6.3 Matières utilisées

- Pour l'outil de coupe on utilise le carbure de tungstène (WC) ce qui est un matériau largement utilisé dans les outils de coupe en raison de ses propriétés exceptionnelles.
- Pour la pièce on utilise l'Inconel 718 ce qui est un superalliage à base de nickel, réputé pour sa résistance exceptionnelle à la chaleur, à la corrosion et à l'oxydation, ce qui en fait un matériau de choix pour les applications exigeantes. Composé principalement de nickel et de chrome, avec des ajouts de fer, de niobium, de molybdène, de titane et d'aluminium, il conserve sa résistance mécanique et sa stabilité structurelle jusqu'à environ 700°C. Ses excellentes propriétés mécaniques, incluant une haute résistance à la traction, à la fatigue et au fluage, sont particulièrement valorisées dans les secteurs aéronautiques, spatial et industriel.

La vitesse de coupe pour l'usinage de l'Inconel 718 peut varier considérablement en fonction des outils et des techniques utilisées. Bien que des vitesses de coupe typiques se situent entre 20 et 45 m/min pour les outils en carbure cémenté, des vitesses beaucoup plus élevées, dépassant 600 m/min, sont possibles avec des technologies avancées telles que l'usinage à haute vitesse (HSM) et l'utilisation d'outils de coupe en céramique ou en CBN. [37]

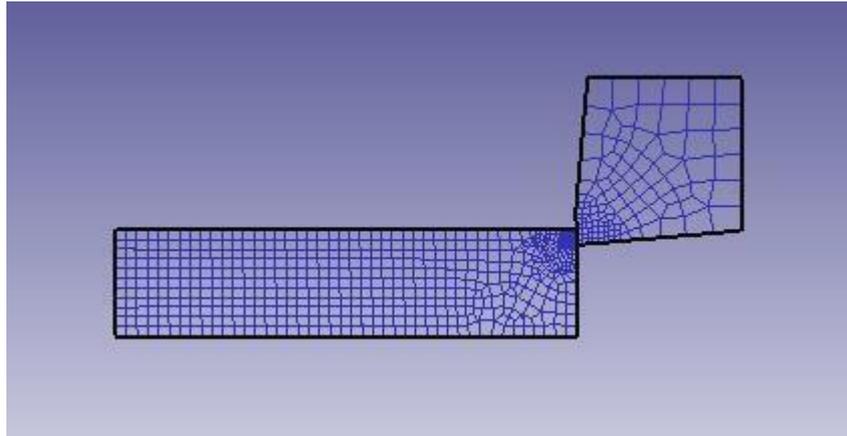


Figure IV.O3 : Le positionnement Outil-Pièce durant l'usinage

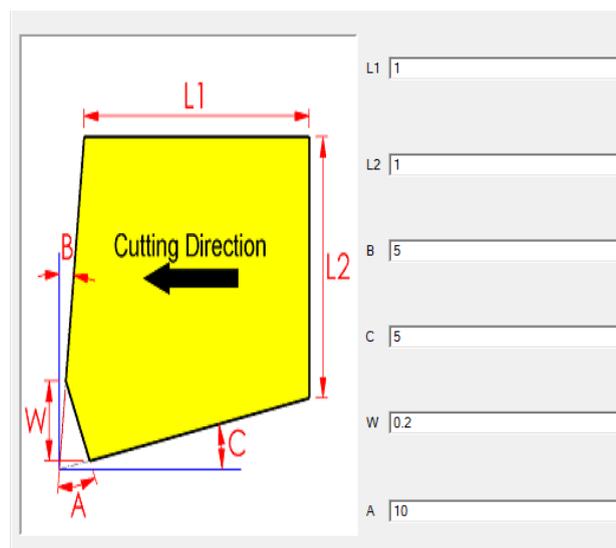


Figure IV.O 4 La géométrie de l'outil de coupe utilisé

IV.7. Les modèles de calculs utilisés :

IV.7.1. Modèle d'Usui :

