



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option: Fabrication mécanique et productique

Présenté par :

BENSEHIL Souheil

Thème

**CONCEPTION ET REALISATION
D'UN OUTIL DE MOLETAGE**

Devant le jury composé de:

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Dr. Makri Houcine	Pr	Président
Dr. Belhocine Abdelghani	MCB	Encadrant
Dr. Arslane Mustapha	MCB	Examinateur

Année Universitaire : 2024 / 2025

N° d'ordre : GM/...../2025

Remercîment

"**نَحْمَدُ اللَّهَ الْعَلِيَّ الْعَظِيمَ الَّذِي سَخَّرَ لَنَا هَذَا وَمَا كَانَ لَهُ مُقْرَنٌ**"

Toute gratitude et Merci à Allah tout-puissant pour l'achèvement
de ce travail.

Nous remercions notre Encadreur, Dr.BelhocineAbdelghani , pour
son assistant à l'Universitéde M'sila.

Pour orienter, à sa patience, et à son expérience qui a une
contributionSignificative à ce travail, et pour nous guider vers
labonne voie.

Une salutation spéciale à son personnage.

A tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin,
J'exprime ici notre sincère gratitude et merci à eux ... Merci.

BensehilSouheil

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail aux personnes les plus exceptionnels qui existent dans le monde, nos chers parents en reconnaissance du soutien moral, matériel et la patience dont ils ont fait preuve qu'ALLAH les garde.

A nos familles et nos chers amis.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans

L'élaboration de ce travail.

A tous nos collègues de la promotion productique 2025

BensehilSouheil

Résumé

Le présent mémoire a pour objet l'étude de conception et réalisation d'un outil molette utilisé dans les travaux de tournage sur divers tours. Dans les travaux de tournage, la rigidité et la stabilité de l'outil et la pièce joue un rôle primordial afin de vaincre le phénomène de broutement. Pendant la phase de conception des outils, et les calculs nécessaires – de rigidité et de résistance – il faut mettre en évidence tous les paramètres de coupe. Pratiquement nous avons réalisé cet outil minutieusement en tenant compte de l'aspect technologique et les moyens disponibles dans notre lieu de stage.

Mots clés : Outils coupants, conception avec SolidWorks, opération de moletage, efforts de coupe, dessin de définition de produit fini, de gamme de fabrication.

Abstract

This thesis focuses on the design and production of a knurling tool used in turning operations on various lathes. In turning operations, the rigidity and stability of the tool and the work piece play a key role in overcoming chatter. During the tool design phase, and the necessary calculations—for rigidity and strength—all cutting parameters must be identified. We carefully developed this tool, taking into account the technological aspects and the resources available at our internship location.

Keywords: Cutting tools, design with SolidWorks, knurling operation, cutting forces, finished product definition drawing, and manufacturing process drawing.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة تصميم وإنتاج أداة تخويف تستخدم في تشغيل الأعمال على آلات المخارط المختلفة. في أعمال الخراطة، تلعب صلابة واستقرار الأداة وقطعة العمل دوراً حيوياً في التغلب على ظاهرة الاهتزازات. أثناء مرحلة تصميم الأداة، والحسابات اللازمة - للصلابة والمقاومة - من الضروري تسليط الضوء على جميع معايير القطع. لقد قمنا بإنشاء هذه الأداة عملياً بدقة، مع الأخذ في الاعتبار الجانب التكنولوجي والوسائل المتوفرة في موقع التربص الخاص بنا.

الكلمات المفتاحية: أدوات القطع، التصميم باستخدام SolidWorks، عملية التخويف، قوى القطع، رسم تعريف المنتج

النهائي، مراحل التصنيع.

SOMMAIRE

Introduction Générale	13
-----------------------------	----

CHAPITRE I

Recherche bibliographique sur les outils de coupe

I.1. Historique des outils.....	16
I.2. Notions de base sur l'enlèvement de matière par outil coupant.....	16
I.2.1. Eléments de l'outil coupant.....	16
I.2.2. Cinématique de l'outil de coupe.....	18
I.2.3. Configurations géométriques pour l'étude de la coupe.....	19
I. 3. Modélisation de l'enlèvement de matière par outil coupant.....	20
I.3.1. Mécanismes de formation du copeau.....	20
I.3.2. Modélisation de la séparation du copeau.....	21
I.3.3. Interface outil-copeau.....	22
I.4. Conditions d'utilisation d'un outil.....	23
I.4.1. Utilisation de banques de données de points de fonctionnement.....	24
I.4.2. Utilisation d'algorithmes.....	24
I.5. Nature des matériaux des outils de coupes.....	25
I.5.1. Principaux types de matériaux pour outils de coupe.....	28
I.5.2. Matériaux utilisés dans les outils coupants.....	29
I.5.2.1. Les aciers rapides (<i>HSS</i>).....	29
I.5.2.2. Aciers au carbone (1898).....	30
I.5.2.3. Carbures métalliques.....	31
I.5.2.3.1. Carbures métalliques sans revêtement.....	31
I.5.2.3.2. Carbures métalliques avec revêtement.....	32
I.5.2.4. Céramiques.....	32
I.5.2.5. Cermets.....	33
I.5.2.6. Nitrure de bore cubique (<i>CBN</i>).....	34

I.5.2.7. Diamant.....	36
I.5.2.7.1. Diamant naturel.....	36
I.5.2.7.2. Diamant synthétique.....	37
I.6. Revêtement des outils de coupe.....	37
Conclusion.....	39

CHAPITRE II

Description et dimensionnement de l'outil de moletage

II.1. Introduction.....	41
II.2. Définition du moletage.....	41
II.3. Types d'outils de moletage.....	42
II.3.1. Outils de moletage à une seule roue.....	42
II.3.2. Outils de moletage multi-roues.....	42
II.3.3. Outils de moletage à changement rapide.....	43
II.3.4. Outils de moletage interne.....	44
II.4. Méthodes d'usinage d'un moletage.....	45
II.4.1. Moletage par Déformation.....	45
II.4.2. Moletage par enlèvement de matière.....	45
II.5. Différentes techniques de Moletage.....	46
II.5.1. Moletage droit (également connu sous le nom de moletage standard).....	46
II.5.2. Moletage diagonal.....	46
II.5.3. Moletage diamanté.....	47
II.6. Les paramètres concernés d'un moletage.....	47
II.6.1. Forme du moletage.....	47
II.6.2. Valeurs nécessaires du moletage.....	48

II.7. Les calculs de moletage.....	49
II.7.1. Calculs de pas.....	49
II.7.2. Profondeur de coupe.....	49
II.8. Sélection et utilisation de la molette.....	49
II.9. Guide étape par étape sur la façon de moleter sur un tour.....	50
II.10. Applications du moletage dans diverses industries.....	51
II.11. Défauts et problèmes courants de moletage.....	51
II.12. Conception de l'outil à moleter.....	53
II.13. Mode opératoire pour la division d'une molette.....	55
II.14. Traitement Thermique de molette.....	56
Conclusion.....	57

CHAPITRE III

Calcul de la résistance des matériaux

III.1. Introduction.....	59
III.2. Calcule de l'effort de coupe en moletage.....	59
III.3. Calculer l'effort tranchant et Moment fléchissant.....	60
III.3.1. Diagramme des efforts tranchants.....	62
III.3.2. Diagramme des moments fléchissant.....	63
III.4. Contrainte normale maximale σ_{Max}	64
III.5. Vérifier la résistance de la poutre à la flexion.....	65
III.6. Vérification du diamètre de l'axe.....	65
Conclusion.....	67

Chapitre IV

Etude de fabrication, (gamme d'usinage) de l'outil

IV.1. Introduction.....	69
-------------------------	----

IV.2. Dessin d'ensemble d'un outil de moletage.....	70
IV.3. Dessin de définition de produits.....	71
IV.3.1. Porte molette.....	71
IV.3.1.1. Processus de fabrication.....	72
IV.3.1.2. Projet de gamme.....	72
IV.3.2. Axe molette.....	75
IV.3.2.1. Processus de fabrication.....	76
IV.3.2.2. Projet de gamme.....	76
IV.3.4. Molette droit.....	78
IV.3.4.1. Processus de fabrication.....	79
IV.3.4.2. Projet de gamme.....	79
Conclusion.....	81
Conclusion Générale.....	82
Références bibliographies.....	83

LISTE DES FIGURES

CHAPITER I

Recherche bibliographique sur les outils de coupe

Figure I.1 : Zones caractérisant l'outil de coupe en tournage.....	17
Figure I.2 : Angles caractéristiques de l'outil de coupe.....	18
Figure I.3 : Mouvements différents de l'outil de coupe.....	19
Figure I.4 : Différentes configurations de coupe (a) . Coupe orthogonale (b) . Coupe oblique (c) . Coupe réelle.....	20
Figure I.5 : Formation du copeau en coupe orthogonale.....	21
Figure I.6 : Courbe de contrôle de copeau.....	24

Figure I.7 : Utilisation du concept de couple outil/matière (COM).....	25
Figure I.8 : Comparaison de matériaux de coupe.....	26
Figure I.9 : Dureté des matériaux constituant l'arête de coupe.....	27
Figure I.10 : Dates d'apparition des matériaux de coupe sur le marché européen.....	27
Figure I.11 : Domaines limites d'utilisation des différents types de matériaux en fonction des paramètres V_c et f	28
Figure I.12 : Céramiques.....	32

CHAPITRE II

Description et dimensionnement de l'outil de moletage

Figure II.1: Moletage d'une pièce.....	41
Figure II.2: Outils de moletage à une seule roue.....	42
Figure II.3: Outils de moletage à double roue.....	43
Figure II.4: Outils de moletage à roue unique avec molettes.....	43
Figure II.5: Outils de moletage par fraisage.....	43
Figure II.6: Outils de moletage à changement rapide.....	44
Figure II.7: Outils de moletage interne.....	44
Figure II.8: Les procédés de moletage.....	45
Figure II.9: Molettes droit.....	46
Figure II.10: Molettes diagonales à gauche.....	46
Figure II.11: Molettes diagonales à droite.....	46
Figure II.12: Molettes diamantées femelles.....	47
Figure II.13: Molettes diamantées mâles.....	47
Figure II.14: Forme et cotes du moletage.....	47
Figure II.15: Défauts courants de moletage.....	52
Figure II.16: Porte molette.....	53
Figure II.17: Axe de molette.....	54

Figure II.18: Molette droit.....	54
Figure II.19: Cycle thermique lors d'une trempe.....	56
Figure II.20: Cycle de traitement thermique.....	57

CHAPITRE III

Calcul de la résistance des matériaux

Figure III.1 : Schéma statistique réel.....	60
Figure III.2 : Schéma statistique équivalente.....	61
Figure III.3 : Diagramme des efforts tranchants.....	62
Figure III.4 : Diagramme des moments fléchissant.....	64
Figure III.5 : Axe est exposé à des efforts de cisaillement.....	65

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Recherche bibliographique sur les outils de coupe

Tableau I.1 : Propriétés physiques de quelques matériaux de coupe.....	29
Tableau I.2 : Composition chimique moyenne des principales nuances d'acières rapides élaborées par la métallurgie des poudres commercialisées en France.....	30
Tableau I.3 : Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe.....	33
Tableau I.4 : Comparaison des propriétés physiques et du ratio N/(C + N) des cermets et des carbures de coupe.....	34

CHAPITRE II

Description et dimensionnement de l'outil de moletage

Tableau II.1 : Relation entre les données de moletage.....	48
Tableau II.2 : Applications de moletage triées par industrie.....	51

CHAPITRE III

Calcul de la résistance des matériaux

Tableau III.1 : Valeurs indicatives.....	59
---	----

LISTE DES ABREVIATIONS

ALE : MEF Arbitrairement Lagrangien-Eulérien

UGV : Usinage à Grande Vitesse

EF : Eléments Finis

MEB : Microscope Electronique à Balayage

MEF : Méthode des Eléments Finis

ISO : International Organization for Standardization

MOCN : Machine-outil à commande numérique

CNC : Computer numerical control

Introduction générale

Les outils de coupe sont des outils utilisés pour enlever de la matière d'une pièce sous forme de copeaux. Ils sont utilisés dans une large gamme de processus de fabrication et d'usinage, tels que le perçage, le fraisage, le tournage et le meulage. Le choix des outils de coupe est crucial pour l'efficacité et la qualité du processus d'usinage [1]. Il existe de nombreux types d'outils de coupe différents, chacun avec ses propres caractéristiques et utilisations uniques.

Les outils de coupe possèdent plusieurs caractéristiques techniques essentielles qui déterminent leur performance, leur efficacité et leur durée de vie [2]. Parmi les principales, on retrouve la géométrie de l'outil, incluant l'angle de coupe, l'angle de dépouille et l'angle de pointe, qui influencent directement la qualité de l'usinage et la formation des copeaux. Le matériau de l'outil est également crucial : il peut s'agir d'acier rapide (HSS), de carbures, de céramique ou de matériaux super durs comme le nitrule de bore cubique (CBN) ou le diamant poly cristallin (PCD), chacun ayant des propriétés spécifiques en termes de résistance à l'usure, de matériaux et de conductivité thermique.

Lors de la sélection d'un outil de coupe, il est important de prendre en compte des facteurs tels que la dureté et la ténacité de la pièce, la finition de surface souhaitée et les vitesses et avances de coupe requises. Les outils de coupe peuvent être conçus avec des géométries et des revêtements spécifiques pour améliorer leurs performances dans différents types d'opérations d'usinage [3].

Notre projet consiste à concevoir un outil de moletage répondant aux besoins spécifiques des professionnels de la mécanique. Pour y parvenir, nous avons mobilisé diverses méthodes et outils de conception, notamment des logiciels de modélisation comme SolidWorks, ainsi que des applications dédiées aux calculs techniques. Les étapes complètes de fabrication seront présentées dans le chapitre dédié à la réalisation. Ce travail nous a permis d'approfondir notre recherche et de synthétiser l'ensemble des éléments liés à cette étude. Ainsi, ce mémoire s'articule autour d'une introduction générale, d'une conclusion et de quatre chapitres principaux.

Premier chapitre est dédié à une revue bibliographique portant sur la coupe des métaux. Il présente un aperçu historique des outils de coupe, les notions fondamentales liées à

Introduction générale

l'enlèvement de matière, ainsi que l'optimisation des conditions de coupe et la sélection des matériaux utilisés pour les outils.

Le deuxième chapitre traite de la description et du dimensionnement de l'outil de moletage. Il aborde les différents types d'outils utilisés, les méthodes d'usinage ainsi que les techniques de moletage. Ce chapitre présente également certains paramètres et calculs essentiels liés à cette opération. Enfin, nous proposons une conception simplifiée de l'outil à réaliser.

Le troisième chapitre consacré aux calculs de construction, comprend les calculs de force de cisaillement, de moment de flexion et la vérification du diamètre de l'axe porte-molette.

Le quatrième chapitre se concentre exclusivement sur l'analyse de la gamme d'usinage, en mettant l'accent sur les différentes opérations requises pour la fabrication de chaque pièce.

Chapitre I

*Recherche bibliographique sur
les outils de coupe*

I.1. Historique des outils :

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu. Dans le courant du XXe siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (acières rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces [4].

I.2. Notions de base sur l'enlèvement de matière par outil coupant

I.2.1. Eléments de l'outil coupant

➤ **Faces et arêtes de l'outil coupant**

Etant donné que cette étude s'intéresse à la quantification de l'usure de l'outil de coupe en usinage, il est indispensable de définir les différents éléments qui le constituent :

Certes, il existe une large gamme d'outils de coupe, néanmoins, ces éléments restent les mêmes quel que soit l'outil. Toutefois, un outil de coupe en tournage sera considéré dans la description qui suit [5].

En effet, un outil coupant est composé d'un corps d'outil et d'une queue. Le corps peut comporter une ou plusieurs parties actives. Quant à la queue, elle est définie comme étant la partie par laquelle l'outil est maintenu.

La partie active est celle qui intervient directement dans la coupe et est constituée d'une arête de coupe ; intersection de la face de coupe (A_γ) et de face de dépouille (A_α) (Figure I.1) [6].

On distingue donc :

- A_γ : Face de coupe ; face le long de laquelle glisse le copeau.
- A_α : Face de dépouille principale ; face devant laquelle passe la surface qui vient d'être usinée.

- A_α : Face de dépouille secondaire ; face devant laquelle passe la surface engendrée
- S : Arête de coupe principale définie comme étant l'intersection entre A_γ et A_α
- S' : Arête de coupe secondaire définie comme étant l'intersection entre A_γ et A_α'

La jonction des arêtes principales et secondaires forme le bec de l'outil.

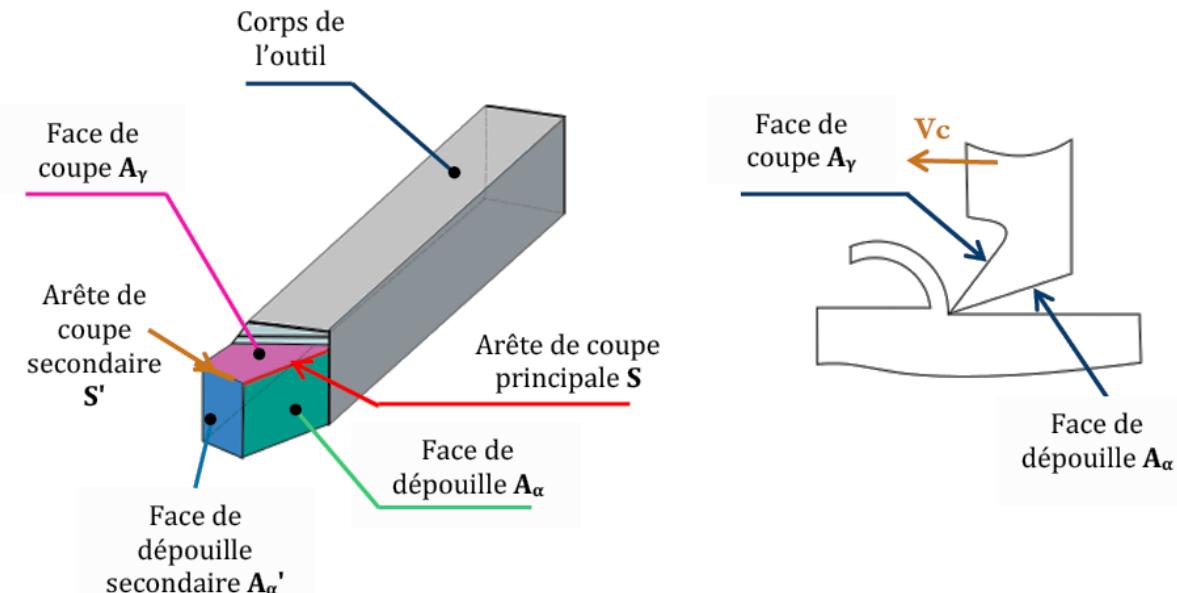


Figure I.1 : Zones caractérisant l'outil de coupe en tournage

➤ Angles de l'outil coupant

L'étude des phénomènes liés à l'enlèvement de matière par outil coupant met en exergue différents angles sur l'outil. On distingue donc : [7]

- **Angle de dépouille α** : il a un impact sur le frottement entre l'outil et la pièce et par conséquent il influe sur la durée de vie de l'outil
- **Angle de taillant β** : il a un impact sur la résistance à la rupture du taillant
- **Angle de coupe γ** : il a un impact sur les efforts de coupe, la puissance consommée, le flux de chaleur...

On a toujours $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$ (Figure I. 2)

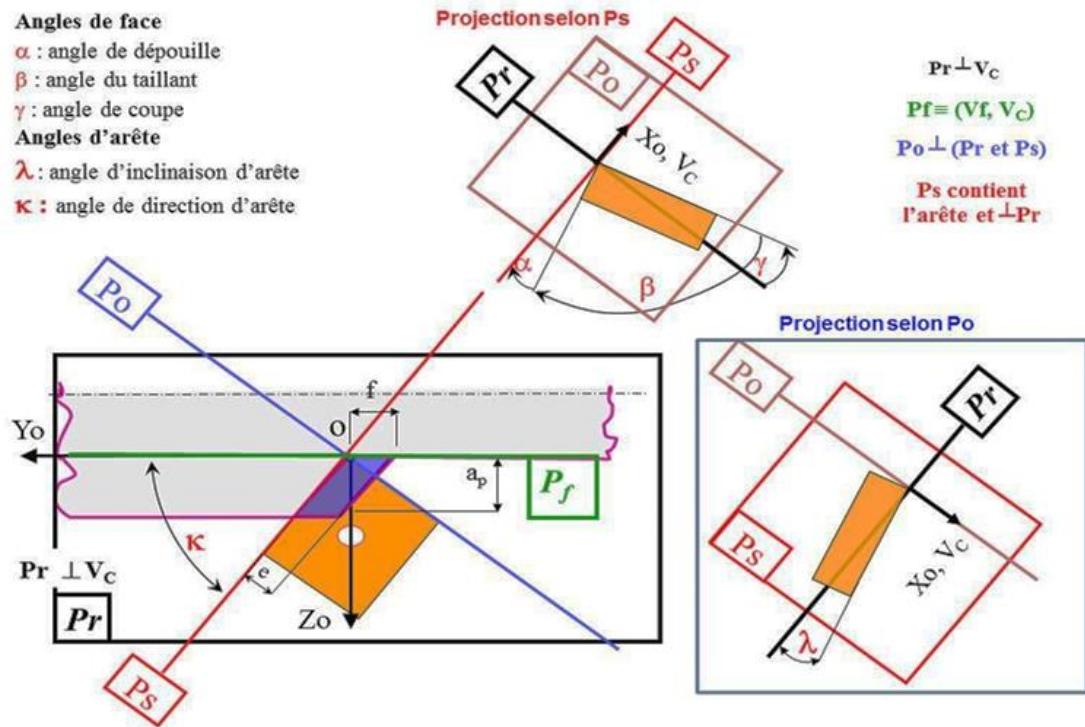


Figure I.2 : Angles caractéristiques de l'outil de coupe

I.2.2. Cinématique de l'outil de coupe

Paramètres de coupe

En fabrication mécanique, trois paramètres principaux régissent le processus d'enlèvement de matière et ont un impact significatif sur les mécanismes provoquant l'usure des outils coupant [8].