Ce modèle est largement utilisé pour prédire l'usure des outils dans les processus de coupe des métaux. Il prend en compte des paramètres tels que la pression de contact, la vitesse de glissement et la température. La formule générale du modèle d'Usui est : $W = K \int P V^m e^{-(Q/RT)} dt$

Où :

W : L'usure

K : Constante de matériau

P : Pression de contact

V : Vitesse de glissement

m : Un exposant

Q : Energie d'activation

R : Constante des gaz parfaits

T : Température absolue

IV.7.2. Modèle d'Archard :

Ce modèle est également utilisé pour prédire l'usure et est basé sur le volume d'usure proportionnel à la force normale et à la distance de glissement. La formule générale du modèle d'Archard est : $W = KFL/H$

Où :

W : Volume d'usure

K : Facteur de proportionnalité

F : Force normale

L : Distance de glissement

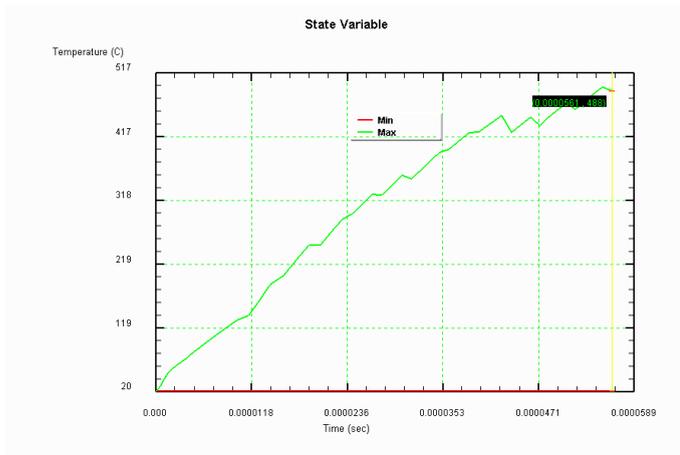
H : Dureté du matériau.

IV.8. Résultats

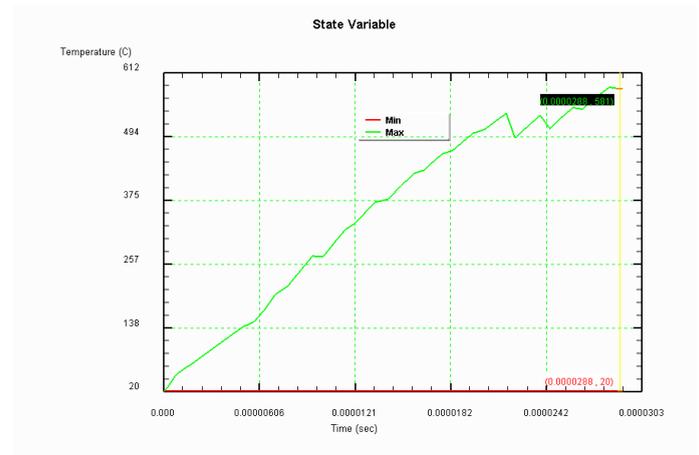
IV.8.1. L'influence de la vitesse de coupe sur la température de contact

TmpEnv (c°)	f (mm/tr)	Long.coupe (mm)	Vc 1 (m/min)	Vc 2 (m/min)	Vc 3 (m/min)	Vc 4 (m/min)	Vc 5 (m/min)	Vc 6 (m/min)
20	0.1	1.5	100	200	300	400	500	600

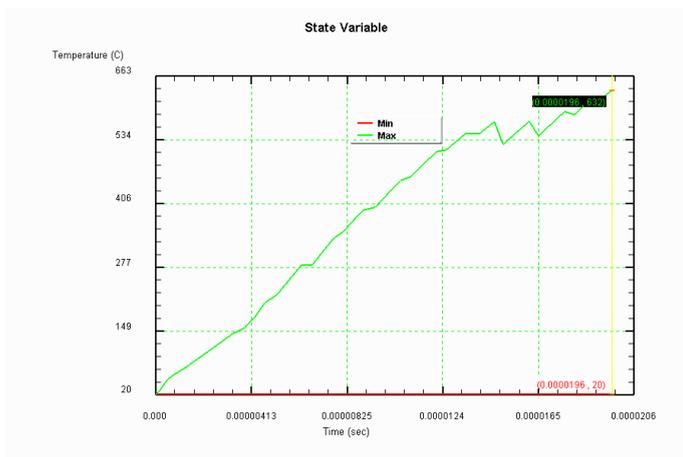
Tableau 1 : Différentes vitesses de coupe



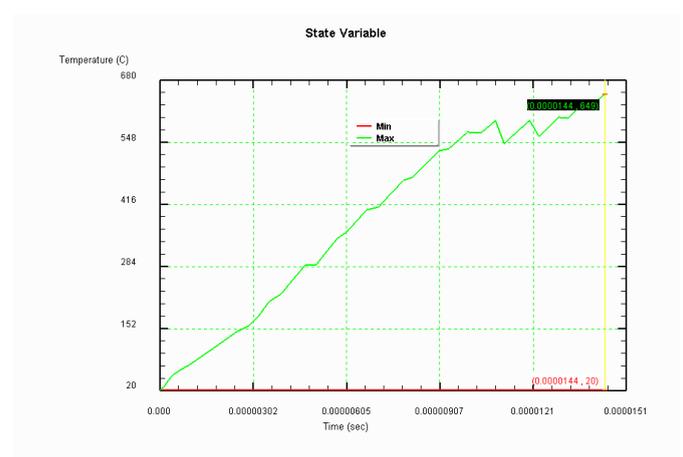
Vc = 100 m/min



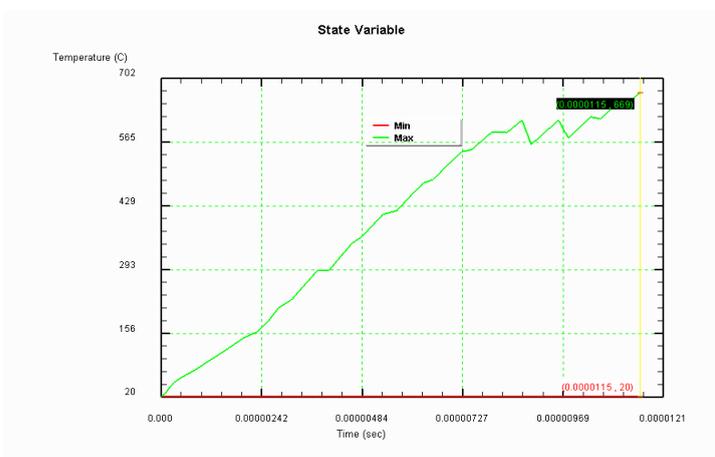
Vc = 200 m/min



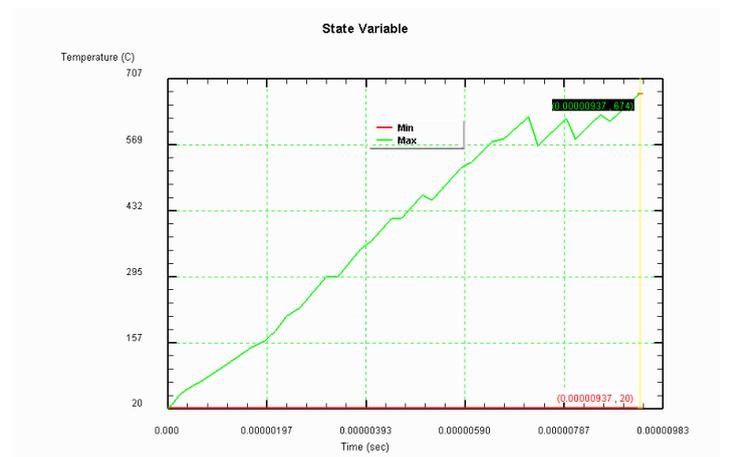
Vc = 300 m/min



Vc = 400 m/min



Vc = 500 m/min



Vc = 600 m/min

Figure IV.O5 : Température de contact en fonction du temps pour les différentes vitesses

On remarque que l'augmentation de la température de contact augmente quand la vitesse de coupe augmente, pour cela on peut prendre un instant pour étudier la température de contact en fonction de la vitesse de coupe V_c .