- **Vitesse de coupe V_c :** définie comme la vitesse tangentielle Elle dépend du matériau usiner et de la fréquence de rotation de la pièce (en tournage). Elle joue un rôle majeur dans le processus de coupe à savoir les mécanismes d'enlèvement de matière.
- **Avance par tour f :** est le second paramètre qui a une influence significative dans le procédé de coupe car il détermine la section du copeau. Il correspond au déplacement de l'outil pour une révolution de la pièce en tournage.
- **Profondeur de passe a_p :** est la pénétration de l'arête de coupe dans la matière.

En chariotage, elle correspond à la différence entre le rayon de la pièce avant et après une passe alors qu'en coupe orthogonale, elle correspond à l'épaisseur du disque (Figure I.2).

➤ Mouvements de l'outil coupant

Afin d'enlever la quantité de matière souhaitée, l'outil est muni de deux mouvements : un mouvement de coupe et un mouvement d'avance.

- **Mouvement de coupe :** est le mouvement relatif principal permettant à l'outil de couper la pièce. Il est régi par la vitesse de coupe V_c
- **Mouvement d'avance :** est le mouvement permettant à l'outil de se déplacer le long de la pièce. Il est régi par la vitesse d'avance V_f (Figure I.3).

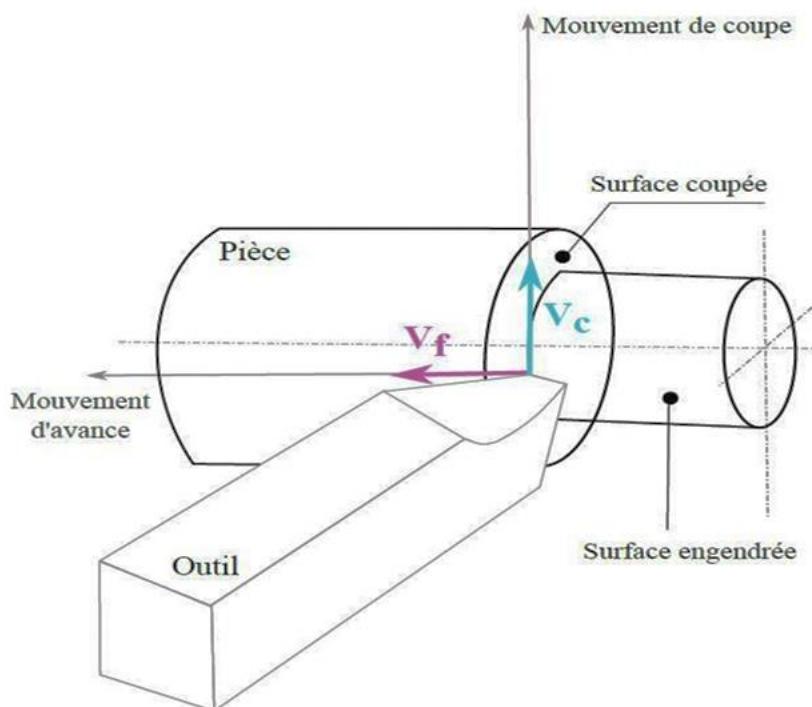


Figure I.3 : Mouvements différents de l'outil de coupe

I.2.3. Configurations géométriques pour l'étude de la coupe

La modélisation du processus d'enlèvement de matière est certainement une tâche délicate vu que la géométrie de l'outil n'est pas toujours simple à modéliser. Adopter des hypothèses simplificatrices, quant à la configuration de coupe considérée, est une étape primordiale.

En effet, en tournage, on distingue trois configurations de coupe : Coupe orthogonale, Coupe oblique, Coupe réelle ou tridimensionnelle [9].

- La coupe orthogonale : c'est la configuration la plus simple à adopter bien qu'elle soit rarement utilisée dans le milieu industriel. En effet, du point de vue de la modélisation, cette hypothèse permet de ramener un problème en 3D à un problème en 2D vu que les vitesses de coupe V_c et d'avance V_f sont orthogonales par rapport à l'arête de coupe.

- La coupe oblique : cette approche est plus réaliste que la coupe orthogonale, mais elle est également plus compliquée à traiter. Dans cette configuration, l'arête de coupe est inclinée par rapport à la normale à la direction de coupe. Ainsi, le copeau ne s'évacue pas dans la direction normale à l'arête de coupe, mais dans une direction faisant un angle avec la normale.
- Il est à noter que la coupe orthogonale est un cas particulier de la coupe oblique
- Coupe réelle ou tridimensionnelle : Contrairement aux deux configurations précédentes où l'on considère que les arêtes de coupe sont parfaitement vives, dans le cas de la coupe 3D, la géométrie réelle de l'outil est prise en compte (Figure I.4).

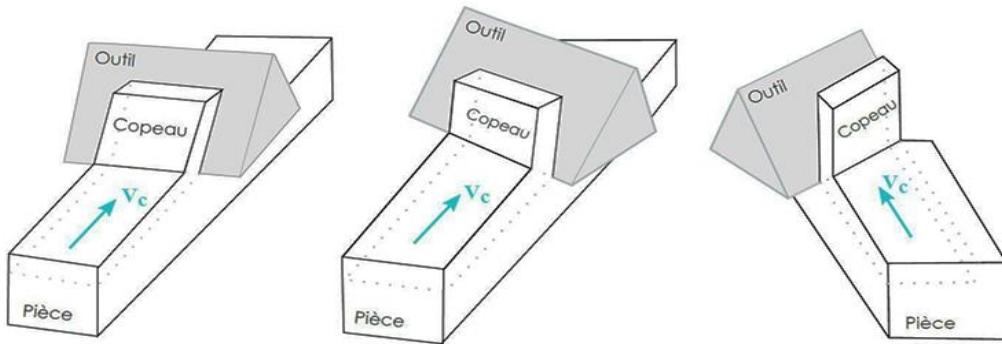


Figure I.4 : Différentes configurations de coupe (a). Coupe orthogonale (b). Coupe oblique (c). Coupe réelle

I. 3. Modélisation de l'enlèvement de matière par outil coupant

Bien que l'usinage par outil coupant soit l'un des processus d'enlèvement de matière les plus répandus, la modélisation de ce phénomène est loin d'être triviales. Elle est particulièrement complexe en raison de la diversité des phénomènes physiques mis en jeu, notamment la présence de grandes déformations élasto-plastiques, la complexité du contact et du frottement caractérisant l'interaction outil-matière, le couplage thermomécanique du processus et la diversité des mécanismes durant la formation du copeau [10,11,12].

I.3.1. Mécanismes de formation du copeau

Le processus de formation du copeau repose sur le cisaillement de la matière au voisinage de l'arête de coupe. Ceci est caractérisé par l'apparition de 5 zones [13]. (Figure I.5) :

- **Zone 1 ou zone cisaillement primaire (ZCP)** : C'est la zone principale de genèse du copeau. Elle est le siège d'un cisaillement intense de la matière et s'étend de la pointe de l'outil jusqu'à la surface libre du copeau. Elle est idéalement représentée par un plan dit de « cisaillement », incliné d'un angle φ par rapport à la direction de coupe :

- **Zone 2 ou zone de cisaillement secondaire (ZCS)** : Cette zone est le siège d'un frottement intense entre la face de coupe de l'outil et le copeau. Elle est également caractérisée d'une part, par une élévation considérable de la température et d'autre part, par un changement des propriétés mécaniques et physico-chimiques de l'outil
- **Zone 3 ou zone de cisaillement tertiaire (ZCT)** : Dans cette zone, l'outil exerce un effort de compression qui engendre la séparation du métal à la pointe de l'outil formant ainsi le copeau et la pièce usinée
- **Zone 4** : Cette zone traduit le frottement entre la face en dépouille de l'outil et la surface usinée. Les phénomènes qui s'y passent ont un impact direct sur l'intégrité de surface et sur l'usure en dépouille
- **Zone 5** : Cette zone est caractérisée par des déformations plastiques et élastiques du matériau en amont de l'outil. Ceci engendre des contraintes résiduelles au niveau de la surface de la pièce à usiner.

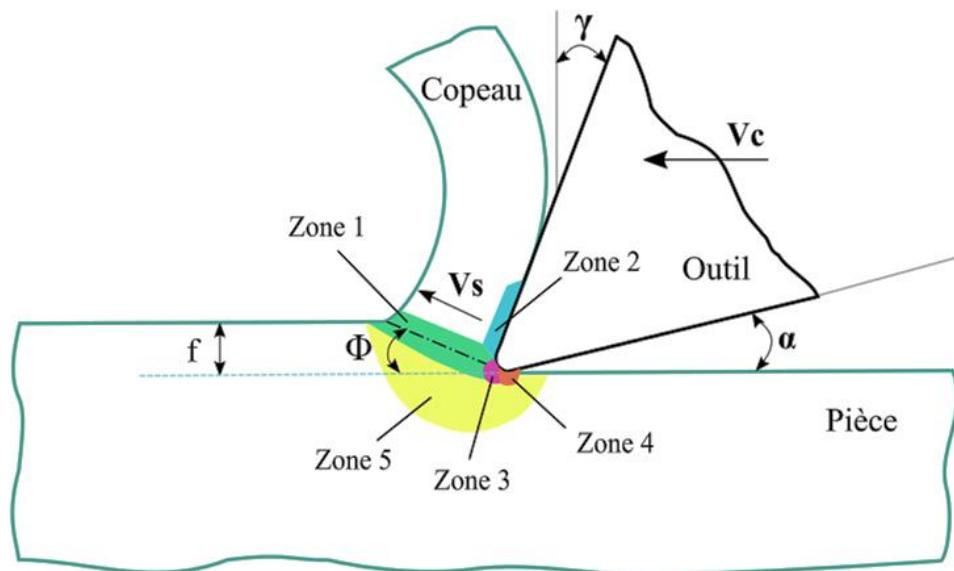


Figure I.5 : Formation du copeau en coupe orthogonale

I.3.2. Modélisation de la séparation du copeau

La modélisation de la séparation du copeau en usinage est une opération délicate qui constitue l'un des principaux points de blocage de la simulation numérique. En effet, des déformations très importantes et difficiles à gérer apparaissent lors de la désolidarisation entre la pièce et le copeau.

On trouve essentiellement 3 modèles pour la simulation de la séparation du copeau : soit par une ligne de séparation prédefinie, soit par un modèle d'endommagement, soit par déformation plastique.

➤ **Ligne de séparation prédefinie**

Cette méthode de séparation compte parmi les premiers modèles développés mais aussi les plus utilisés pour modéliser la séparation du copeau. Elle repose sur le principe de propagation de fissures selon une ligne prédefinie et ce par dédoublement des nœuds. Ce dédoublement est régi soit, par un critère physique; notamment la déformation plastique[14] ou la contrainte de cisaillement, soit par un critère géométrique qui n'est autre que la distance entre la pointe de l'outil et le nœud à déboutonner [15,16].

➤ **Modèle d'endommagement**

La séparation de copeau, dans ce cas, comme dans la méthode précédemment exposée, suit une ligne de séparation mais qui n'est pas déterminée au préalable. La formation du copeau est modélisée soit par propagation de fissure en 2D [17], soit par suppression d'éléments en 2D et 3D [18].

➤ **Déformation plastique**

Le développement des procédures de remaillage au début des années 90 a permis de remédier au problème de distorsion des mailles au niveau de la pointe de l'outil. La séparation de la matière peut donc se faire par déformation plastique avec une modélisation précise des champs de contraintes et de déformations en pointe d'outil.

Cette approche est simple à adopter mais n'est pas forcément la plus économique en termes de temps de calcul [19,20].

I.3.3. Interface outil-copeau

Le frottement entre l'outil et le copeau durant l'opération d'enlèvement de matière par outil coupant est un phénomène très complexe qui influe sur la géométrie du copeau, la formation de l'arête rapportée, la longueur de contact copeau-outil, la température de coupe, l'usure de l'outil...

Il est donc indispensable de comprendre les phénomènes de frottement sur les faces et autour de l'arête de l'outil, pour pouvoir développer des modèles robustes pour la simulation de l'usure [21].

I.4. Conditions d'utilisation d'un outil

Dans le but de déterminer les conditions optimales, Taylor [22] le premier et depuis de nombreux expérimentateurs ont cherché à établir les lois de la coupe, en particulier la relation entre la durée de vie de l'outil et la vitesse de coupe quand sont stabilisées un certain nombre de variables : dimensions de la section du copeau, matière de la pièce et de l'outil, géométrie de ce dernier. Ils sont parvenus, pour la plupart, à des formules semblables, mais les coefficients de celles-ci présentent une dispersion importante pour plusieurs raisons : [23-24]

- Deux matériaux de même composition chimique et de même dureté peuvent avoir des Usinabilités différentes
- Outils géométriquement différents
- Essais n'ayant pas porté sur le même champ des variables ci-dessus (en particulier vitesses de coupe)
- Impossibilité d'éviter des erreurs de mesure dont l'effet cumulatif peut être importante
- Durée de vie de l'outil dépendant d'autres variables méconnues telles que : état de surface des arêtes de coupe, finesse de l'arête, machines-outils elles-mêmes, mode de fixation de l'outil et de la pièce, forme et dimension de cette dernière, section d'outil, refroidissement, etc.

Exemple : ainsi, l'angle de dépouille a été considéré longtemps comme indifférent ; des essais ont montré que dans le tournage de fonte, avec outils en carbure, une variation de quelques degrés de cet angle faisait varier du simple au double le nombre de pièces usinées entre deux affûtages.

Pour que les résultats soient comparables, il faudrait que les essais soient réalisés avec les machines, des outils et des pièces identiques. En effet, la durée de vie de l'outil dépend de facteurs incontrôlables : homogénéité du matériau usiné, structure métallurgique de ce matériau et de celui de l'outil. Toutes choses étant égales par ailleurs, ces éléments seraient encore causés de dispersions importantes.

En fait, deux voies sont possibles pour fournir les conditions d'utilisation d'un outil à un usineur.

I.4.1. Utilisation de banques de données de points de fonctionnement

Cette démarche est vouée à l'échec pour plusieurs raisons dont les deux principales sont :

- Une banque de données n'est le reflet que de situations ponctuelles et non généralisables, encore moins extrapolables
- L'utilisation des banques de données se fait principalement par extrapolation linéaire (règle de trois). Prenons un exemple de tournage : un utilisateur souhaite obtenir l'avance possible sur son outil pour une profondeur de passe donnée mais aucune valeur pour cette profondeur de passe n'est stockée. Il recherche alors dans la banque de données des conditions pour des profondeurs voisines. Une extrapolation linéaire est ensuite effectuée pour trouver les conditions à la profondeur souhaitée. Mais, technologiquement, rien ne permet d'affirmer que les conditions ainsi déduites sont viables. Cela est illustré par la courbe de contrôle de copeau d'une plaquette de coupe donnée dans une matière donnée de la (Figure I.6): la profondeur de passe ne varie pas linéairement avec l'avance.

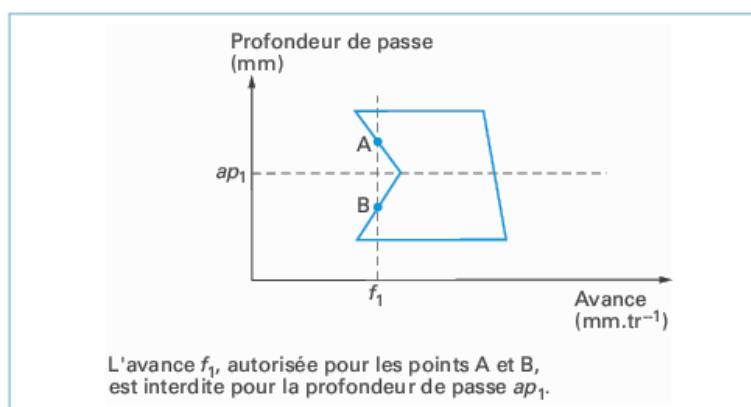


Figure I.6 : Courbe de contrôle de copeau

I.4.2. Utilisation d'algorithmes

Cette voie est celle développée dans le concept du couple outil/ matière, concept normalisé par la norme NF E66-520.

À partir du domaine de fonctionnement de l'outil dans une matière obtenue par essais, on vient superposer de l'algorithmique permettant d'interagir sur le domaine de fonctionnement en fonction des paramètres de l'opération d'usinage, de la machine, du bridage de la pièce... Le domaine d'emploi de l'outil dans la matière n'est pas décrit pas un ou des nuages de points (comme dans le cas des banques de données) mais par un ensemble de paramètres permettant de tracer le contour du domaine d'emploi. Une schématisation de cette méthode est faite (Figure I.7).

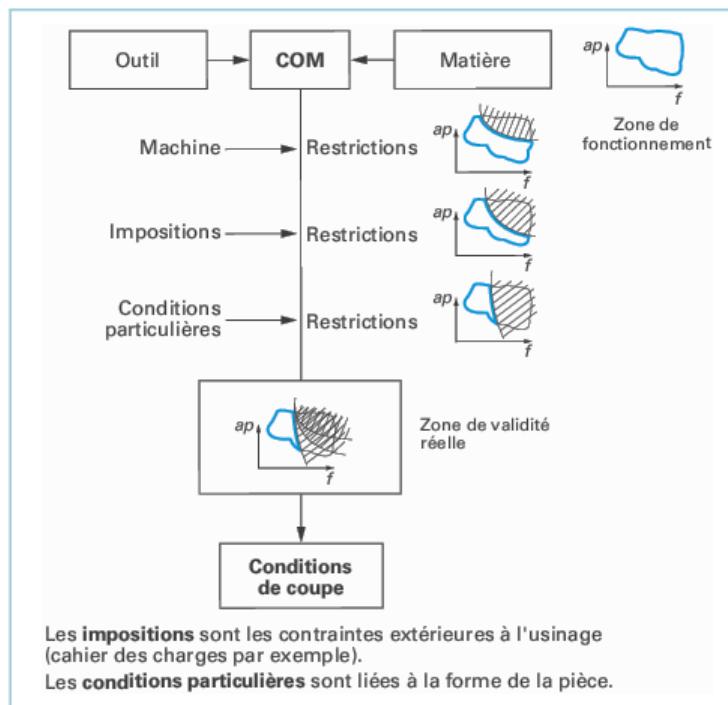


Figure I.7 : Utilisation du concept de couple outil/matière (COM)

Cette démarche présente les principaux avantages suivants :

- Les paramètres d'utilisation proposés sont corrects (on est certain qu'ils se trouvent à l'intérieur du domaine d'emploi de l'outil dans la matière) et ils prennent en compte toutes les données de l'usinage (capacité machine, qualité de pièce, bridage...)
- Les données sont comparables. Trop souvent, la comparaison entre deux outils s'effectue par un remplacement poste pour poste de l'outil sur la machine et par une comparaison des durées de vie. Or, à priori, rien ne prouve que les paramètres de coupe utilisés avec le premier outil sont autorisés avec le second. La conséquence est que l'on risque de disqualifier un outil plus performant que celui-ci en place, parce que mal testé. Ce travers est évité par cette méthode.

I.5. Nature des matériaux des outils de coupes

Les outils de coupe sont des instruments utilisés pour enlever des matériaux de manière sélective afin de donner une forme spécifique à une pièce. Ils sont largement utilisés dans divers domaines tels que l'usinage, la menuiserie, la métallurgie, la construction, etc. La nature et les propriétés des outils de coupe varient en fonction du matériau à usiner et du processus d'usinage [25-31].

L'usinage des métaux ou des polymères requiert l'utilisation d'outils de coupe dotés d'excellentes propriétés, notamment une haute dureté à des températures élevées en raison des frottements constants entre l'outil et la pièce, ainsi qu'entre l'outil et le copeau. Ces outils doivent également présenter une résistance à l'usure exceptionnelle et une stabilité chimique pour assurer des performances optimales tout au long du processus d'usinage.

Les premiers outils étaient fabriqués en acier rapide, avec le corps et la partie active de l'outil formant une seule barre. Lorsqu'un tel outil devenait usé, il était affûté pour prolonger sa durée de vie. Cependant, l'évolution des technologies et l'introduction de nouveaux matériaux ont rendu le barreau en acier rapide insuffisant pour répondre aux exigences technologiques actuelles. L'avènement des outils en carbures métalliques, en céramiques, en CBN (nitrate de bore cubique), et en diamant a permis l'exploitation industrielle de ces techniques. La (Figure I.8) représente les principaux matériaux utilisés pour les outils de coupe modernes.

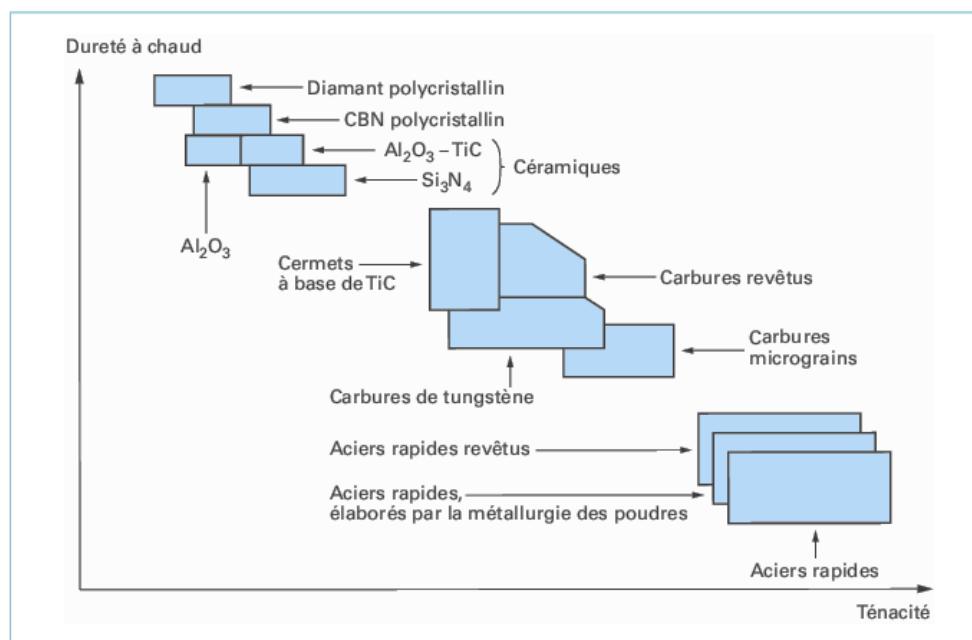


Figure I.8 : Comparaison de matériaux de coupe

Depuis 1900, plusieurs matériaux conservant une dureté à des températures de plus en plus élevées (figure I.9.a) ont été successivement introduits, comme illustré dans la (figure 10). Chaque avancée a permis d'atteindre des vitesses de coupe plus élevées, nécessitant ainsi des machines-outils plus puissantes et rigides.