Cela nous donne ce graphe :

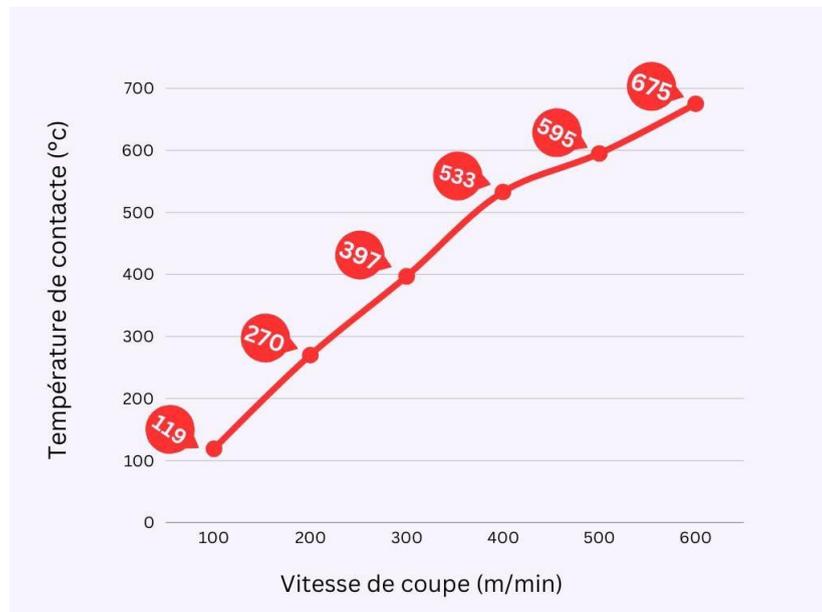


Figure IV.O6 : Température de contact en fonction de la vitesse de coupe

On observe que la vitesse de coupe a une influence majeure sur la température de contact donc la température de contact a une relation de corrélation directe avec la vitesse de coupe.

IV.8.2. L'influence de la vitesse de coupe sur l'usure de l'outil de coupe

Pour les mêmes valeurs du **Tableau 1** on obtient la figure IV.O 7

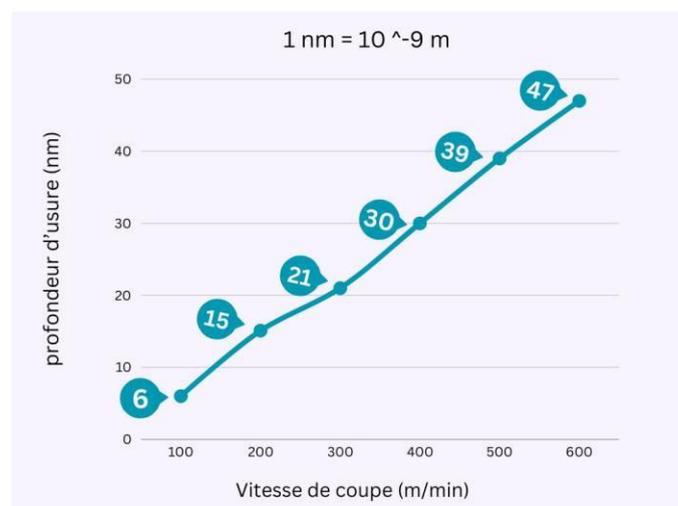


Figure IV.O7 : Variation de la profondeur d'usure en fonction de la vitesse de coupe

On observe que la vitesse de coupe a aussi une influence majeure sur la profondeur d'usure donc la profondeur d'usure a une relation de corrélation directe avec la vitesse de coupe.

On remarque que la proportion de l'augmentation est presque fixe.