Pour les arêtes de coupe des outils de machines-outils, on utilise donc une gamme de matériaux classés en six groupes selon leur dureté croissante (voir figure I.9.b) : aciers rapides, carbures, céramiques, cermets, diamants et nitrule de bore cubique polycristallin.

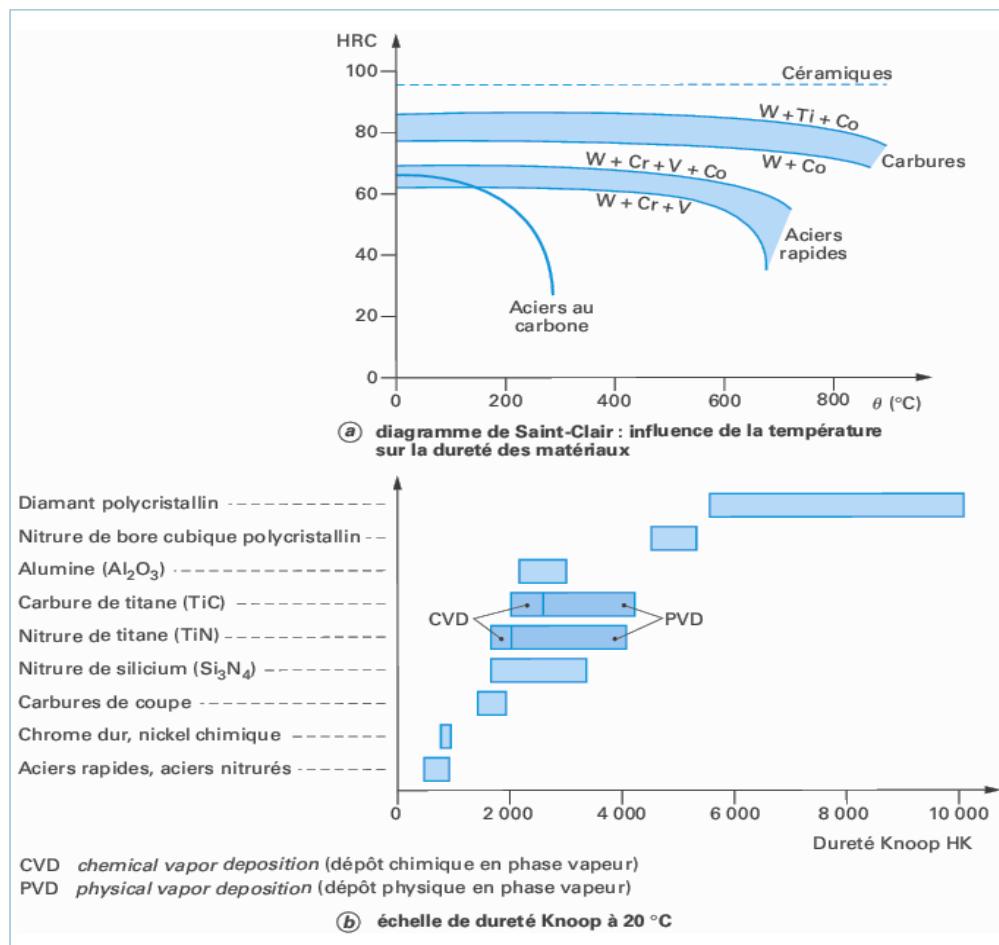


Figure I.9 : Dureté des matériaux constituant l'arête de coupe

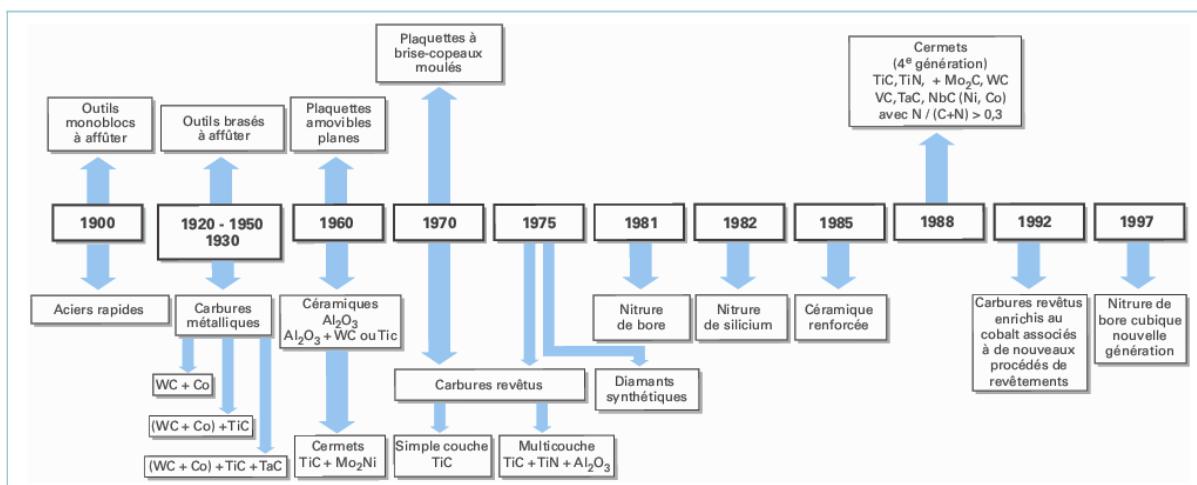


Figure I.10 : Dates d'apparition des matériaux de coupe sur le marché européen

L'optimisation des conditions d'usinage nécessite une recherche approfondie adaptée à chaque combinaison d'outil et de pièce. Cette quête ne peut être réalisée que par le biais d'un protocole expérimental rigoureux. Les nuances d'outils coupants et leurs domaines d'application sont présentés dans la (Figure I.11).

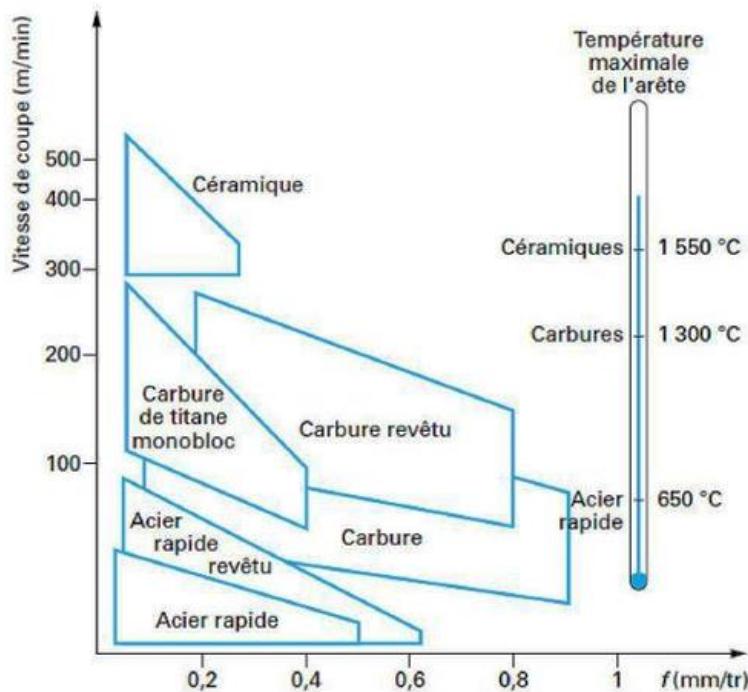


Figure I.11 : Domaines limites d'utilisation des différents types de matériaux en fonction des paramètres V_c et f .

I.5.1. Principaux types de matériaux pour outils de coupe

Dans un monde industriel en constante évolution, les outils de coupe en usinage jouent un rôle crucial, avec un marché mondial estimé à plusieurs milliards de dollars. Mais comment choisir parmi la vaste gamme de matériaux disponibles ? .Aciers rapides, carbures métalliques, céramiques... chaque matériau offre des avantages spécifiques, adaptés à diverses applications. Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. En plus des conditions d'utilisation de l'outil, celles-ci sont fonction des propriétés du matériau qui constitue l'arête de coupe : ténacité et résistance à l'abrasion (tableau I.1). Certains aciers de construction sont couramment choisis pour fabriquer la partie non coupante des outils, tels que les queues de forets ou d'alésoirs, ainsi que les corps d'outils, afin de réduire les coûts.

Propriétés	Masse volumique (kg · m ⁻³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la rupture en flexion (MPa)	Dureté Vickers (HV ₃₀)	Coefficient de dilatation linéique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Conductivité thermique à 20 °C (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Ténacité K _{IC} (MPa · √m)
Aciers rapides							
HS 6 – 5 – 2	8 160	217		800 à 920	12,5	19	
HS 2 – 9 – 1 – 8	8 000	217		950 à 1 100	12	19	
Carbures métalliques							
WC + CoK 10	14 800 à 15 000	630 à 650	1 500 à 1 600	1 600 à 1 800	5,5	80	13
WC + TiC + Ta (Nb) C + CoP 10	10 000 à 11 500	530 à 550	1 000 à 1 500	1 500 à 1 700	6	35	10
Céramiques							
AlumineAl ₂ O ₃	3 900	400	400 à 600	2 400	8	25 à 30	4 à 6
Alumine + zirconeAl ₂ O ₃ + Zr O ₂	4 100	365	600 à 800	1 700	9 à 10	15 à 25	5 à 7
Alumine + Whiskers SiCAl ₂ O ₃ + Sic	3 700	390	700 à 900	1 800 à 2 000	7 à 8	35	6 à 9
Alumine + carbure de TiAl ₂ O ₃ + Tic	4 200	410	700 à 900	2 200 à 2 600	8 à 8,5	25 à 30	5 à 7
Nitride de siliciumSi ₃ N ₄	3 200	310	800 à 1 000	1 500 à 1 600	3	20 à 30	5 à 7
Cermets							
TiCN + Mo ₂ C + WC + VC + TaC + NbC + (Ni,Co)	6 000 à 8 000	390	1 500 à 2 000	1 500 à 1 700	7 à 8	18	
Diamants							
Diamant naturelmonocristal	3 520	1 140	(1)	> 9 000	3,1	600 à 2 000	3 à 4
Diamant synthétiquePCD polycristallin (2)	3 860	920	920	5 000 à 8 000	3,6 à 6	560	8 à 9
Niture de bore cubique....CBN polycristallin (2)	3 100	680	570	2 500 à 4 000	5	80 à 120	6

Mesures effectuées à 20 °C sur outil.
(1) Valeur non disponible sur outil de coupe
(2) Pour les matériaux polycristallins, les caractéristiques sont fonction du taux de liant présent dans le compact.

Tableau I.1 : Propriétés physiques de quelques matériaux de coupe

I.5.2. Matériaux utilisés dans les outils coupants

I.5.2.1. Les aciers rapides (HSS)

Les aciers rapides, connus sous l'acronyme **HSS** (High Speed Steel), sont des alliages spécialement conçus pour l'usinage à haute vitesse. Reconnus pour leur dureté exceptionnelle et leur résistance à la déformation sous des températures élevées, ces aciers sont indispensables dans les industries modernes pour leur efficacité et leur polyvalence.

- La composition chimique : (0.6 à 1.4%) **C**+ (3.8 à 4.6%) **Cr** et (8.5 à 19 %) **W**.
- La résistance à chaud allant jusqu'à 600°C.
- Dureté 62 à 65 HRC.
- Vitesse de coupe 2 à 3 fois supérieure à celle des outils au carbone.

➤ Types d'acières rapides et leurs spécificités

- a) HSS :** La forme standard, contient 14 à 16 % **W**, la résistance à chaud = 400 °C, idéale pour l'usinage manuel et des matériaux plus tendres.
- b) HSS-E (5% de cobalt) :** Améliore la résistance à la chaleur, parfait pour les aciers inoxydables.
- c) HSS Co8 (8% de cobalt) :** Accroît la vitesse de coupe, utilisé pour les aciers durs et les alliages de titane.

d) HSS-V (au vanadium) : Excellente résistance à l'usure, adaptée pour les matériaux générant de longs copeaux.

e) HSS-PM (élaboré par métallurgie des poudres) : Cette technique permet d'obtenir des compositions chimiques et des finesse de structure non réalisables par les méthodes d'élaboration conventionnelles. Il offre une durée de vie prolongée, idéal pour l'usinage à sec de matériaux difficiles comme le nickel ou le titane. Le (tableau I.2) mentionne les compositions chimiques moyennes des principales nuances d'acières rapides élaborées par la métallurgie des poudres actuellement disponibles. Ces nuances sont désignées par leurs appellations commerciales car, à ce jour, elles ne font l'objet d'aucune norme particulière.

Appellation commerciale (1)	Désignation type EN 10027-1	Composition chimique (%)					
		C	Cr	W	Mo	V	Co
ASP 23 (2)	HS 6-5-3	1,30	4	6	5	3	
ASP 30 (2)	HS 6-5-3-9	1,30	4	6	5	3	9
ASP 60 (2)	HS 7-7-7-11	2,30	4	6,5	7	6,5	10,5
CPM REX M4	HS 6-5-4	1,35	4,2	6	4,5	4	
CPM REX T15	HS 12-1-5-5	1,55	4	12		5	5
CPM REX 76	HS 10-5-3-9	1,50	3,7	10	5,2	3,1	9
S 390	HS 11-2-5-8	1,60	4,7	11	2	5	8
S 690	HS 6-5-4	1,35	4	6	4,5	4	

(1) En l'absence de norme particulière, ces nuances d'acières rapides élaborées par la métallurgie des poudres sont généralement désignées par leurs appellations commerciales.
Les fournisseurs respectifs de ces nuances sont :
– pour les ASP : société des Acières de Champagnole ;
– pour les S 390 et S 690 : société Acières Spéciaux Böhlér ;
– pour les CPM REX : société Zapp.
(2) Il est à noter que les nuances ASP 23, ASP 30 et ASP 60 sont en cours de remplacement par les nuances ASP 2023, ASP 2030 et ASP 2060 (amélioration des propriétés mécaniques de l'acier rapide).

Tableau I.2 : Composition chimique moyenne des principales nuances d'acières rapides élaborées par la métallurgie des poudres commercialisées en France

➤ Applications pratiques

De nombreux outils coupants, comme les forets, les tarauds et les fraises, sont fabriqués à partir de ces aciers. La raison est simple : ces aciers conservent une dureté élevée même à des températures très élevées. Cette propriété est essentielle pour les opérations d'usinage difficiles, car elle garantit la précision et la qualité de la production industrielle.

I.5.2.2. Aciers au carbone (1898)

Les aciers au carbone, avec leur teneur typique de 0,8 à 1,05 % en carbone, après traitement thermique, ils peuvent atteindre une dureté de 58 à 64 HRC; la résistance à chaud est de 200 à 250 °C; La vitesse de coupe permise en usinage avec ces aciers 5 à 15 m/min. Ils offrent une solution économique pour des travaux de coupe à faible vitesse. Principalement

utilisés pour des opérations de finition, ils combinent coût abordable et performance adéquate dans des conditions de coupe moins exigeantes.

I.5.2.3. Carbures métalliques

Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en acier ordinaire, la partie active de ces outils étant raffûtée au fur et à mesure de son usure.

Vers 1958 ont été créés les outils à plaquettes amovibles. Ce type d'outil a été rapidement adopté car les avantages des plaquettes amovibles sont nombreux :

- Suppression de l'affûtage.
- Absence de brasure, donc une nuance plus dure peut souvent être utilisée (risque de crique éliminé).
- Conditions de coupe plus sévères.
- Indexage (repérage mécanique) de la plaque pour remplacer une arête usée ou un changement de nuance plus rapide que le changement d'un outil brasé.

Constitués principalement de carbure de tungstène WC, Ils contiennent un liant, souvent le cobalt (Co), et un/ou plusieurs éléments d'addition (W, Ti, Ta, Bo,...), saturés de carbone, ces matériaux offrent une dureté et une résistance à l'usure exceptionnelles. Ils sont idéaux pour les opérations d'usinage à haute vitesse, notamment sur des matériaux durs comme les aciers trempés et les fontes.

Ils sont obtenus par frittage (température + pression) et sont caractérisés par :

- Une résistance à chaud de 1000°C .
- Une vitesse de coupe allant jusqu'à 250 à 300 m/min .
- Une température d'oxydation de 800°C .

I.5.2.3.1. Carbures métalliques sans revêtement

La dureté des carbures métalliques (environ 1500 à 2500 HV), très supérieure à celle des aciers rapides non surcarburés ($HRC\ 66$ soit environ 865 HV), jointe à une résistance importante (résistance à la flexion de 800 à 2200 MPa). Le (tableau I.1) explique qu'ils sont les plus utilisés. Leur dureté à chaud permet l'usinage jusqu'à une température de 1000°C .

Ils peuvent être classés en trois catégories :

- **Mono carbure**, selon norme ISO, **type K** : Alliage de carbure de tungstène et de cobalt

(WC + Co), il est surtout utilisé en usinage des aciers aux copeaux courts.

- **Bicarbures**, selon norme ISO, **type P** : C'est un alliage de carbure de tungstène, de carbure de titane et de cobalt (WC + TiC + Co), ils sont utilisés en usinage des aciers inoxydables aux copeaux longs.

- **Tri carbure ou plus**, selon norme ISO, **type M** : Alliage de carbure de tungstène, de carbure de titane, de carbure de tantale et de cobalt (WC + TiC + TaC + Co), ils sont utilisés en usinage des matériaux friables (comme la fonte) aux copeaux fragmentés.

I.5.2.3.2. Carbures métalliques avec revêtement

À partir de 1969 apparaît un nouveau type de matériau de coupe : le carbure revêtu constitué par une plaquette en carbure métallique recouvert par un film mince (3 à 10 μm) d'un matériau plus dur (2000 à 3000 HV).

Ces couches sont obtenues généralement par **CVD** dans des fours entre 800 et 1100°C, ce qui permet d'obtenir des dépôts de très bonne adhérence. Pour certaines applications comme le fraisage, ces dépôts sont parfois réalisés à basse température par **PPD** afin de fragiliser le moins possible le substrat carbure.

I.5.2.4. Céramiques

Les céramiques (figure I.12) sont des matériaux frittés sans liant métallique à partir d'oxyde d'alumine, se distinguent par leur grande dureté et leur résistance à l'usure à haute température, donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Elles conviennent particulièrement à l'usinage de métaux ferreux à des vitesses de coupe élevées, bien qu'elles soient sensibles aux chocs. Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe sont réunies dans le (tableau I.3)

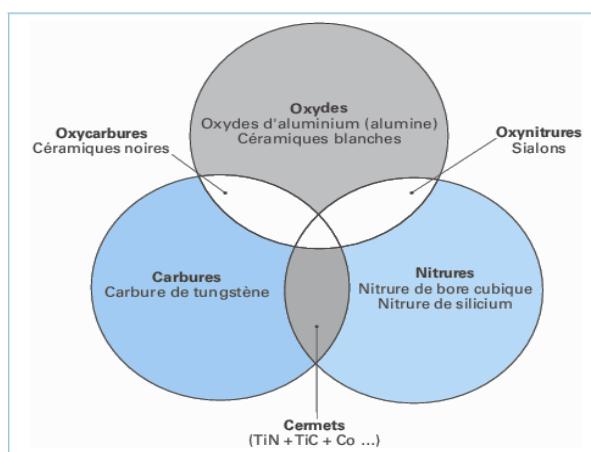


Figure I.12 : Céramiques

Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes (<i>whiskers</i>)	Sialons gris
Au début : Al_2O_3	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ (30 %)		base Si_3N_4
Actuellement : $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiN-TiC}$ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-WC, TaC}$	Al_2O_3 -fibres SiC	
			Ténacité
			Dureté

Tableau I.3 : Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe

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

Le (tableau I.1) et le diagramme de la (figure 1.8) donnent quelques propriétés physiques de ce matériau et leur comparaison avec celles des aciers rapides et des carbures métalliques. D'autres céramiques sont également employées.

- **Les céramiques noires** sont des mélanges de Al_2O_3 et de carbure métallique (*TiC ou WC*) ou de zircone (ZrO_2). Elles sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al_2O_3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe.

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

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

I.5.2.5. Cermets

Cermet est un terme formé de deux syllabes : cer vient de céramique et met de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de

composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrides) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de *TiC*, *TiN*, *TiCN*, *Mo2C*, *WC*, *VC*, *TaC*, *NbC*, *Ni* et *Co* (tableau I.1). Sont spécialement conçus pour les tâches de finition. Leur remarquable résistance à l'usure et leur stabilité chimique en font un choix particulièrement adapté pour le tournage final des aciers inoxydables.

➤ Propriétés

Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en *TiC*, *TiN* et *TiCN* et du rapport $N/(C + N)$ qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. Le (tableau I.4) montre l'influence du rapport $N/(C + N)$ sur les propriétés des cermets.

Propriétés		Teneur en azote $N/(C + N)$	Conductivité thermique à 20 °C (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Résistance à la flexion (MPa)	Coefficient de dilatation (10 ⁻⁶ · K ⁻¹)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance relative aux chocs thermiques
Cermets	2 ^e génération	0	8	1 500	7,0	390	0,4
	3 ^e génération	0,22	11	1 650	7,2	400	0,6
	4 ^e génération	0,44	18	2 000	7,4	390	1,2
Carbures	P 10		35	1 500	6,0	550	1,2
	M 10		39	2 000	4,7	600	2,8

Tableau I.4 : Comparaison des propriétés physiques et du ratio $N/(C + N)$ des cermets et des carbures de coupe

La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

Les cermets présentent en outre une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées.

Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige.

I.5.2.6.Nitrure de bore cubique (*CBN*)

Le *CBN*, l'un des matériaux de coupe les plus durs, est privilégié pour la finition de matériaux très durs comme les aciers trempés. Sa grande dureté et résistance à l'usure le rendent indispensable pour les applications exigeant une grande précision et une durée de vie élevée de l'outil.

➤ Propriétés

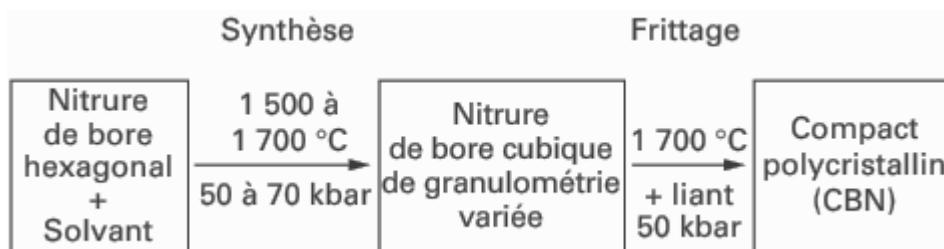
Contrairement au diamant, il ne se trouve pas dans la nature. On l'élabore donc par synthèse (première synthèse en 1957 aux États Unis). Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- **Nitrure de bore à structure cubique (CBN)** qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant).
- **Nitrure de bore à structure hexagonale** de faible dureté (même structure que le graphite).

La forme dure est très difficile à obtenir et les techniques sont voisines de celles utilisées pour la synthèse du diamant. Les cristaux obtenus sont très petits (<0,5 mm, plutôt vers 50µm) utilisables pour la réalisation de meules.

➤ Méthode

Pour fabriquer des outils de coupe, on réalise par frittage (premier essai vers 1972) un compact polycristallin (analogie avec le *PCD*) à matrice céramique ou métallique, éventuellement lié à un substrat en carbure de tungstène.



Fondamental

C'est le matériau connu le plus dur après le diamant (tableau I.1). Il présente une résistance mécanique élevée dépendant de la nature et de la quantité de liant. Sa dureté se maintient à chaud (jusqu'à 1000°C), ce qui permet de travailler à des vitesses de coupe très élevées et d'usiner des matériaux durs. Comme pour le diamant, la réactivité chimique liée au couple matériau usiné/outil de coupe limite les applications.

➤ Mise en œuvre

■ Poudre

Elle est constituée par les cristaux de synthèse de différente granulométrie.

■ Compact polycristallin (*CBN*)

On obtient par usinage la plupart des formes désirées à partir des plaques issues du frittage (analogie avec le *PCD*).

Le CBN est commercialisé sous plusieurs formes :

- directement en plaquette massive.
- en plaquette carbure revêtue de *CBN* (le nom de full-face est souvent utilisé pour ces plaquettes).
- en plaquette carbure avec insert brasé.
- en plaquette carbure avec insert directement fritté avec la plaquette.

Cela permet de trouver, en fonction de l'application, le meilleur compromis technico économique.

I.5.2.7. Diamant

I.5.2.7.1. Diamant naturel

Le diamant naturel est issu de la transformation, il y a 100 millions d'années, du carbone sous très haute pression (environ $7GPa$) et à température élevée (environ $2000^{\circ}C$). Sa haute dureté et sa faible réactivité chimique expliquent qu'il ait pu se conserver à travers les siècles. On le trouve dans des zones géographiques : Afrique du Sud, Zaïre, Russie, Brésil, Australie, etc. Les plus beaux diamants (les plus grands et exempts de défauts) sont destinés à la joaillerie. En 1977, la production mondiale a été de 8t dont 26% pour la joaillerie, le reste étant destiné à l'industrie.

Les propriétés remarquables du diamant naturel en tant qu'outil de coupe (tableau I.1) sont les suivantes :

- C'est le plus dur des matériaux connus
- Sa résistance à la compression est très supérieure à celles des autres matériaux :
- Son coefficient de dilatation thermique ($3,1 \times 10^{-6}.K^{-1}$), plus faible que celui des autres matériaux d'outils, lui confèrent une excellente résistance aux chocs thermiques
- Sa conductivité thermique, la plus élevée de tous les matériaux **600** à $2000W.m^{-1}.K^{-1}$ facilite l'évacuation de la chaleur de la zone de coupe si bien qu'un diamant qui vient d'usiner paraît froid au toucher.

Par contre, sa résilience est faible, ce qui le rend très sensible aux chocs mécaniques. Sa haute dureté, liée à sa structure atomique particulière, n'est pas la même dans tous les plans. Il se clive suivant quatre directions, ce qui le rend fragile.

I.5.2.7.2. Diamant synthétique

Les premiers furent réalisés en Suède en 1953 par VonPlaten, puis en 1954 par Hall aux États-Unis, en soumettant du graphite à des températures et pressions très élevées. Les cristaux obtenus étaient petits ($< 0,5 \text{ mm}$) et servaient à la fabrication de meules en diamant synthétique.

La production est actuellement forte : de 22 t/an en 1986, elle a peu évolué jusqu'en 1995, date à laquelle la production semble s'être accélérée. Pour obtenir des cristaux plus grands, les durées de production sont excessives ($> 50 \text{ h}$ de synthèse pour créer un monocristal de 1 carat), le diamant naturel est alors plus rentable.

I.6. Revêtement des outils de coupe

Le revêtement des outils coupants est un procédé fréquent en usinage notamment avec l'usinage à grande vitesse (**UGV**). Ce procédé permet d'améliorer la performance des outils dans le but de lutter contre les problèmes résultants de l'usinage notamment les températures élevées.

Le choix d'un revêtement spécifique se base sur 4 points :

- ***La résistance aux températures*** : En usinage, le frottement outil/pièce ou outil/copeau produit de la chaleur sur la partie supérieure de la pièce. Le revêtement doit constituer un barrage thermique afin de réduire la propagation de la chaleur dans le substrat (matière de l'outil sous le revêtement), sous peine de voir se déformer l'outil et son revêtement.

Notons que la température qui a le plus grand intérêt n'est pas la température de fusion du revêtement mais d'oxydation. Il s'agit d'une réaction chimique à l'oxygène qui détériore les propriétés du revêtement. Ainsi, le revêtement *TiCN* ne fond qu'à partir de 3000°C , mais s'oxyde à partir de 400°C .

- ***La dureté*** : Capacité de résistance d'un revêtement à la déformation, c'est-à-dire à l'usure. Elle est mesurable grâce à la dureté Rockwell C: *HRC*. Cela permet la comparaison entre les divers revêtements. Ainsi le *TiN* possède généralement une

dureté de 80 HRC. La dureté indiquée est celle de l'outil à température ambiante. Elle diminue en cas d'augmentation de la température, comme lors de l'usinage.

- ***Le coefficient de friction*** : Il résulte notamment du frottement de l'outil avec la matière. Quand ce coefficient est modéré, la chaleur est basse et l'évacuation des copeaux est aisée, ce qui évite le problème d'adhérence. Utile lors d'un travail sur de l'aluminium ou du cuivre, pour éviter que leurs copeaux ne collent à l'outil. La qualité de finition (aspérités...) de la surface du revêtement et à fortiori de son substrat, joue un rôle dans la baisse de ce coefficient
- ***La réactivité chimique*** : La pression et la température peuvent entraîner un phénomène de diffusion. C'est une réaction chimique provoquant un transfert de matière qui tend à égaliser le potentiel chimique. En résumé, les atomes d'un matériau seront absorbés par un autre matériau. Ex : il ne faut pas usiner de l'acier carbone avec un outil revêtu de diamant. Ce dernier est chargé à 100% d'atome de carbone, contrairement à l'acier qui en contient moins. Le phénomène de diffusion provoquera une détérioration du revêtement à cause du transfert des atomes de carbone de l'outil sur les copeaux.

Les revêtements, généralement épais de quelques micromètres, se déclinent en quatre types principaux, chacun présentant des caractéristiques propres :

TiN : revêtement (en nitrure de titane) caractérisé par une bonne résistance à l'usure à un coût réduit.

TiCN : revêtement (en carbonitrure de titane) caractérisé par une grande dureté, recommandé pour l'usinage des matériaux difficiles. L'usure due au frottement de l'outil contre la matière lors de l'usinage (l'abrasion) est limitée.

TiAlN: revêtement (en nitrure de titane aluminium) résistant aux fortes températures, il est destiné à un usinage grande vitesse. Haute performance de coupe et productivité accrue. Il assure une plus grande durée de vie de l'outil. :

Diamant : revêtement possédant une dureté très importante. Il assure un état de surface excellent dans les pièces usinées. Revêtement recommandé pour l'usinage des graphites, plastiques renforcés et alliages d'aluminium à fort taux de silicium.

Conclusion

Les outils coupants jouent un rôle fondamental dans de nombreux domaines, notamment en usinage, l'artisanat et la construction. Leur efficacité repose sur leur capacité à retirer de la matière avec précision, garantissant ainsi des finitions de qualité et une productivité optimale, les outils coupants sont indispensables pour façonner divers matériaux avec précision. Une utilisation maîtrisée, associée à un bon entretien et au respect des normes de sécurité, permet d'en maximiser l'efficacité et la durabilité [32].

Chapitre II

Description et dimensionnement de l'outil de moletage

II.1. Introduction

Le moletage mécanique est un procédé d’usinage effectué sur un tour, consistant à transformer la surface d’une pièce cylindrique en y créant des motifs en relief. Ces motifs ont une double fonction : esthétique et fonctionnelle. Ils augmentent l’adhérence des poignées et boutons, tout en facilitant l’ajustement lors de montages serrés.

L’opération débute lorsque l’outil de moletage est appliqué contre la pièce métallique en rotation, provoquant le déplacement de la matière et formant ainsi une série de crêtes et de rainures. Pour obtenir un motif régulier et conforme aux dimensions souhaitées, plusieurs éléments doivent être soigneusement contrôlés : la position de l’outil, la pression appliquée, la vitesse de déplacement, ainsi que les conditions ambiantes, comme l’humidité.

Une bonne maîtrise de ces paramètres permet d’éviter des défauts tels qu’un mauvais sens de déplacement ou une pression inégale, qui nuiraient à la qualité de la surface moletée [33].

II.2. Définition du moletage

Le moletage est une technique d’usinage qui consiste à réaliser des stries sur la surface totale ou partielle d’une pièce. Si le terme moletage désigne le procédé d’usinage, il désigne également les petites stries qui en résultent. La réalisation d’un moletage permet d’améliorer l’adhérence d’une pièce pour en faciliter sa manœuvre ou son adhérence avec un autre composant, mais elle peut tout aussi bien être simplement décorative.

Cette opération est généralement réalisée sur un tour mécanique, à l’aide de différents outils de moletage adaptés à la pièce que le tourneur souhaite usiner[34].



Figure II.1 : Moletage d’une pièce

II.3. Types d'outils de moletage

Les outils de moletage possèdent une gamme de motifs et de formes ainsi que des outils spécialement conçus pour chaque travail. Voici les principaux types d'outils de moletage [35]:

II.3.1. Outils de moletage à une seule roue

Les outils de moletage à une seule roue comportent une seule roue en acier trempé et placée sur un support. Ils conviennent mieux aux applications légères et peuvent créer des motifs de molettes droits, en diamant ou irréguliers. Généralement, ils sont utilisés dans la production finement détaillée de petites pièces. Certains paramètres techniques incluent :

- Diamètre de la roue : 20-25 mm
- Largeur de roue : 6-8 mm
- Dureté de la pointe : HRC 58-62



Figure II.2 : Outils de moletage à une seule roue

II.3.2. Outils de moletage multi-roues

Ces outils sont dotés de plusieurs molettes (généralement par paires) et sont conçus pour un usage plus intensif. Les forces de coupe sont réparties de manière égale sur la pièce, réduisant ainsi la flexion de la pièce et l'usure de l'outil. Ils ont tendance à être utilisés avec des pièces plus grandes dans les secteurs de l'industrie lourde. Les paramètres techniques les plus importants impliqués ici sont les suivants :

- Largeur totale de l'outil : 15-25 mm
- Diamètre de la roue : 20-30 mm
- Matière: Acier à haute vitesse ou carbure



Figure II.3 : Outils de moletage à double roue



Figure II.4 : outils de moletage à roue unique avec molettes



Figure II.5 : Outils de moletage par fraisage

II.3.3. Outils de moletage à changement rapide

Grâce aux outils de moletage à changement rapide, les utilisateurs peuvent facilement changer les molettes sans démonter l'ensemble de l'outil lui-même, ce qui le rend idéal pour les environnements de fabrication où différents styles peuvent être nécessaires pour divers composants. Les paramètres clés impliquent :

- Temps de changement : moins de 1 minute
- Compatibilité : prend en charge plusieurs normes de molette.
- Matériau : Acier à outils trempé.



Figure II.6 : Outils de moletage à changement rapide

II.3.4. Outils de moletage interne

Les surfaces moletées internes telles que celles trouvées sur les bagues et les manchons peuvent être créées à l'aide de molettes internes qui fournissent cette adhérence requise ou modifient simplement leur apparence. Lorsqu'on parle de ces instruments, ils font généralement référence à certains paramètres tels que :

- Diamètre de la tige de l'outil : 10–20 mm
- Diamètre de la roue : 12-15 mm
- Dureté de la pointe : HRC 63-65



Figure II.7 : Outils de moletage interne

Ainsi, chaque type d'outil de moletage possède ses propres caractéristiques techniques qui le rendent adapté à différents types de travaux de moletage. Les fabricants peuvent choisir l'outil le plus adapté à leurs besoins en examinant ces spécifications et obtenir ainsi des résultats cohérents et de haute qualité.

II.4. Méthodes d'usinage d'un moletage

Le moletage en usinage peut être réalisé principalement par deux méthodes distinctes : le moletage par déformation et le moletage par coupe [36] :

II.4.1. Moletage par Déformation

Le moletage par déformation est la méthode la plus couramment utilisée. Dans cette méthode, l'outil de moletage est pressé contre la surface de la pièce en rotation, provoquant une déformation plastique de la surface pour créer le motif.

II.4.2. Moletage par enlèvement de matière

Le moletage par coupe, bien que moins courant, est utilisé pour des matériaux plus durs ou lorsque des tolérances dimensionnelles plus strictes sont nécessaires. Dans cette méthode, l'outil de moletage enlève le matériau de la surface de la pièce pour créer le motif.

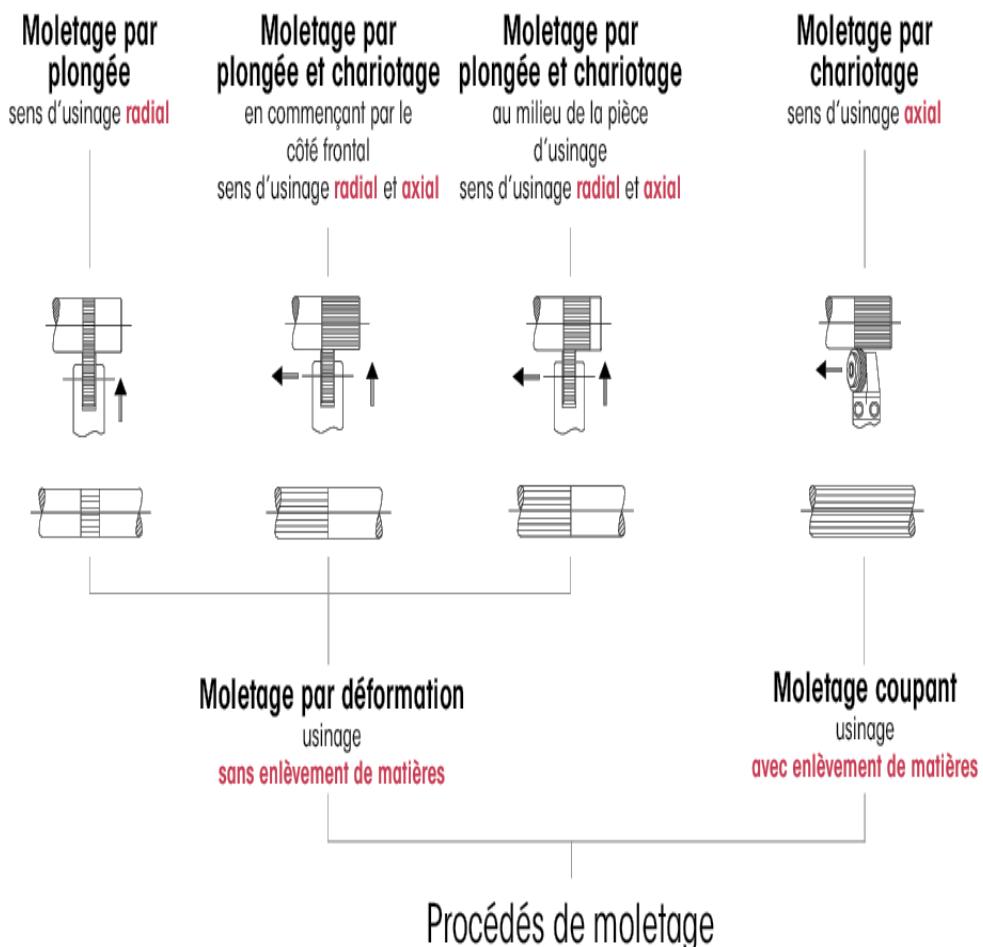


Figure II.8 : Les procédés de moletage

II.5. Différentes techniques de Moletage

Il existe plusieurs techniques de moletage que les machinistes peuvent utiliser pour créer différents motifs et textures sur leurs pièces. Certaines des techniques les plus courantes incluent [37] :

II.5.1. Moletage droit (également connu sous le nom de moletage standard) cette technique consiste à faire rouler une seule roue à motif droit le long de la pièce, créant une série de crêtes parallèles. Le résultat est une texture uniforme et linéaire qui offre une prise sûre.

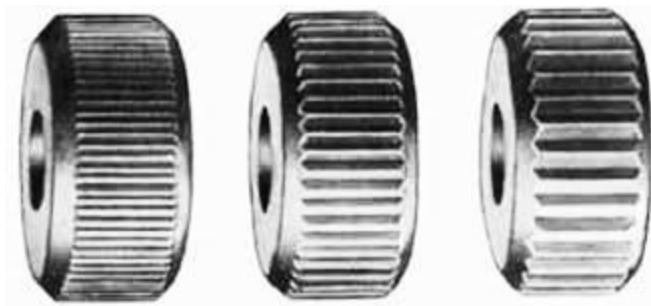


Figure II.9 : Molettes droit

II.5.2. Moletage diagonal : Le moletage diagonal est obtenu en utilisant deux meules avec des motifs diagonaux opposés. Les meules sont pressées simultanément contre la pièce, créant un motif entrecroisé. Cette technique produit une texture plus agressive que le moletage droit, offrant une prise encore plus sûre.



Figure II.10 : Molettes diagonales à gauche



Figure II.11 : Molettes diagonales à droite

II.5.3. Moletage diamanté : Cette technique, également connue sous le nom de moletage croisé, consiste à utiliser deux meules avec des motifs diagonaux correspondants. Lorsqu'elles sont pressées contre la pièce, les meules créent un motif en forme de losange. Le moletage au diamant est souvent considéré comme la plus attrayante et la plus attrayante des trois techniques et offre une excellente prise en main.



Figure II.12 : Molettes diamantées femelles



Figure II.13 : Molettes diamantées mâles

II.6. Les paramètres concernés d'un moletage [38]

II.6.1. Forme du moletage

La forme du moletage, lors d'une section perpendiculaire aux dents de la molette, décrit les paramètres de moletage (voir **Figure II.14**).

La forme de la rainure du moletage est définie par la section transversale à la rainure

d : Diamètre avant moletage

d_1 : Diamètre du moletage fini

P : Pas

θ : Angle de profil, en degrés

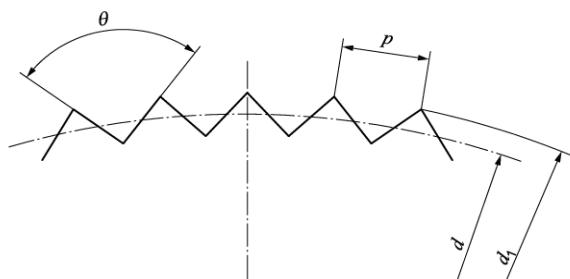


Figure II.14 : Forme et côtes du moletage

II.6.2. Valeurs nécessaires du moletage

➤ Angle de profil

L'angle de profil doit être de **90°** (voir Figure II.14).

➤ Pas diamétral P

Le pas P , doit être choisi dans la liste suivante pour éviter une multitude inutile d'outils.

0,4 mm 0,5 mm 6,3mm 0,6 mm 0,8 mm 1,0 mm 1,2 mm 1,6 mm

➤ Diamètres du moletage

Le diamètre nominal indiqué sur le dessin doit être le diamètre extérieur d_1 du moletage fini.

Le diamètre d'avant moletage est plus petit.

Les diamètres d ou d_1 peuvent être calculés à l'aide des formules suivantes:

➤ Chanfrein *c*

La valeur de cote du chanfrein c , doit être choisie conformément à l'équation :

c = P, si b ≥ 6 mm

Où

P : Est le pas diamétral.

b : Est la largeur.

Si la largeur ***b*** est inférieure à **6 mm**, ***c*** doit être indiquée et doit être inférieure à ***P***.

Un rayon peut être choisi plutôt qu'un chanfrein.

➤ Données de moletage

Des recommandations sont fournies dans le (**Tableau II.1**) concernant les données préférentielles et les relations préférentielles entre le diamètre d_1 , le pas diamétral P et la largeur de l'élément moleté b .