IV.8.3. L'influence de la vitesse d'avance sur l'usure de l'outil de coupe

TmpEnv (c°)	Vc (m/min)	Long.coupe (mm)	f 1 (mm/tr)	f 2 (mm/tr)	f 3 (mm/tr)	f 4 (mm/tr)	f 5 (mm/tr)	f 6 (mm/tr)
20	200	0.5	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15

Tableau 2 : Différentes vitesses d'avance

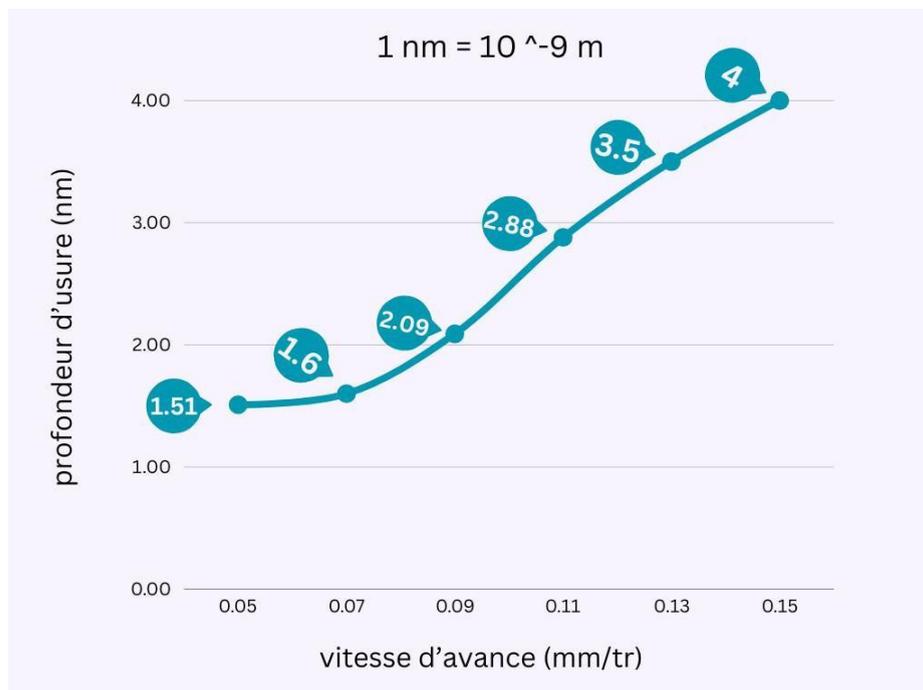


Figure IV.08 : L'influence de la vitesse d'avance sur l'usure de l'outil de coupe

On observe que la vitesse d'avance a une influence majeure sur la profondeur d'usure donc la profondeur d'usure a une relation de corrélation directe avec la vitesse d'avance.

IV.8.4. L'influence de Profondeur de passe ap sur l'usure de l'outil de coupe

TmpEnv (c°)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap 1 (mm)	ap 2 (mm)	ap 3 (mm)	ap 4 (mm)	ap 5 (mm)	ap 6 (mm)
20	100	0.1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tableau 3 : Différentes Profondeurs de passe

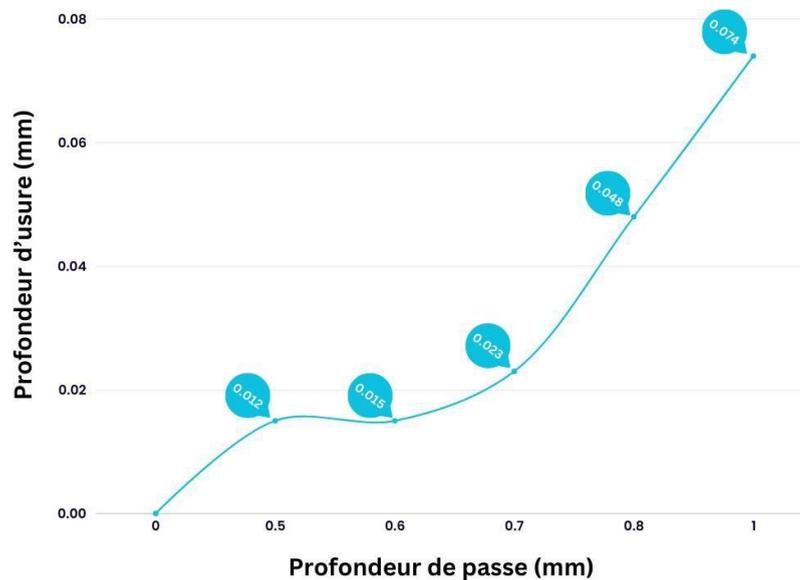


Figure IV.O9 : L'influence de Profondeur de passe ap sur l'usure de l'outil de coupe