Dimensions en millimètres

Diamètre extérieur <i>d</i> ₁		Pas <i>p</i> pour une largeur <i>b</i>				
supérieur à	inférieur ou égal à	2 à 4	de 4 à 8	de 8 à 16	de 16 à 32	supérieure à 32
—	Ø3	0,4	0,4	0,5	—	—
Ø3	Ø6	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6
Ø6	Ø10	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8
Ø10	Ø20	0,6	0,6	0,8	1	1
Ø20	Ø30	0,6	0,8	0,8	1	1
Ø30	Ø60	0,8	0,8	1	1,2	1,2
Ø60	Ø100	0,8	1	1,2	1,2	1,6
Ø100	—	—	1	1,6	1,6	1,6

Tableau II.1 : Relation entre les données de moletage

II.7. Les calculs de moletage

Avant de se plonger dans les détails du processus de moletage, il est crucial de comprendre les calculs et les formules impliqués. Ces calculs aident à déterminer les spécifications de moletage appropriées pour votre pièce, garantissant un ajustement et une finition parfaits.

II.7.1. Calculs de pas

Le pas d'un moletage est la distance entre deux dents adjacentes sur l'outil de moletage. Pour calculer le pas, divisez la circonference de la pièce par le nombre de dents souhaitées. Le diamètre de la pièce à usiner doit être un multiple entier du pas pour assurer un bon engrènement de l'outil de moletage et de la pièce à usiner. Utilisez la formule suivante pour déterminer le diamètre correct de la pièce :

$$D = \frac{N \times P}{\pi}$$

Où D est le diamètre de la pièce, N est le nombre de dents et P est le pas.

II.7.2. Profondeur de coupe

La profondeur de coupe fait référence à la profondeur de pénétration de l'outil de moletage dans la surface de la pièce. Il est essentiel pour obtenir la texture et l'apparence souhaitées. Pour calculer la profondeur de la coupe, utilisez la formule suivante :

$$a_p = P \times (\tan \alpha / 2)$$

Où a_p est la profondeur de coupe, P est le pas et α est l'angle inclus des dents de l'outil de moletage.

II.8. Sélection et utilisation de la molette

Le choix de la molette est crucial pour déterminer la qualité et l'apparence de la molette finie. Voici quelques facteurs à prendre en compte lors du choix d'une molette [37]:

- **Motif :** choisissez une roue avec le motif souhaité, qu'il soit droit, diagonal ou en losange.
- **Pas :** Le pas, ou la distance entre les arêtes de la meule, déterminera l'espacement du motif sur la pièce. Sélectionnez un pas qui créera la texture et l'adhérence souhaitées sur le produit fini.
- **Matériau :** Le matériau de la meule doit être compatible avec le matériau de la pièce pour assurer un moletage régulier. Les matériaux courants des molettes comprennent l'acier rapide et le carbure.

Lors de l'utilisation d'une molette, il est essentiel de garder à l'esprit les conseils suivants :

- Utilisez toujours une meule nette et propre pour assurer un motif net et bien défini.

- Appliquer une pression constante et uniforme tout au long du processus de moletage.
- Surveillez la progression du moletage pour assurer une couverture et une profondeur uniformes

II.9. Guide étape par étape sur la façon de moleter sur un tour

Maintenant que nous avons couvert les bases, plongeons dans un guide étape par étape sur la façon de moleter sur un tour [39]:

- **Choisissez un outil de moletage approprié :** Pour obtenir le matériau approprié de la pièce et le motif requis, il est important de sélectionner un bon outil de moletage.
Assurez-vous que l'outil est toujours de bonne qualité pour donner un résultat parfait.
- **Fixez la pièce à travailler :** Montez solidement votre pièce à travailler sur le mandrin du tour afin d'empêcher son mouvement pendant l'opération. Alignez-le bien pour qu'il n'y ait pas de déviation du motif.
- **Régler la vitesse du tour :** Ajustez le tour pour qu'il tourne à basse vitesse, par exemple 50 à 300 tr/min. Cela garantira qu'il n'y aura pas de surchauffe et maintiendra également le motif de moletage cohérent.
- **Outil de positionnement:** Placez l'outil de moletage perpendiculairement à la pièce à travailler. Le placement correct de cet outil garantit une pression égale appliquée et un même design créé sur toute la surface.
- **Impliquez l'outil :** Poussez progressivement votre molette vers l'avant jusqu'à ce qu'elle entre en contact complet avec votre pièce à travailler. Appliquez une pression uniforme mais évitez d'appliquer trop de force pour éviter d'endommager ou de détruire l'une ou l'autre des pièces.
- **Utiliser du lubrifiant :** Pour éviter toute friction entre cet instrument de coupe et cette tâche, utilisez du liquide de coupe. Il vous aide à avoir une finition lisse et prolonge la durée de vie des couteaux.
- **Nourrir l'outil:** Continuez à déplacer cet instrument moleté avec une pression constante le long de votre composant, en vous assurant que les lignes droites à travers lesquelles il se déplace sont suivies par des outils permettant d'obtenir des motifs uniformes.
- **Modèle de vérification :** Éteignez la machine de temps en temps ; jetez un œil à la façon dont ce motif (incurvé) est uniforme ou inégal. Si quelque chose ne semble pas correct, des ajustements de la pression du rouleau peuvent être effectués ici ou bien repositionnés si nécessaire.

Paramètres techniques:

- **Matériel d'outil:** HSS/Carbure
- **Vitesse du tour :** 50-300 tr/min
- **Pression moletée:** Modéré et uniforme pour toute déformation de la pièce
- **Fluides de coupe :** Les lubrifiants appropriés dépendent du matériau (à base d'huile pour les métaux)

En suivant ces étapes, on peut contrôler les paramètres techniques et avoir un motif de moletage précis et uniforme sur sa pièce.

II.10. Applications du moletage dans diverses industries

Le moletage est utilisé dans une variété d'industries, y compris l'aérospatiale, l'automobile et l'électronique, pour n'en nommer que quelques-unes. Certaines applications courantes du moletage comprennent [40]:

Industrie	Application de moletage
Automobile	Pommeaux de levier de vitesses moletés, poignées de volant
Électronique	Boutons moletés pour panneaux de commande, interrupteurs
Industrie aérospatiale	Poignées moletées pour instruments, leviers de commande
Droit médical	Poignées moletées pour instruments chirurgicaux, outils dentaires
Pompe	Poignées moletées pour outils, composants de machines
Biens de consommation	Poignées moletées pour appareils de cuisine, appareils ménagers
Sports et loisirs	Poignées moletées pour équipement de sport, équipement de fitness
Bijoux	Textures moletées à des fins décoratives
Militaire/Défense	Poignées moletées pour armes à feu, équipement tactique
Marine	Boutons moletés pour équipement marin, poignées pour accessoires nautiques

Tableau II.2 : Applications de moletage triées par industrie

II.11. Défauts et problèmes courants de moletage [41]

- **Double moletage :** Le moletage double se produit lorsque l'outil de moletage crée des motifs superposés au lieu d'un motif unique et continu. Ce problème survient souvent en

raison d'un mauvais alignement de l'outil de moletage, d'une application incorrecte de la pression ou d'un contact initial incorrect avec la pièce.

- **Mauvaise définition du modèle :** Un motif moleté peut être peu profond, irrégulier ou incomplet, ce qui entraîne une mauvaise définition du motif. Ce défaut est généralement dû à une pression insuffisante, à des molettes émoussées ou endommagées ou à l'utilisation d'un outil inapproprié pour le matériau.
- **Bavardage sur les outils :** Le broutage de l'outil se manifeste par des vibrations lors du moletage, ce qui entraîne un motif rugueux et irrégulier. Les causes courantes incluent un réglage d'outil lâche, une vitesse de broche excessive ou un support d'outil inadéquat.
- **Chevauchement de motifs :** Le chevauchement des motifs se produit lorsque le motif de moletage se chevauche, créant une texture déformée ou irrégulière. Cela peut être dû à un diamètre de pièce incorrect, à une vitesse d'avance incorrecte ou à un placement d'outil incorrect.
- **Déformation du matériau :** Une pression excessive, un matériau de pièce inadapté ou des outils de moletage incorrects peuvent entraîner une déformation ou une compression excessive du matériau de la pièce pendant le processus de moletage.
- **Hauteur de motif incohérente :** Les variations de pression de l'outil, la rotation inégale de la pièce ou le mouvement irrégulier de l'outil peuvent entraîner un pas de motif incohérent, entraînant un espacement irrégulier entre les lignes moletées.
- **Fissuration superficielle :** Cela se produit lorsque des fissures se forment sur la surface de la pièce pendant le moletage. Ce problème est souvent dû à une force excessive, à un matériau de pièce cassant ou à une lubrification inadéquate.

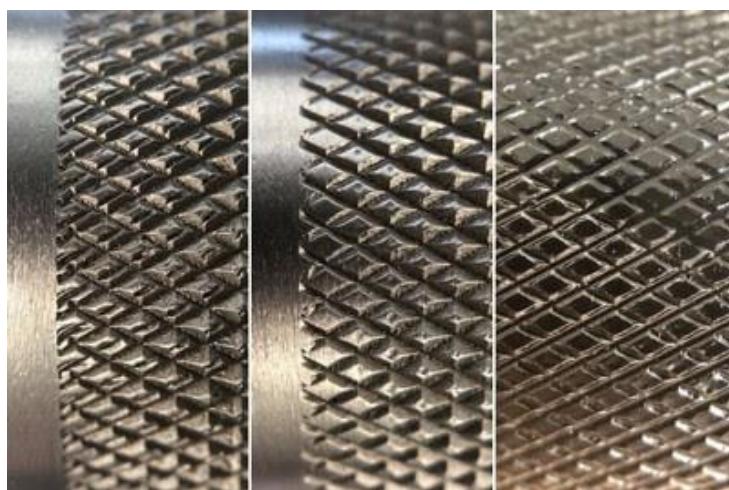


Figure II.15 : Défauts courants de moletage

II.12. Conception de l'outil à moleter

➤ Porte molette

L'outil de moletage est généralement fixé sur le tour pour usiner des pièces cylindriques. Le porte-molette est donc conçu avec des dimensions compatibles avec celles du porte-outil du tour.

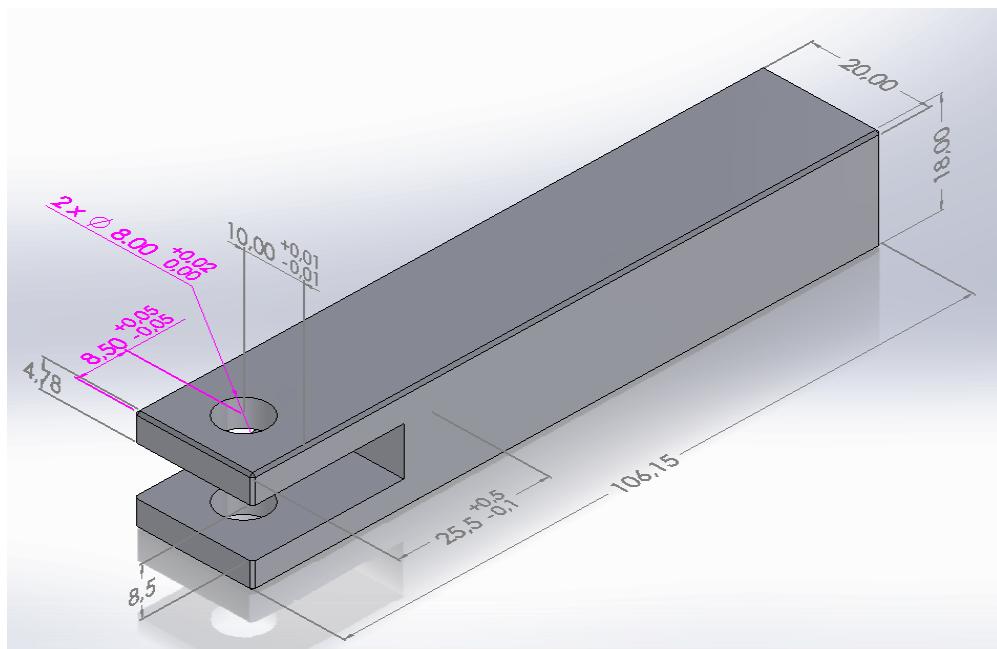


Figure II.16 : Porte molette

➤ Axe de molette

L'axe du porte-molette doit avoir un diamètre suffisant pour résister au cisaillement, tandis que sa longueur doit rester contenue dans les limites du support, à l'exception d'un léger débord autorisé pour fixer les clips

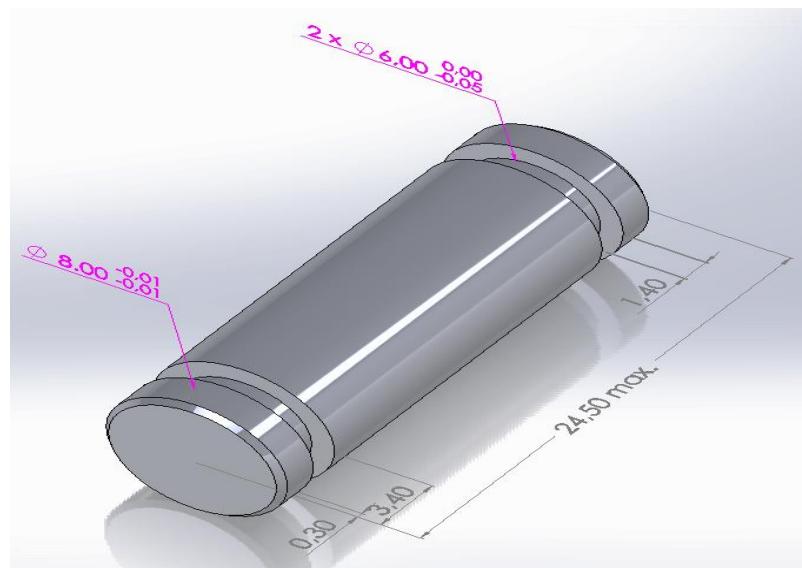


Figure II.17 : Axe de molette

➤ Molette droit

La molette a une largeur de $8^{+0,1}_{-0,1}$ afin de diminuer l'effort de coupe et d'assurer une taille compacte. Son diamètre, limité à $26,5^{+0,1}_{-0,1}$, s'adapte à la majorité des besoins de découpe.

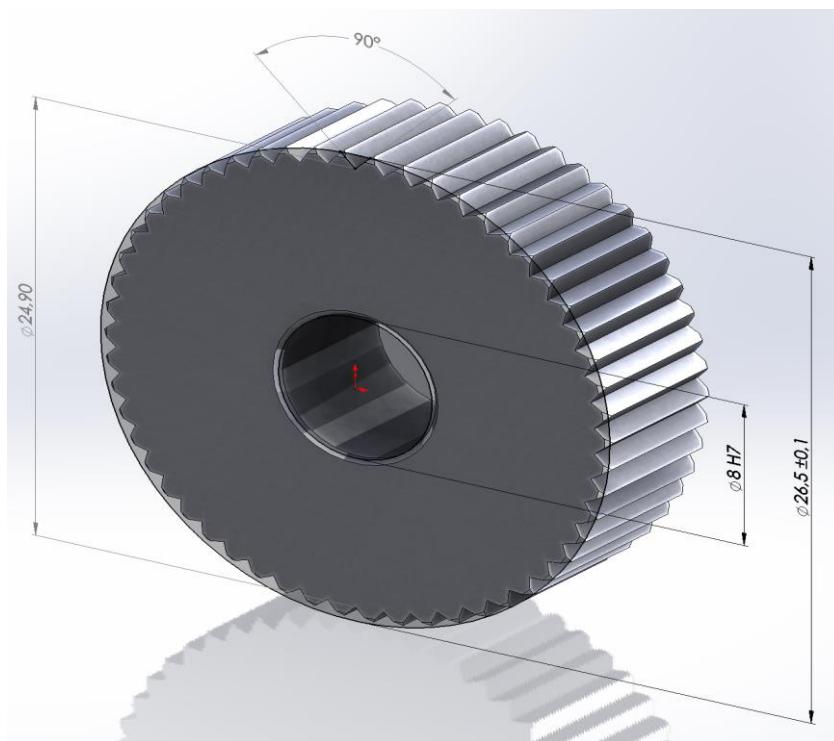


Figure II.18 : Molette droit

II.13. Mode opératoire pour la division d'une molette

❖ Rappel

L'appareil diviseur est un accessoire particulièrement intéressant qui permet d'étendre sensiblement les possibilités technologiques des fraiseuses. Il sert à indexer des rotations avec une très grande précision et de diviser une pièce en parties égales dans le fraisage, le perçage, la rectification des pièces telles que les engrenages, les crémaillères, les arbres cannelés, les pièces carrées, hexagonales etc. Il peut également servir à faire tourner la pièce à une vitesse pré-déterminée par rapport à l'avance de la table pour l'usinage des cames, des goujures hélicoïdales, des pignons hélicoïdaux, etc. [42]

➤ Calcule l'évolution de manivelle de diviseur :

Il existe trois méthodes de division : simple, composée, différentielle.

➤ Application

Soit exécuter 54 encoches, $K = 60$

Application la formule $\frac{K}{N}$

N : Nombre de division

K : Rapport du diviseur (D'après ce que nous avons dans l'atelier du diviseur $K = 60$)

- Soit $K = 60, N = 54$ encoches $\frac{K}{N} = \frac{60}{54} = \frac{10}{9} = 1 \frac{1}{9}$ tours de manivelle
- Il faut chercher dans les plateaux disponibles celui qui comporte au moins une rangée dont le nombre de trous est multiple de **9**. Par exemple, plateau **N° 2** rangée de **18** trous ($9 \times 3 = 27$)
- Il faut régler l'écartement des branches de l'alidade pour apprécier $\frac{1}{9}$ de tour, c'est à dire $\frac{3}{27}$ de tour.
- Situer le pointeau sur le départ de la rangée de **27** trous, placer la branche **A** en appui contre le pointeau, compter **3** intervalles donc **4** trous, placer la branche **B** au **4^e** trou, bloquer l'alidade, vérifier, exécuter le premier encoche.
- Dégager le pointeau, faire **1** tours comptés en **A**, venir engager le pointeau au **4^e** trou en appui sur **B** (position **U**).
- Déplacer l'alidade (de façon à situer la branche **A** en position **U**), et exécuter le **2^{ème}** encoche.
- le cycle recommence au point de départ.

II.14. Traitement Thermique de molette

Pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques de molette, nous devons choisir un traitement thermique, notamment la trempe, pour remplir au mieux sa fonction.

- D'après l'acier **X 36 Cr Mo 17**
- Choix de température de la trempe **950C°-1000C°**
- Le temps de maintien **$\frac{1}{2}$ heure**
- Refroidissement en **eau**

❖ Trempe

Après chauffage et maintien, les pièces sont soumises à un refroidissement selon le mode approprié, dont la vitesse est réglée par le milieu de trempe utilisé, refroidissement qui peut se faire en air calme, air soufflé, dans l'huile, en bains de sels, ... etc. Et suivant les alliages des pièces et les caractéristiques recherchées. Pour obtenir une trempe efficace, on est amené à chauffer le métal à une température assez élevée jusqu'au domaine austénitique[43].

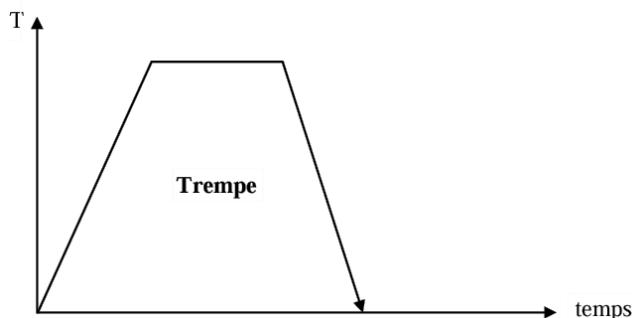


Figure II.19 : Cycle thermique lors d'une trempe

❖ Cycle d'un traitement thermique

En générale le traitement thermique comprend trois étapes :

- Un chauffage jusqu'à une température qui dépend de types de traitement voulu.
- Maintient isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.

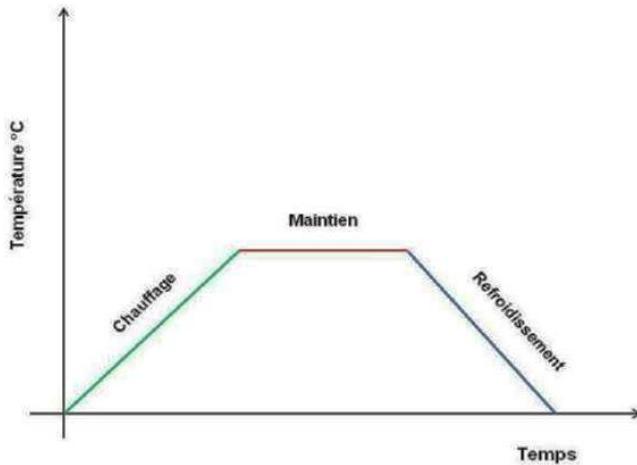


Figure II.20 : Cycle de traitement thermique

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué le processus de conception de notre outil qui est la partie essentielle c'est avant chaque réalisation il y a une conception.

Nous avons expliqué les différentes parties qui composent notre outil « molette » avec de détail, comme on a parlé sur le choix des paramètres de divisions (striées) nécessaires à la réalisation, également nous avons mis en considération la partie traitement thermique de la partie active car il joue un rôle important et un facteur essentiel pour la longévité et la durabilité (durée de vie longue).

Le choix des matériaux qui composent notre outil a été faite d'après les conditions auxquelles travail l'outil, et selon les normes de fabrication. Pour cela un chapitre de calcul R.D.M est fait, donc ce choix n'est pas aveugle.

Comme pour tout procédé d'usinage, le moletage présenta un certains défauts qui dépendent de plusieurs facteurs tels que la précision de la machine, la structure de matériaux de l'outil et de la pièce, ainsi que le degré d'habileté de l'ouvrier opérateur.

Chapitre III

Calculs de

La résistance des

matériaux

III.1. Introduction

Le moletage à la machine est réalisé en poussant un groupe de roues dures, appelées outils de moletage, contre la surface d'une pièce en rotation. Cette procédure utilise généralement un tour, tandis que les dispositifs de moletage gravent des motifs récurrents tels que des lignes droites, diagonales ou en forme de losange sur la surface du matériau. Cette opération nécessite l'application d'une forte pression sur la pièce. La contrainte exercée par la molette dépasse généralement la limite élastique du matériau usiné. En revanche, l'outil subit également une contrainte équivalente de la part de la pièce, ce qui influence sa dureté et sa résistance à l'usure.

La conception de l'outillage doit tenir compte de plusieurs paramètres pour résister aux contraintes et charges imposées. Parmi ces facteurs critiques figurent le choix du matériau de la pièce, la méthode de moletage employée et les conditions d'usinage. En départ, ce procédé commence principalement par le calcul des forces de coupe ou des forces de déformation plastique [44,45].

III.2. Calcule de l'effort de coupe en moletage

$$F_c = P \times A \quad [46]$$

Où

P : Pression spécifique de moletage

La pression spécifique dépend :

- De la matière de la pièce (plus la matière est dure, plus la pression est élevée).
- Du type de motif (moletage droit, croisé, diamant, etc.).
- De l'état de surface initial.

Valeurs indicatives (à ajuster selon les conditions réelles) :

Matériau	Pression spécifique P (MPa)
Acier doux ($C < 0.3\%$)	300 – 600
Acier dur	600 – 1200
Aluminium (série 1000-6000)	100 – 300
Laiton, Cuivre	150 – 400
Inox (304, 316)	700 – 1500

Tableau III.1 : Valeurs indicatives [47]

A : Surface de contact

La surface de contact dépend :

- De la largeur de molette (L).
- De la profondeur d'empreinte (h).

Donc l'expression de l'effort de coupe devient :

$$F_c = P \times L \times h$$

Dans la conception des pièces mécaniques, en particulier celles exposées à des charges et des contraintes importantes, on évalue la résistance au cisaillement ou à la flexion en tenant compte des conditions les plus extrêmes d'utilisation

On prend :

$$P = 1200 \text{ MPa} \text{ (Le cas de l'acier dur)}$$

$$L = 8 \text{ mm} \text{ (Largeur de molette)}$$

$$h = 0.3 \text{ mm} \text{ (} 0.04 < h < 0.3 \text{)}$$

$$F_c = 1200 \times 8 \times 0.3 = 2880 \text{ N}$$

Puisque le diamètre de l'axe calculé, doit être supérieur ou égale **3,41mm** donc, le choix de diamètre **7,95mm** est vérifié l'effort tranchant.

III.3. Calculer l'effort tranchant et Moment fléchissant

- Schéma statistique réel : **A** et **B** : Appui simple

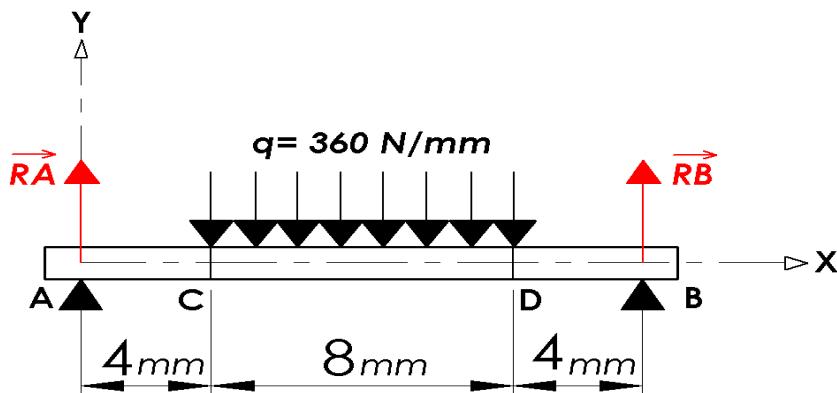


Figure III.1 : Schéma statistique réel

- Schéma statistique équivalente

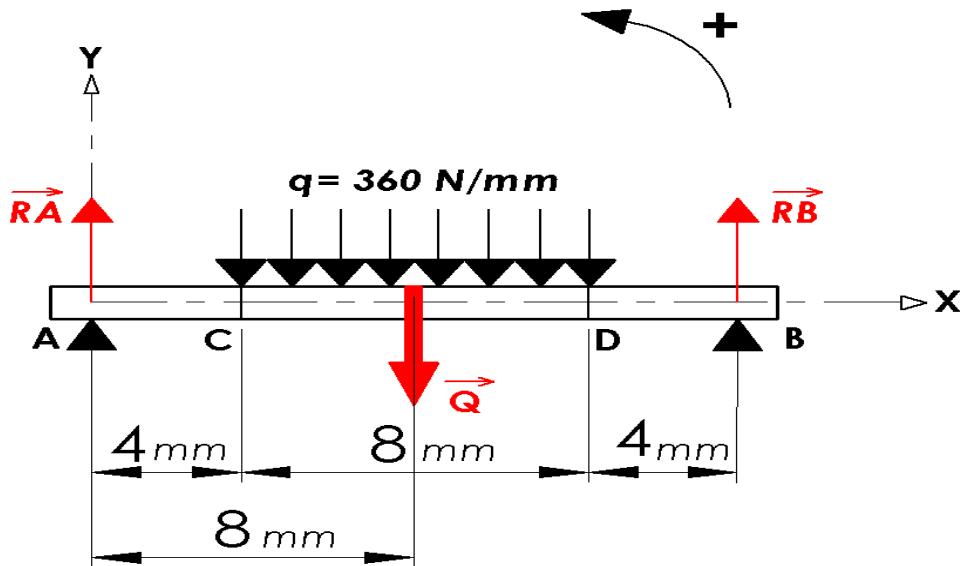


Figure III.2 : Schéma statistique équivalente

- Charge équivalente : $Q = q \cdot L$

$$Q = 360 \times 8 = 2880 \text{ N}$$

- Principe fondamental de la statistique [48]

$$\sum \overrightarrow{F(F_{ext})} / ox = \vec{0}$$

$$\sum \overrightarrow{F(F_{ext})} / oy = \vec{0}$$

$$\sum \overrightarrow{M(F_{ext})} / A = \vec{0}$$

- Calcul des réactions aux appuis $\overrightarrow{R_A}$ et $\overrightarrow{R_B}$

-Projection suivant (Ay) :

$$\sum \overrightarrow{F(F_{ext})} / oy = \vec{0} \rightarrow R_A^y - Q + R_B^y = 0 \quad \rightarrow 1$$

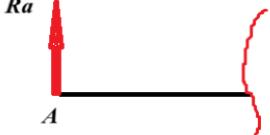
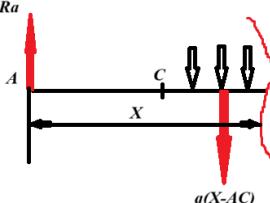
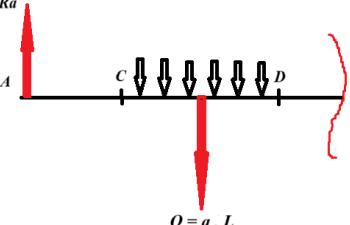
$$\sum \overrightarrow{M(F_{ext})} / A = \vec{0} \rightarrow M(R_A^y / A) + M(Q / A) + M(R_B^y / A) = 0 \quad \rightarrow 2$$

$$2 \Rightarrow 0 - Q \cdot 8 + R_B \cdot 16 = 0$$

$$R_B^y = \frac{Q \cdot 8}{16} = \frac{2880 \cdot 8}{16} = 1440 \text{ N}$$

$$1 \Rightarrow R_A^y = Q - R_B^y = 2880 - 1440 = 1440 \text{ N}$$

III.3.1. Diagramme des efforts tranchants

Zone	Schéma	Equation et valeur
AC		$T = -R_A$ $T = -1440 \text{ N}$
CD		$T = -[R_A - q(X - AC)]$ En C: $X = 4 \rightarrow T = -1440 \text{ N}$ En D: $X = 12 \rightarrow T = 1440 \text{ N}$
DB		$T = -(R_A - Q)$ $T = 1440 \text{ N}$

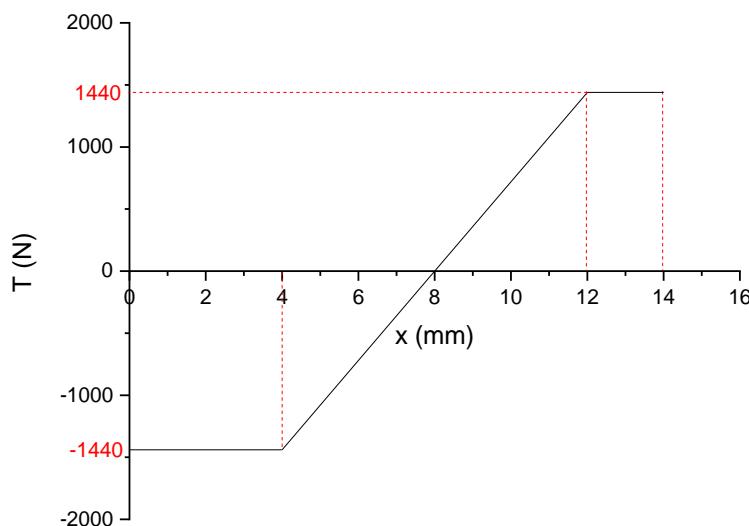


Figure III.3 : Diagramme des efforts tranchants

III.3.2. Diagramme des moments fléchissant

Zone	Schéma	Equation et valeur
AC		$M_f = -(-R_A \cdot X)$ <p>En A: $X = 0 \rightarrow M_f = 0 \text{ N} \cdot \text{mm}$</p> <p>En C: $X = 4 \rightarrow M_f = 5760 \text{ N} \cdot \text{mm}$</p>
CD		$M_f = -[-R_A \cdot X + q(X-4)(\frac{X-4}{2})]$ $M_f = (R_A \cdot X) - \frac{q}{2}(X-4)^2$ <p>En C: $X = 4 \rightarrow M_f = 5760 \text{ N} \cdot \text{mm}$</p> <p>En D: $X = 12 \rightarrow M_f = 5760 \text{ N} \cdot \text{mm}$</p> <p>Extrémum :</p> $M_f = R_A - q(X-4)$ $R_A = (X-4)$ $X = \frac{R_A}{q} + 4$ $X = 8 \text{ mm}$ <p>pour X = 8 mm :</p> $M_f = 8640 \text{ N} \cdot \text{mm}$
DB		$M_f = -[-R_A \cdot X + q \cdot L(X-8)]$ $M_f = R_A \cdot X - Q(X-8)$ <p>En D: $X = 12 \rightarrow M_f = 5760 \text{ N} \cdot \text{mm}$</p> <p>En B: $X = 16 \rightarrow M_f = 0 \text{ N} \cdot \text{mm}$</p>

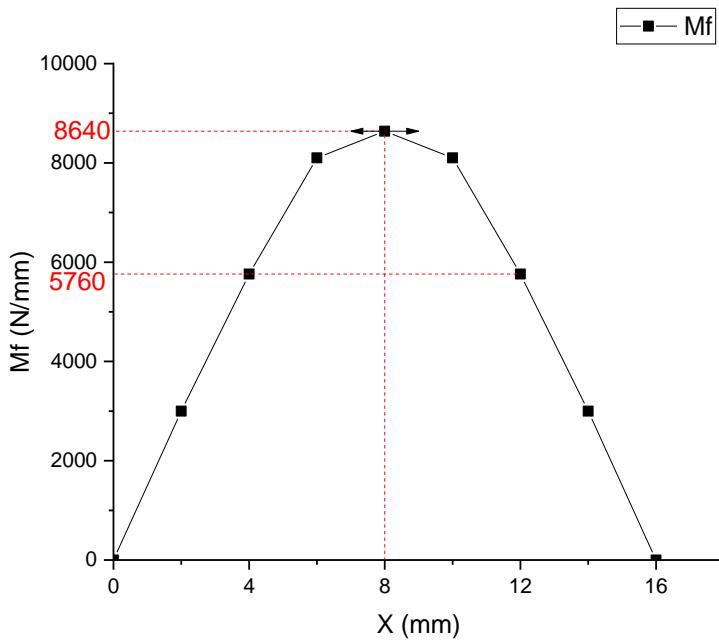


Figure III.4 : Diagramme des moments fléchissant

III.4. Contrainte normale maximale σ_{Max} :

$$\sigma_{Max} = \frac{Mf_{Max}}{\frac{IG_z}{\rho}} \leq Rp [49]$$

σ_{Max} : la valeur de contrainte de la fibre étudiée

$\frac{IG_z}{\rho}$: Module de flexion (mm³)

IG_z : Moment quadratique (mm⁴)

ρ : La position de la fibre étudiée

$$\sigma_{Max} = \frac{Mf_{Max}}{\frac{IG_z}{\rho}} = \frac{Mf_{Max} \cdot \rho}{IG_z}$$

$$\rho = \frac{d}{2} \quad , \quad IG_z = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$\sigma_{Max} = \frac{Mf_{Max} \cdot \rho}{IG_z} = \frac{Mf_{Max} \cdot \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{64}} = \frac{Mf_{Max} \cdot 32}{\pi d^3} = \frac{8640 \cdot 32}{\pi \cdot 512}$$

$$\sigma_{Max} = 171.88 \text{ N/mm}^2$$

III.5. Vérifier la résistance de la poutre à la flexion

- Condition de la résistance :

Pour des raisons de sécurité, la contrainte normale due à la flexion doit rester inférieure à la résistance pratique Rp

On définit Rp par le quotient de la résistance élastique à l'extension Re par le coefficient de sécurité s [50].

$$\sigma_{Max} \leq Rp \quad \text{avec} \quad Rp = \frac{Re}{s}$$

Tel que :

Rp : La résistance pratique (en MPa ou N/mm^2)

Re : La résistance élastique à l'extension(en MPa ou N/mm^2)

s : Le coefficient de sécurité

$$Rp = \frac{590}{3} = 196.66 N/mm^2$$

$\sigma_{Max} < Rp$ Donc la poutre résiste à la flexion

III.6. Vérification du diamètre de l'axe

Étant donné que l'axe est exposé à des efforts de cisaillement, il est essentiel de contrôler son diamètre afin de s'assurer qu'elle puisse supporter les sollicitations mécaniques imposées..

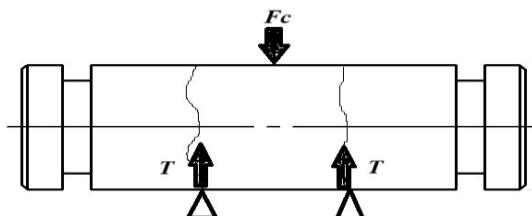


Figure III.5 : Axe est exposé à des efforts de cisaillement

$$\tau_{moy} = \frac{T}{A} \leq Rpg [51]$$

Où :

τ_{moy} : Contrainte de glissement N/mm^2

T : Effort tranchant N

A : Section de l'axe cisaillée

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Rpg : Résistance pratique au glissement N/mm^2

$$Rpg = \frac{Reg}{s}$$

Reg : Limite élastique au glissement N/mm^2

s : Coefficient de sécurité en mécanique de construction $S = 3 - 4$

Valeur de Reg [52]

Acier doux	$R_{eg} = 0,5 R_e$
Acier mi-dur	$R_{eg} = 0,7 R_e$
Acier dur	$R_{eg} = 0,8 R_e$

- Effort tranchant T dans la section cisaillée est **1440 N**

- Résistance pratique au glissement (Rpg) :

$$Rpg = \frac{Reg}{s}$$

- Type d'acier de l'axe : **(10 Ni Cr 6)**

- Résistance élastique au glissement (Reg) pour (acier dur): $Reg = 0,8 Re$

$$Re = 590 \text{ N/mm}^2 [5]$$

$$Reg = 0,8 \times 590 = 472 \text{ N/mm}^2$$

- Coefficient de sécurité (s): (s : varie 3 – 4)[52]

$$Rpg = \frac{Reg}{s}$$

$$Rpg = \frac{472}{3} = 157,33 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{T}{A} \leq Rpg$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\frac{T}{\frac{\pi d^2}{4}} \leq Rpg \Rightarrow \frac{4T}{\pi d^2} \leq Rpg$$

$$d^2 \geq \frac{4 \cdot T}{\pi \cdot Rpg} \Rightarrow d \geq \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi \cdot Rpg}}$$

$$d \geq 3,414 \text{ mm}$$

Puisque le diamètre de l'axe calculé, doit être supérieur ou égale **3,41mm** donc, le choix de diamètre **7,95 mm** est vérifié l'effort tranchant.

Conclusion

Comme toute procédé de calcule il y a des hypothèses relatives à ce calcule. Pour nous nous avons mets en considération ce qui suit :

- Le matériau doit être homogène et isotrope.
- La géométrie du solide doit valider les éléments suivants :
 - * La ligne moyenne passant par les différents centres de gravité G des sections est droite ou à grand rayon de courbure.
 - * Les sections droites S sont constantes ou varient faiblement et progressivement.
 - * La longueur est grande par rapport aux dimensions transversales.
 - * Un plan de symétrie longitudinal existe.
- Hypothèses de NAVIER-BERNOULLI :
 - * Les sections droites avant déformation restent droites après déformation.
 - * Les sections droites restent planes et perpendiculaires à la ligne moyenne.
- Hypothèse des petits déplacements : Les déformations doivent rester petites devant les déformations de la poutre.
- Hypothèse sur les charges : Les charges ne sont pas déplacées par les déformations.

D'après nos résultats, on peut dire que sont satisfaisants et proches du réel de l'industrie. Nous n'avons pas cherché à donner des exactitudes à nos calculs, mais de donner un aspect expérimental que scientifique.

Sachant que pour atteindre un niveau bien élevé de dimensionnement d'un produit, il faut mettre en évidence plusieurs conditions et moyens humains, scientifiques, et matériels.

Bref nous sommes fières de que nous avons fait, malgré les moyens ingrats [53].

Chapitre IV

Etude de fabrication, (gamme d'usinage)

de l'outil

IV.1. Introduction

L'usinage regroupe sous un même terme toutes les étapes de fabrication des pièces mécaniques composant les objets de notre quotidien. L'usinage d'une pièce mécanique fait appel à de nombreuses techniques diverses assistées ou non par ordinateur.

Nous proposons dans ce chapitre le processus de conception et de fabrication de l'outil molette. Dans notre cas, l'outil est à une seule molette dont il est composé – voir dessin explosé de la page suivante – de deux parties essentielles qui sont :

- Partie fixe : représente la porte molette **(1)** et ses accessoires : axes molette **(2)** et anneaux élastiques **(4)**.
- Partie mobile : représente la molette **(3)**.

Comme l'avons dit précédemment, que cette conception a été réalisé par le logiciel SolidWorks, les matériaux ont été choisies de ce qu'existe au marché local.

Pour la réalisation, nous avons mis en œuvre les moyens de fabrication nécessaires à un travail unitaire de 2 à 10 pièces par jour soit environ une cadence de 100 pièces/ans.

Les moyens sont respectivement comme suit :

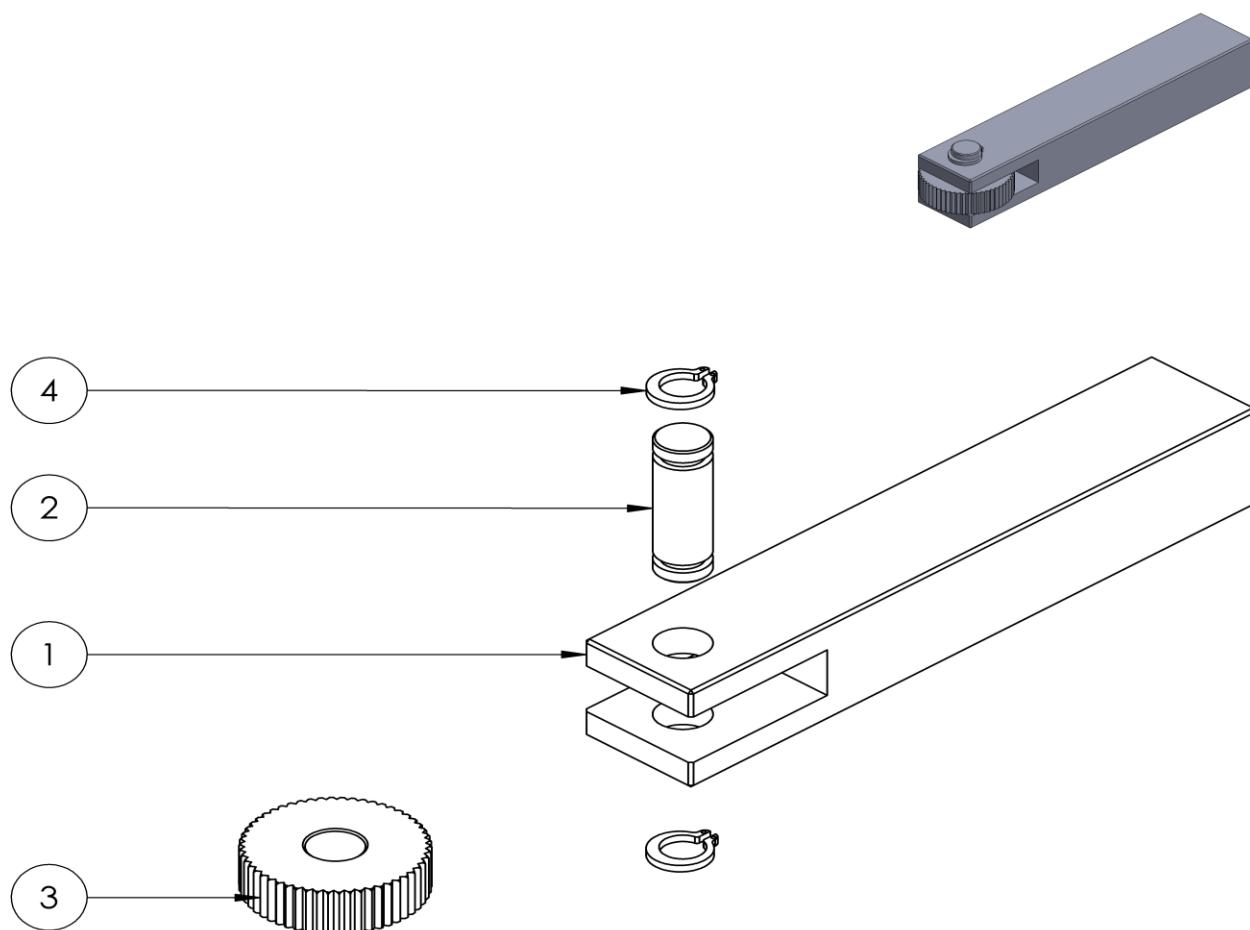
- Machines-outils : des M.O universelles, polyvalentes ayant de multiples possibilités afin de réduire les changements des phases (Tour parallèle à charioter et à fileter, Fraiseuse universelle, Perceuse –fraiseuse, Scie à ruban)
- Outilage : des outils courants, simples (outils de tours, forets, fraises...)
- Moyens de fixation : des dispositifs standards (mandrin, diviseur, vé, étau...)
- Moyens de contrôles : standards (cotes, spécifications géométriques, rugosité).
- Moyens humains : Ne parlons pas sur le moyen humain, car c'est moi qui ai réalisé les pièces. Mais d'une façon générale, en emploi pour ce type de fabrication des opérateurs qualifiés pour pouvoir assurer le réglage des machines-outils.