On observe que la profondeur de passe a une influence majeure sur la profondeur d'usure donc la profondeur d'usure a une relation de corrélation directe avec la profondeur de passe.

VI.8.5. L'influence des différentes vitesses de coupe et vitesses d'avance sur l'usure

TmpEnv (c°)	f (mm/tr)	Long.coupe (mm)	Vc 1 (m/min)	Vc 2 (m/min)	Vc 3 (m/min)	Vc 4 (m/min)	Vc 5 (m/min)
20	0.05	1.5	100	200	300	400	500
20	0.07	1.5	100	200	300	400	500
20	0.09	1.5	100	200	300	400	500
20	0.11	1.5	100	200	300	400	500

Tableau 4 : Différentes vitesses de coupe et vitesses d'avance

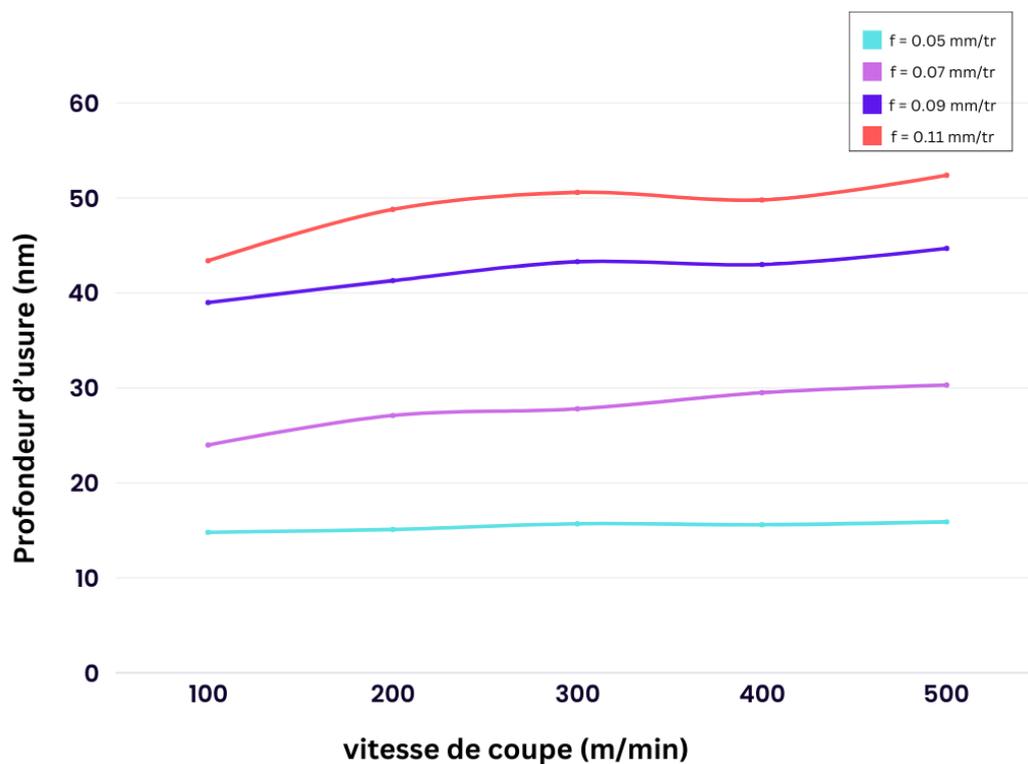


Figure IV.10 : L'influence des différentes vitesses de coupe et vitesses d'avance sur l'usure