A propos du dossier de fabrication, on a élaboré seulement les documents suivants :

- ✓ Dessin de définition de produit (D.D.P) de chaque pièce ;
- ✓ Gamme d'usinage simple, sauf pour les anneaux élastiques qui sont provient du commerce.

Pour le choix et le calcul de certains paramètres de coupe, il n'est pas question de faire ça parce que nous ne réalisons qu'une seule pièce en tant que modèle. Ces paramètres sont pris en compte dans le cas de la programmation de production par lots.

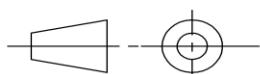
IV.2. Dessin d'ensemble d'un outil de moletage



No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	Matériaux	QTE
1	Porte molette	E 260	1
2	Axe molette	10 Ni Cr 6	1
3	Molette	X 36 Cr Mo 17	1
4	Anneau élastique	X 39 Cr Mo 18	2

Echelle : 1/1

Matériaux

Université Mohamed
Boudiaf M'silaBensehil
souheil

A4

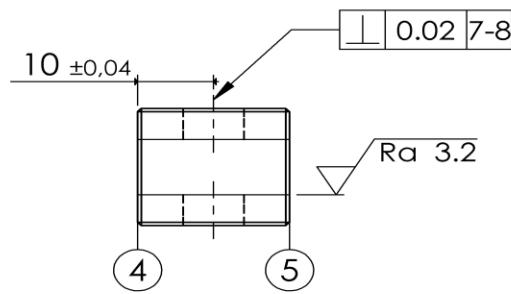
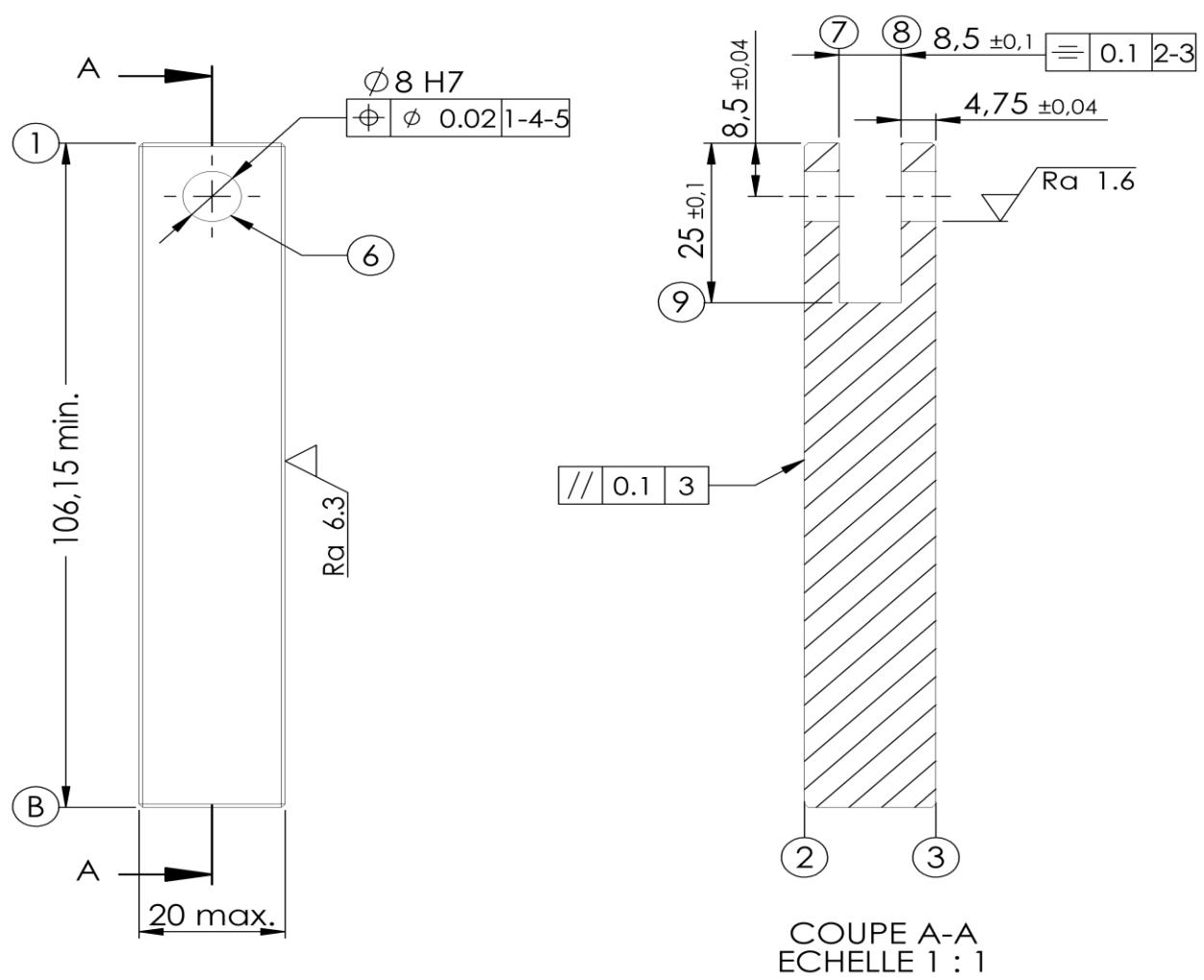
Outil de moletage

Le:05/04/2025

N° 05

IV.3. Dessin de définition de produits

IV.3.1. Porte molette



Chanfreins : 0.5 × 45°

$\sqrt{\text{Ra } 6.3}$

$\boxed{\square} \text{ 0.1}$

Echelle : 1/1

E 260

Université Mohamed
Boudiaf M'sila

Bensehil
souheil



A4

Porte molette

Le:01/04/2025

N° 01

IV.3.1.1. Processus de fabrication

Phase 100 : contrôle du brut **B**

Phase 200 : fraisage **1F – 3F – 10F**

Phase 300 : fraisage **5F – 11F**

Phase 400 : fraisage **2F – 12F**

Phase 500 : fraisage **4F – 13F**

Phase 600 : perçage **6E – 6F/-6F**

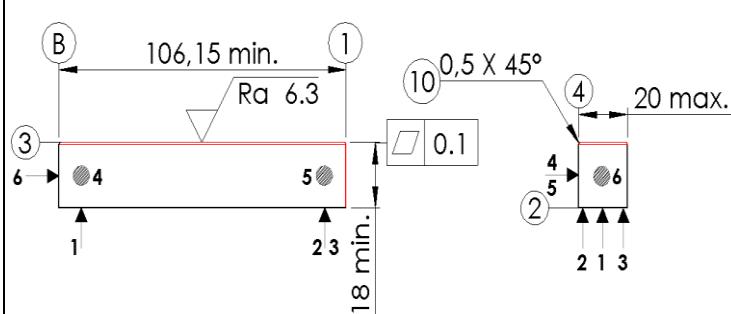
Phase 700 : fraisage **GE – GF** (G : 7 + 8 + 9)

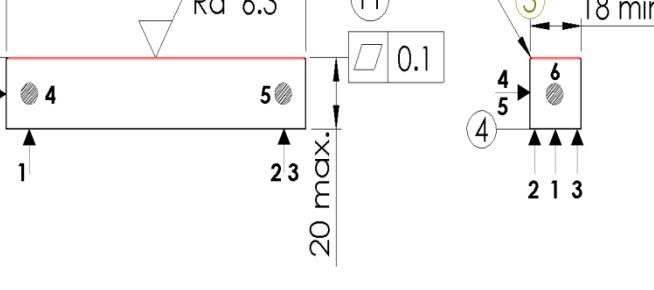
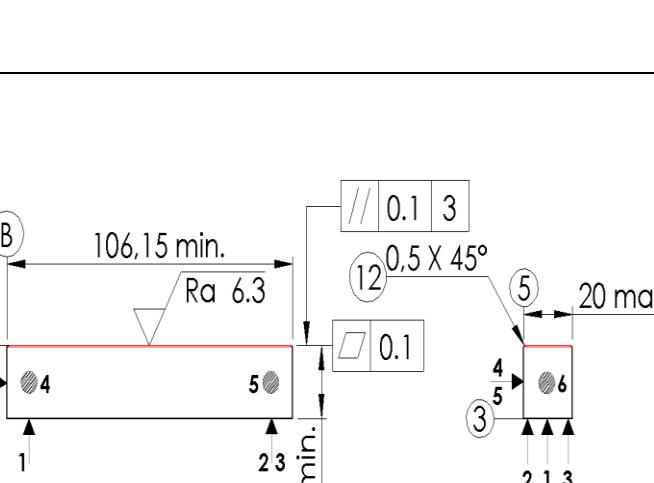
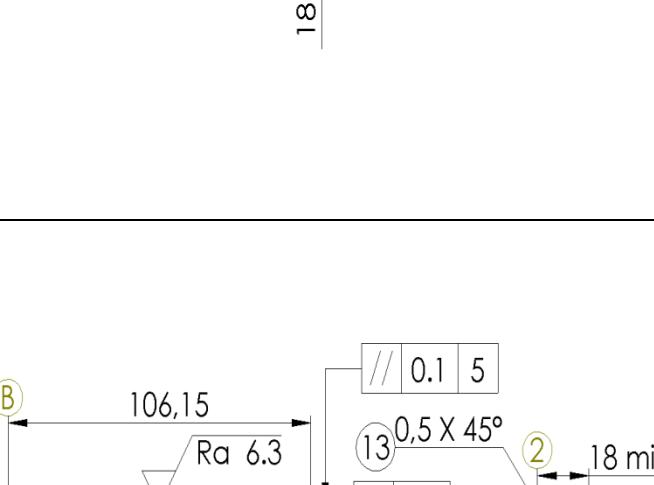
Phase 800 : contrôle finale

IV.3.1.2. Projet de gamme

FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE

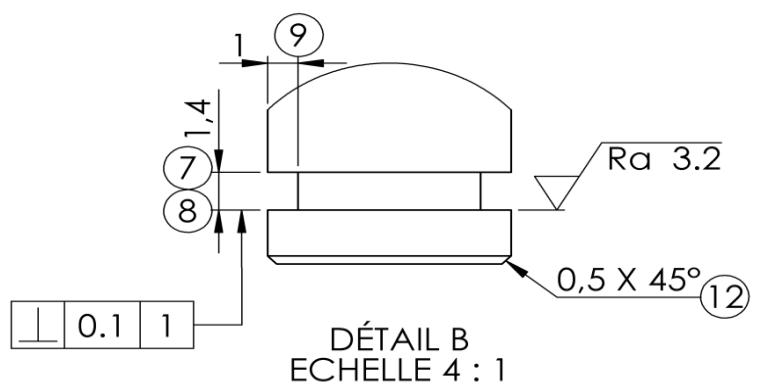
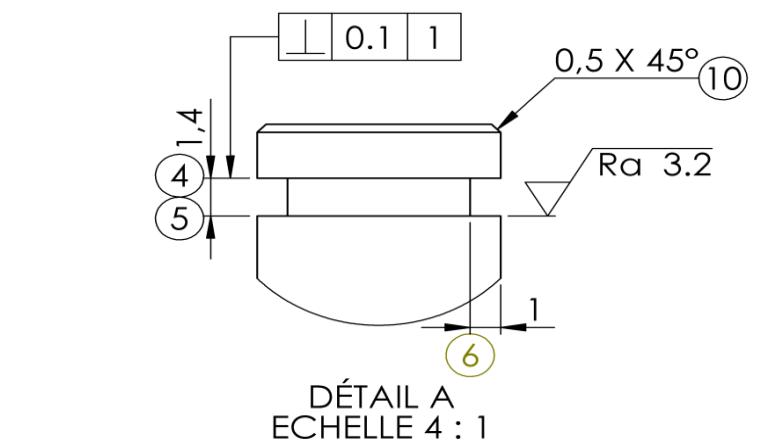
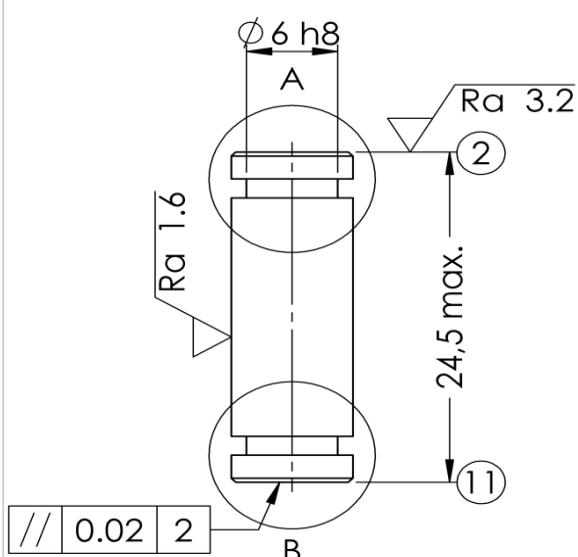
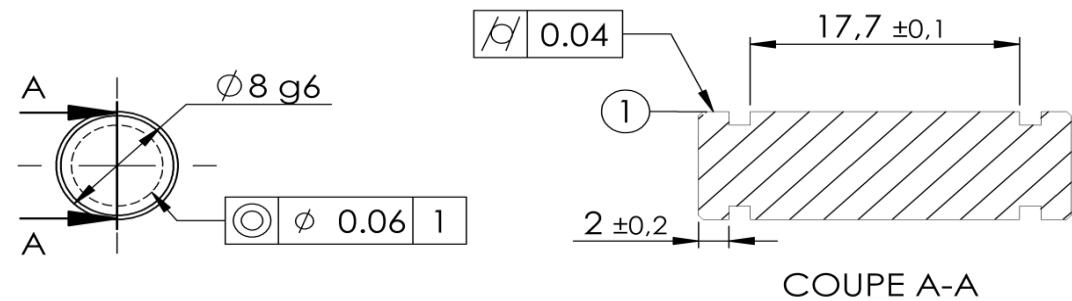
Feuille N° : 01

Pièce : Porte molette		Ensemble : Outil de moletage	Matière : E 260
Nombre de pièces : 01		S/Ensemble :	Brut : Laminé
N°	Désignation des phases, sous Phases, opérations	Machines et outillage	Croquis de la pièce à ses divers stades D'usinage
100	Contrôle de brut Vérifier les cotes et les spécifications	Atelier de métrologie Pied à coulisse Digital	D'après la chaîne de laminage, vérifier si le brut est capable de contenir la pièce
200	Fraisage Pièce dans l'installation - Appui plan sur ② en 3N (1-2-3) - Appui linéaire sur ④ en 2N (4-5) - Appui ponctuel sur B en 1N (6) 201 : Surfacer en finition 1F $C_m = 106,15 \text{ min}$ 202 : Surfacer en finition 3F $C_m = 18 \text{ min}$ 203 : chanfreiner en finition 10F $C_o = 0,5 \times 45^\circ$ Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$	FV Montage F 200 Fraise 2T Ø25 en HSS Fraise conique 2T en HSS Pied à coulisse Digital Montage de contrôle Planéité Rugosimètre	

300 <u>Fraisage</u> Pièce dans l'installation - Appui plan sur ④ en 3N (1-2-3) - Appui linéaire sur ③ en 2N (4-5) - Appui ponctuel sur B en 1N (6) 301 : Surfacer en finition 5F $C_m = 20 \text{ max}$ 302 : chanfreiner en finition 11F $C_o = 0,5 \times 45^\circ$ Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$	FV Montage F 300 Fraise 2T Ø25 en HSS Fraise conique 2T en HSS Pied à coulisse Digital $CMD 20 \text{ max}$ Rugosimètre	
400 <u>Fraisage</u> Pièce dans l'installation - Appui plan sur ③ en 3N (1-2-3) - Appui linéaire sur ⑤ en 2N (4-5) - Appui ponctuel sur B en 1N (6) 401 : Surfacer en finition 2F $C_m = 18 \text{ min}$ 402 : chanfreiner en finition 12F $C_o = 0,5 \times 45^\circ$ Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$	FV Montage F 400 Fraise 2T Ø25 en HSS Fraise conique en HSS Pied à coulisse Digital $CMD 18 \text{ min}$ Montage de C Parallé-Planéï Rugosimètre	
500 <u>Fraisage</u> Pièce dans l'installation - Appui plan sur ⑤ en 3N (1-2-3) - Appui linéaire sur ② en 2N (4-5) - Appui ponctuel sur B en 1N (6) 501 : Surfacer en finition 4F $C_m = 20 \text{ max}$ 502 : chanfreiner en finition 13F $C_o = 0,5 \times 45^\circ$ Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$	FV Montage F 500 Fraise 2T Ø25 en HSS Fraise conique en HSS Pied à coulisse Digital $CMD 20 \text{ max}$ Montage de contrôle Parallélisme Planéité Rugosimètre	

600	Perçage Pièce dans l'installation - Appui plan sur ③ en 3N (1-2-3) - Appui linéaire sur ⑤ en 2N (4-5) - Appui ponctuel sur B en 1N (6) 601 : Percer en ébauche 6E $Co = \emptyset 6$ 602 : Percer en demi-finition 6F / $Co = \emptyset 7,8$ 603 : Alésoer en finition 6F $Co = \emptyset 8 H7$ $Cm = 8,5^{+0,04}_{-0,04}$ $Cm = 10^{+0,04}_{-0,04}$ Rugosité : $\sqrt{Ra} 1,6$	P – F Montage P 600 Foret à centrer $\emptyset 2$ en HSS 60° Foret $\emptyset 6$ en HSS Foret $\emptyset 7,8$ en HSS Alésoir $\emptyset 8 H7$ en HSS Pied à coulisse Digital TLD : $\emptyset 8 H7$ Calibres : $8,5^{+0,04}_{-0,04} 10^{+0,04}_{-0,04}$ Montage de contrôle Local-Perp Rugosimètre	
700	Fraisage Pièce dans l'installation - Appui plan sur ⑤ en 3N (1-2-3) - Appui linéaire sur ② en 2N (4-5) - Appui ponctuel sur B en 1N (6) 701 : Rainurer en ébauche GE $Co = 8,2$ $Cm = 4,9$ $Cm = 24,5$ 702 : Rainurer en finition GF $Co = 8,5^{+0,1}_{-0,1}$ $Cm = 4,75^{+0,04}_{-0,04}$ $Cm = 25^{+0,1}_{-0,1}$ Rugosité : $\sqrt{Ra} 3,2$	FV Montage F 700 Fraise 2T $\emptyset 8,2$ Denture brise-copeaux en HSS Fraise Cylin 2T $\emptyset 8,5$ en HSS Pied à coulisse Digital Jauge de prof à cadran $CMD 4,75^{+0,04}_{-0,04}$ $JPD 8,5^{+0,1}_{-0,1}$ Montage de contrôle Symétrie Rugosimètre	
800	Contrôle final 810 : Dimensions 820 : Spécifications 830 : Etats de surface	Poste de contrôle	

IV.3.2. Axe molette



Echelle: 2/1	10 Ni Cr 6	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Bensehil souheil
 A4			Le: 02/04/2025 N° 02