IV.8.5.1 Profondeur d'usure et Vitesse de coupe (V_c)

- **Augmentation initiale de l'usure** : À de faibles vitesses de coupe, la profondeur d'usure augmente rapidement pour toutes les vitesses d'avance.
- **Stabilisation de l'usure** : Pour des vitesses de coupe plus élevées (entre 100 m/min et 300 m/min), la profondeur d'usure se stabilise ou augmente légèrement.
- **Usure élevée à haute vitesse de coupe** : Pour des vitesses de coupe au-delà de 300 m/min, la profondeur d'usure tend à augmenter à nouveau, particulièrement pour des vitesses d'avance plus élevées.

IV.8.5.2 Profondeur d'usure et Vitesse d'avance (f)

- **$f = 0.05$ mm/tr** : Montre la plus faible profondeur d'usure, même à des vitesses de coupe élevées, indiquant que c'est la vitesse d'avance optimale pour minimiser l'usure des outils.
- **$f = 0.07$ mm/tr et $f = 0.09$ mm/tr** : L'usure des outils augmente de manière significative avec la vitesse de coupe, mais montre une certaine stabilisation à des vitesses de coupe intermédiaires.
- **$f = 0.11$ mm/tr** : Présente la plus grande profondeur d'usure à toutes les vitesses de coupe, indiquant que des vitesses d'avance plus élevées entraînent une usure accélérée des outils.

Donc, pour minimiser la profondeur d'usure des outils lors du tournage de l'Inconel 718

- **Vitesse de coupe (V_c)** : Une plage de vitesse de coupe optimale se situe entre **100 m/min et 200 m/min**. Cette plage permet de réduire l'usure tout en maintenant une efficacité de production.
- **Vitesse d'avance (f)** : Une petite vitesse d'avance de **0.05 mm/tr** est la plus efficace pour réduire l'usure des outils. Cette vitesse d'avance doit être privilégiée pour les applications où la durée de vie de l'outil est cruciale.

Conclusion

En se servant du logiciel de simulation DEFORM-2D, il est possible d'examiner comment la vitesse de coupe V_c affecte la température de contact et la profondeur d'usure dans divers scénarios.

Il est aussi possible d'examiner comment la vitesse d'avance f et la profondeur de coupe a_p affecte la profondeur d'usure.

Pour conclure, la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe ont une relation directe avec la profondeur d'usure et pour minimiser la profondeur d'usure des outils on doit choisir des vitesses optimales.

Bibliographie

- [1] GARA Souhir, «Cours interactif : Le tournage,» 2015/2016. [En ligne]. Disponible: <https://www.technologuepro.com/cours-tournage-fraisage/tournage.pdf>.
- [2] GARA Souhir, «Cours interactif : Le Fraisage,» 2015/2016. [En ligne]. Disponible: <https://www.technologuepro.com/cours-tournage-fraisage/fraisage.pdf>.
- [3] TILBI Hamza, «INFLUENCE DE L'USURE DES OUTILS DE COUPE SUR LA QUALITÉ,» UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA, 2019/2020.
- [4] «Fraisage,» [En ligne]. Disponible: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fraisage>.
- [5] «Allied-material,» [En ligne]. Disponible: <https://www.allied-material.co.jp/products/diamond/knowledge/cutting.html>.
- [6] «Le tournage,» [En ligne]. Disponible: <https://fabrication1.blogspot.com/2013/07/le-tournage.html>.
- [7] [En ligne]. Disponible: <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Laengsrunddrehen.jpg>.
- [8] «Fiche de Connaissances,» [En ligne]. Disponible: <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/5514/5514-ressources-usinage-par-enlevement-de-matiere.pdf>.
- [9] «What different types of bevels exist for tube-tube assemblies?,» [En ligne]. Disponible: <https://www.axxair.com/en/blog/topic/orbital-beveling>.
- [10] «Les principales opérations d'usinage,» [En ligne]. Disponible: https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/res/F2_Les_usinages.pdf.
- [11] «Filetage extérieur,» [En ligne]. Disponible: <https://www.schwanog.com/fr/applications-et-solutions/usinage-de-filetages/filetage-exterieur>.
- [12] Université Lille, «Les définitions des principales opérations de tournage,» [En ligne]. Disponible : https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/chapitre_2_4_1_1.html.

- [13] «Alésage,» [En ligne]. Disponible : <http://www.usinage.wikibis.com/alesage.php>.
- [14] «Form Tapping,» [En ligne]. Disponible: <https://www.manufacturingguide.com/en/form-tapping>.
- [15] «LE FRAISAGE,» [En ligne]. Disponible : <https://notech.franceserv.com/fraisage.html>
- [16] «Fraisage surfacage,» [En ligne]. Disponible :
https://fr.m.wikiversity.org/wiki/Fichier:Fraisage_surfacage.svg
- [17] Université Lille, «Les outils de fraisage,» 2014. [En ligne]. Disponible: https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/chapitre_2_4_2_4.html.
- [18] [En ligne]. Disponible: <http://e-learning.univ-tebessa.dz/moodle>.
- [19] Jimmy Allen, [En ligne]. Disponible: https://www.linkedin.com/posts/jimmy-allen-9b291835_steel-engineering-bestpractices-activity-6699027983044292608-N3qX?trk=public_profile.
- [20] [En ligne]. Disponible: <https://dz.kompass.com/p/techno-num-eurl/dz272602/forgeage-a-chaud-et-a-froid-presse-400-tonnes/2941a458-3c08-40df-9c44-eec8e4a0a696/>.
- [21] [En ligne]. Disponible: <https://www.iqsdirectory.com/articles/metal-stamping/die-stamping.html>.
- [22] [En ligne]. Disponible: http://etuly.com/cours/grand_page.php?cours=4&pages=1&partie=8.
- [23] [En ligne]. Disponible:
https://ar.m.wikipedia.org/wiki/%D9%85%D9%84%D9%81:Laminage_schema_gene.svg.
- [24] [En ligne]. Disponible: <https://www.lasertec.fr/blog/focus-sur-la-decoupe-laser>.
- [25] [En ligne]. Disponible: <https://www.scopex.fr/produits/decoupe-abrasive-jet-eau-mace-700/>.
- [26] [En ligne]. Disponible: <https://www.3dprint.fr/petite-serie/tolerie/>.

- [27] Souhir Gara. "Productique procédés d'usinage Tournage Fraisage Perçage Rectification". Ellipses, 2014, Tunisia
- [28] B.Claude, P.Barlier. "Mémotech - Génie mécanique". Educalivre, 2003, Fr.
- [29] Daniel Kremer. "L'usinage par ultrasons". Article Techniques de l'Ingénieur, traité BM 7 240 Génie mécanique, 1998 , Fr.
- [30] É. Felder. " Procédés d'usinage "Article de Technique de l'ingénieur. traité B7000, 1997 , Fr.
- [31] Daniel Spenlé et Robert Gourhant. "Guide du calcul en mécanique : Maîtriser: Hachette Technique 2003, Fr.
- [32] R. Laheurte. "Application de la théorie de seconde gradient à la coupe des matériaux". Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2004, Fr.
- [33] M. Makhloufi. "Métrologie 02 Institut des Sciences et des Techniques Appliquées". Mémoire de Mestre , Université des Frères Mentouri Constantine 1, 2016 , Dz.
- [34] Malal Kane. "Contribution à l'étude de l'influence de la rugosité et des effets non newtoniens dans les contacts sévères lubrifiés". Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2003 , Fr.
- [35] «What is abrasive wear?,» [En ligne]. Disponible : <https://addinol.de/en/service-en/expert-tip/abrasive-wear/>.
- [36] «La corrosion électrolytique,» [En ligne]. Disponible : <https://www.gallais.expert/la-corrosion-electrolytique>.
- [37] A. D. J. I. S. J. J. M. Rodríguez, «High-speed machining of Inconel 718 using ceramic tools,» Journal of Materials Processing Technology, 2020.