Axe molette

IV.3.2.1. Processus de fabrication

Phase 100 : Contrôle du brut **B1 – B2**

Phase 200 : Tournage **2E – 2F – 10F – 3F**

Phase 300 : Tournage **1E – 1F/-1F – G₁F – G₂F – CF**

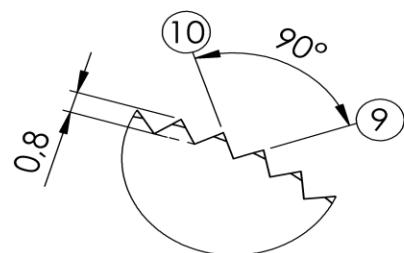
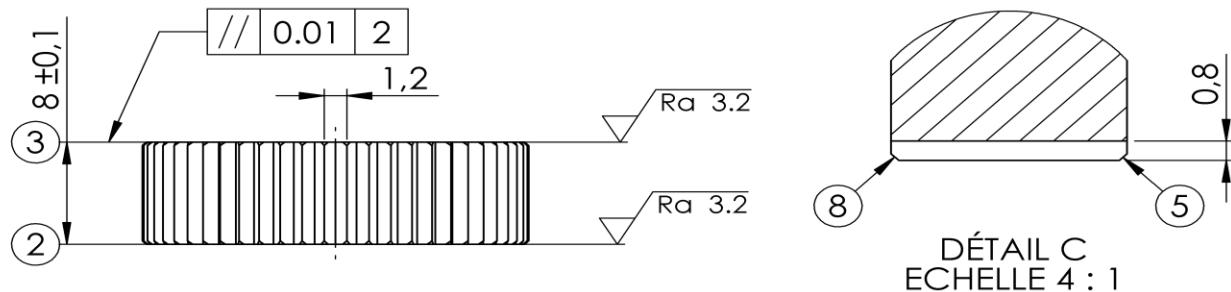
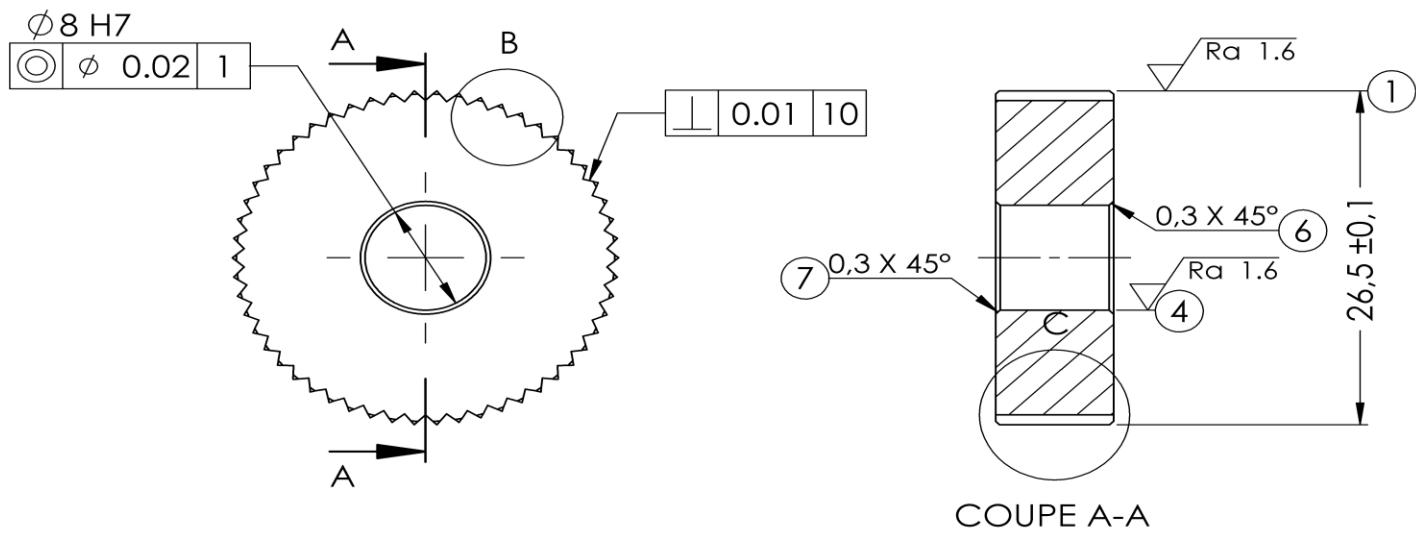
Phase 500 : Contrôle final

IV.3.2.2. Projet de gamme

FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE				Feuille N° : 02
Pièce : Axe molette		Ensemble : Outil de moletage	Matière : 10 N Cr 6	
N°	Désignation des phases, sous Phases, opérations	Machines et outillage	Croquis de la pièce à ses divers stades d'usinage	
100	Contrôle de brut Vérifier les cotes et les spécifications	Atelier de métrologie Pied à coulisse Digital	D'après la chaîne de laminage, vérifier si le brut est capable de contenir la pièce	
200	Tournage Pièce dans l'installation - Centrage long sur B2 en 4N (1-2-3-4) - Appui ponctuel sur B1 en 1N (5) 201 : Dresser en ébauche 2E $Cm = 37,5$ 202 : Dresser en finition 2F $Cm = 37$ 202 : Chanfreiner en finition 10F $Co = 0,5 \times 45^\circ$ 203 : Percer avant trou de centre En finition 3F $Co = \emptyset 1 \quad Cm = 35$ Rugosité : $\sqrt{Ra} 3,2$ Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$	T – P Montage T 200 Outil à dresser en HSS Outil coudé à 45° en HSS Foret à centrer Ø 1 en HSS 60° Pied à coulisse Digital Rugosimètre		

300	<p>Tournage</p> <p>Pièce dans l'installation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Centrage court sur B2 en 2N (1-2) - Poupée mobile sur ③ en 2N (4-5) - Appui ponctuel sur B1 en 1N (3) <p>301 : Charioter en ébauche 1E $2Cm = 9$</p> <p>302 : Charioter en demi-finition 1F/ $2Cm = 8.2$</p> <p>303 : Charioter en finition 1F $2Cm = 8 g6$</p> <p>304 : Usiner une Gorge en finition G1F $Co = 1,4 \quad 2Cm = 6 \quad Cm = 33,6$</p> <p>305 : Usiner une Gorge en finition G2F $Co = 1,4 \quad 2Cm = 6 \quad Cm = 14,5$</p> <p>306 : Tronçonner CF $Cm = 10,5$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 1,6$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$</p>	<p>T – P Montage T 300</p> <p>Outil couteau en CM</p> <p>Outil saigner Lame ép : 2,5 en HSS</p> <p>BL : $\varnothing 8 g6$</p> <p>Montage de contrôle Par-Coax-Cyl</p> <p>Rugosimètre</p>	
400	<p>Tournage</p> <p>Pièce dans l'installation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Centrage long sur ① en 4N (1-2-3-4) - Appui ponctuel sur ② en 1N (5) <p>401 : Dresser en ébauche 11E $Cm = 25$</p> <p>402 : Dresser en finition 11F $Cm = 24,5 \text{ max}$</p> <p>403 : Chanfreiner en finition 12F $Co = 0,5 \times 45^\circ$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 3,2$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$</p>	<p>T – P Montage T 400</p> <p>Outil à dresser en HSS</p> <p>Outil coudé à 45° en HSS</p> <p>Pied à coulisse Digital</p> <p>Calibre à $0,5 \times 45^\circ$</p> <p>Montage de contrôle Parallélisme</p> <p>Rugosimètre</p>	
500	<p>Contrôle final</p> <p>510 : Dimensions</p> <p>520 : Spécifications</p> <p>530 : Etats de surface</p>	Poste de contrôle	

IV.3.3. Molette droit



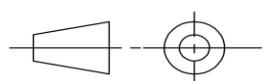
Chanfrein (5)(8) : $0.5 \times 45^\circ$

Echelle: 2/1

X 36 Cr Mo 17

Université Mohamed
Boudiaf M'sila

Bensehil
souheil



A4

MOLETTE DROIT

Le :04/04/2025

N° 04

IV.3.3.1. Processus de fabrication

Phase 100 : Contrôle du brut **B1 – B2**

Phase 200 : Tournage **1E – 1F/-1F – 2E – 2F – 5F – 4E – 4F/-4F – CF**

Phase 300 : Tournage **3E – 3F – 8F – 7F**

Phase 400 : Fraisage **GE – GF** (G : 9 + 10)

Phase 500 : Contrôle final

IV.3.3.2. Projet de gamme

FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE				Feuille N° : 03
Pièce : Molette droit		Ensemble : Outil de moletage	Matière : X 36 Cr Mo 17	
Nombre de pièces : 01		S/Ensemble :	Brut : Laminé	
N°	Désignation des phases, sous Phases, opérations	Machines et outillage	Croquis de la pièce à ses divers stades D'usinage	
100	Contrôle de brut Vérifier les cotes et les spécifications	Atelier de métrologie Pied à coulisse Digital	D'après la chaîne de laminage, vérifier si le brut est capable de contenir la pièce	
200	Tournage Pièce dans l'installation - Centrage long sur B2 en 4N (1-2-3-4) - Appui ponctuel sur B1 en 1N (5) 201 : Charioter en ébauche 1E $2Cm = 27,5$ 202 : Charioter en demi-finition 1F/ $2Cm = 26,8$ 203 : Charioter en finition 1F $2Cm = 26,5^{+0,1}_{-0,1}$ 204 : Dresser en ébauche 2E $Cm = 31$ 205 : Dresser en finition 2F $Cm = 30,5$ 206 : Chanfreiner en finition 5F $Co = 0,5 \times 45^\circ$ 207 : Percer avant trou de centre ④ $Co = \emptyset 2$ 208 : Percer en ébauche 4E $Co = \emptyset 6,5$ 209 : Percer en demi-finition 4F/ $Co = \emptyset 7,75$	T – P Montage T 200 Outil couteau en CM Outil à dresser en HSS Outil coudé à 45° en HSS Foret à centrer $\emptyset 2$ en HSS 60° Foret $\emptyset 6,5$ en HSS Foret $\emptyset 7,75$ en HSS		

	<p>210 : Aléser en finition 4F $Co = \emptyset 8 H7$</p> <p>211 : Chanfreiner en finition 6F $Co = 0,3 \times 45^\circ$</p> <p>212 : Tronçonner CF $Cm = 21$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 1,6$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 3,2$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$</p>	<p>Alésoir $\emptyset 8H7$ en <i>HSS</i></p> <p>Outil à aléser</p> <p>Outil saigner Lame ép : 2,5 En <i>HSS</i></p> <p>Pied à coulisse Digital</p> <p>TLD : 8 <i>H7</i></p> <p>Calibres à $0,5 \times 45^\circ$ $0,3 \times 45^\circ$</p> <p>Montage de contrôle Coaxialité Rugosimètre</p>	
300	<h3><u>Tournage</u></h3> <p>Pièce dans l'installation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Appui plan sur ② en 3N (1-2-3) - Centrage court sur ① en 2N (4-5) <p>301 : Dresser en ébauche 3E $Cm = 8,5$</p> <p>302 : Dresser en finition 3F $Cm = 8^{+0,1}_{-0,1}$</p> <p>303 : Chanfreiner en finition 8F $Co = 0,5 \times 45^\circ$</p> <p>304 : Chanfreiner en finition 7F $Co = 0,3 \times 45^\circ$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 3,2$</p> <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 6,3$</p>	<p>T – P</p> <p>Montage <i>T 300</i></p> <p>Outil à dresser en <i>HSS</i></p> <p>Outil coudé à 45° en <i>HSS</i></p> <p>Outil à aléser</p> <p>Pied à coulisse Digital</p> <p><i>C MD</i> $8^{+0,1}_{-0,1}$</p> <p>Calibre à $0,5 \times 45^\circ$ $0,3 \times 45^\circ$</p> <p>Montage de contrôle Parallélisme Rugosimètre</p>	

400 <h3>Fraisage</h3> <p>Pièce dans l'installation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Appui plan sur ③ en 3N (1-2-3) - Centrage court sur ④ en 2N (4-5) <p>401 : Fraiser en ébauche GE</p> <p>Soit $K=60$, $N=54$ encoches</p> $\frac{K}{N} = \frac{60}{54} = \frac{10}{9} = 1\frac{3}{27} \text{ tours de manivelle}$ <p>1 tour de manivelle + intervalle, soit 4 trous (rangée de 27 trous)</p> $Co = 0,6 \times 90^\circ$ <p>402 : Fraiser en finition GF</p> $\frac{K}{N} = \frac{60}{54} = \frac{10}{9} = 1\frac{3}{27} \text{ tours de manivelle}$ <p>1 tour de manivelle + intervalle, soit 4 trous (rangée de 27 trous)</p> $Co = 0,8 \times 90^\circ$ <p>Rugosité : $\sqrt{Ra} 3,2$</p>	FV Montage F 400 Diviseur simple Le rapport $K = 60$ Plateau à trous par rangée $N^o : 2$ Fraise isocèle 2 tailles Micromètre Micromètre à pointes Montage de contrôle Perpendicularité Rugosimètre	<p>DÉTAIL A ECHELLE 4 : 1</p>
500 <h3>Contrôle final</h3> <p>510 : Dimensions 520 : Spécifications 530 : Etats de surface</p>	Poste de contrôle	

Conclusion

Ce chapitre à constitue un axe fondamental dans notre travail, car il représente l'étape finale ou l'objectif principale de notre mémoire, il s'agit de la production de l'outil molette.

La gamme d'usinage a permis de transformer une conception théorique en un processus de fabrication clair et optimisé, structuré en une série d'opérations techniques logiques et reproductibles. Grâce à cette approche méthodique, nous garantissons. Une production efficace, avec des temps et des coûts maîtrisés. Une qualité constante, grâce à des paramètres d'usinage précis et des moyens de production adaptés. Une compétitivité accrue, puisque des opérations standardisées et optimisées réduisent les coûts unitaires.

Conclusion Générale

Au terme de ce mémoire, il apparaît clairement que les outils de coupe constituent un pilier fondamental dans les procédés d'usinage et de fabrication. Leur rôle dans l'enlèvement de matière, sous forme de copeaux, est essentiel pour garantir la précision, la qualité et l'efficacité des opérations industrielles. La maîtrise des paramètres techniques, qu'il s'agisse de la géométrie de l'outil, du choix des matériaux ou encore des conditions de coupe, permet d'optimiser les performances tout en prolongeant la durée de vie des outils.

À travers notre étude, nous avons pu approfondir les connaissances relatives aux différents types d'outils de coupe, à leurs propriétés spécifiques, ainsi qu'aux critères indispensables à leur sélection. Cette compréhension globale est déterminante pour adapter l'outil au matériau usiné et aux exigences de production, en tenant compte notamment de la dureté des matériaux, des vitesses de coupe, de la finition désirée ou encore des efforts mécaniques impliqués.

Le premier chapitre a posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension du processus de coupe, en retracant l'évolution des outils et en mettant en lumière les paramètres influents. Le second chapitre nous a permis de nous pencher plus particulièrement sur le moletage, une opération spécifique mais fréquente, pour laquelle nous avons proposé une conception d'outil adaptée, après avoir étudié ses particularités techniques. Dans le troisième chapitre, les calculs de construction ont été réalisés avec rigueur afin d'assurer la robustesse et la fiabilité de l'outil, notamment en termes de contraintes mécaniques subies. Enfin, le dernier chapitre a permis de concrétiser la fabrication à travers une analyse complète de la gamme d'usinage, essentielle à la mise en œuvre pratique de l'outil.

En définitive, cette étude nous a permis non seulement d'approfondir notre compréhension des outils de coupe et de leur conception, mais également de développer une approche méthodique allant de la théorie à la pratique. Le travail réalisé constitue ainsi une base solide pour toute future amélioration ou innovation dans le domaine de l'usinage, en mettant en avant l'importance d'une conception réfléchie et d'une analyse rigoureuse pour garantir des résultats à la hauteur des exigences industrielles.

Références bibliographies

- [1] M. Guediche, “MODélisation et Simulation de l’Usure des Outils de Coupe au cours du processus d’enlèvement de matière : Approche expérimentale et numérique (MOSUOC) MayssaGuediche To cite this version : HAL Id : tel-02493414 Modélisation et Simulation de l’Usure des Outils de Coupe au cours du processus d’enlèvement de matière : Approche expérimentale et numérique (MOSUOC),” 2020.
- [2] M. Günay, E. Aslan, I. Korkut, and U. Seker. Investigation of the effect of rake angle on main cutting force. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(9):953–959, July
- [3] R. SrikantRevuru, V. Krishna Pasam, and N. Rao Posinasetti, “Performance of Coated Cutting Tools in Machining: a Review,” pp. 792–802, 2020, doi: 10.47412/jsid9445.
- [4] Bagur, F. (1999). Matériaux pour outils de coupe. Dans Techniques de l’Ingénieur (Réf. BM 7 080-1). Paris : Techniques de l’Ingénieur
- [5] Ouanas, S. (2019). Étude bibliographique sur l’usinage et l’usure des outils de coupe. [Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba]. Bibliothèque universitaire de l’Université Annaba. <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/10/Ouanas-Salah.pdf>
- [6] Bennegadi, M. (s.d.). Coupe des métaux en fabrication mécanique et productique. [Cours, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran]. https://www.univ-usto.dz/images/coursesenligne/CM_bennegadi.pdf
- [7] Institut Supérieur des Techniques Appliquées (ISTA). (s.d.). *Optimisation des conditions de coupe des paramètres de coupe* [Cours PDF]. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. <https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/optimisation%20des%20condition%20de%20coupe.pdf>
- [8] ISTA. (s.d.). *Optimisation des conditions de coupes des paramètres de coupe*. Université Mentouri Constantine. <https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/TD-1-et-2-optimisation-pour-3%C3%A8me-ann%C3%A9e-PMI.pdf>

- [9] Bennegadi, A. (s.d.). *Coupe des métaux en fabrication mécanique et productique.* Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO). https://www.univ-usto.dz/images/coursesenligne/CM_bennegadi.pdf
- [10] C. Bonnet, Simulation numérique de la coupe du 316L, Mémoire de Master 2 Recherche, ENI de Saint-Etienne, 2007
- [11] T. Mabrouki, F. Girardin, M. Asad et J. F. Rigal, Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351), International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48 (11), p. 1187-1197, 2008
- [12] C. Courbon, Vers une modélisation physique de la coupe des aciers spéciaux : intégration du comportement métallurgique et des phénomènes tribologiques et thermiques aux interfaces, thèse soutenue de L'Ecole Centrale de Lyon, 2011
- [13] P. L. B. Oxley, Mechanics of metal cutting for a material of variable flow stress, Journal of Engineering for Industry, series B, vol. 85, p.339-345, 1963
- [14] J.Q. Xie, A. E. Bayoumi et H.M. Zbib, FEA modelling and simulation of shear localized chip formation in metal cutting, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 38, p. 1067-1087, 1998
- [15] A. J. Shih et H.T.Y. Yang, Experimental and finite element predictions of residual stresses due to orthogonal metal cutting, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 36, p. 1487–1507, 1993
- [16] K. Ueda et K. Manabe, Rigid-plastic FEM analysis of three-dimensional deformation field in chip formation process, Annals of the CIRP, vol. 42(1), p. 35-38, 1993
- [17] J. Hashemi., A.A. Tseng et P.C. Chou, Finite element Modelling of segmental chip formation in high-speed machining, Journal of Material Engineering and Performance, vol.3(5), p.712-721, 1994
- [18] M. Bäker, Finite element simulation of high-speed cutting forces, Journal of Materials Processing Technology, vol.176, p. 117-126, 2006
- [19] T.D. Marusich et M. Ortiz, Modelling and simulation of high-speed machining, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol 38, p. 3675-3694, 1995

- [20] J.F. Molinari, Three-dimensional finite-element analysis of high-speed machining, from Metal cutting and high speed machining, edited by D. Dudunski et al., Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002
- [21] M. Barge, H. Hamdi, J. Rech et J.M. Bergheau, Numerical modelling of orthogonal cutting: influence of numerical parameters, Journal of Materials Processing Technology, vol. 164-165, p.1148-1153, 2005
- [22] Taylor, F. W. (1906). *The principles of machining* (Vol. 1). McGraw-Hill.
- [23] Steinmetz, H., & Klocke, F. (2005). *Machining technology: Machine tools and operations*. Springer.
- [24] Liu, H., & Zhang, L. (2014). *Cutting tool materials and their wear mechanisms*. Springer.
- [25] Guillemot, J. F. (2010). *Techniques de production et de fabrication: Usinage et procédés*. Eyrolles.
- [26] Sundararajan, V., & Ramesh, M. (2002). *Manufacturing processes: Materials, manufacturing, and operations*. McGraw-Hill
- [27] Chauhan, R., & Singla, P. (2017). Advances in materials for cutting tools: A review. *Materials Science and Engineering: A*, 685, 346-358.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.027>
- [28] Groß, A., & Lienhard, J. (2014). *Cutting tools: Materials, design, and applications*. Springer.
- [29] Bahl, J., & Kumar, S. (2015). Properties and applications of high-performance cutting tools materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12), 2069-2083. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7113-6>
- [30] Chattopadhyay, A., & Raj, R. (2018). *High-speed machining tools: Design, manufacturing, and materials*. CRC Press.
- [31] Wang, Z., & Yang, X. (2020). Advancements in cutting tool materials and coatings. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(6), 1-11.
<https://doi.org/10.1115/1.4046931>
- [32] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7th ed.). Pearson.

Conclusion générale

[33]LEADRP. (2024). *Comprendre ce qu'est le moletage et son guide complet.*

LEADRP. <https://leadrp.net/fr/blog/understanding-what-is-knurling-and-its-comprehensive-guide/>

[34] *Moletage*. Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Moletage>

[35]AT-Usinage. (s.d.). *Outils et techniques de moletage : un guide complet.* AT-Usinage. <https://at-machining.com/fr/knurling-tools-and-techniques/>

[36]Utilis. (s.d.). *Le moletage par enlèvement de copeaux avec Zeus® d'Hommel+Keller.* Utilis. <https://www.utilis.com/fr-fr/shop/service/news-salons/utilis-news/hommel-keller-2>

[37]ISO. (2012). *ISO 13444:2012 - Documentation technique de produits (TPD) — Cotation et indication du moletage.* Organisation internationale de normalisation.

[38] Easiahome. (2024, 27 juin). *Un guide complet sur le moletage.*

Easiahome. <https://www.easiahome.com/fr/a-comprehensive-guide-about-knurling/>

[39] ProleanTech. (2023, 8 juin). *Knurling: A Comprehensive Guide to the Process.*

ProleanTech. <https://proleantech.com/fr/knurling/>

[40] FindTop. (2024, 9 juillet). *Un guide complet du moletage pour différentes industries.*

FindTop. <https://www.findtop.com/fr/knurling-what-it-is-and-how-its-used/>

[41] HLC Metal Parts. (2024, 27 juillet). *Le moletage expliqué : un guide complet.* HLC Metal Parts. <http://fr.hlc-metalparts.com/news/knurling-explained-a-comprehensive-guide-79335964.html>

[42] Djamaa, M. (2020). *Appareil diviseur* [Mémoire, Université de Guelma]. Dspace Université de Guelma. http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/14090/1/APPAREIL%20DIVISEUR%20_Djamaa_2020.pdf

[43]Université de Biskra. (s.d.). *Traitement thermique* [PDF]. <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/Traitement%20thermique.pdf>

[44] Cours sur le moletage. (2025). *Le moletage : définition et principe* [PDF]. Scribd. Consulté le 24 mai 2025, sur <https://fr.scribd.com/document/675756883/Cours-sur-le-moletage>

[45] Dupont, J. (2023). *Conception de l'outillage : paramètres et calculs des forces de coupe*. Institut de mécanique industrielle. <https://exemple-url.fr/document>

[46] Institut Supérieur des Techniques Appliquées. (s.d.). *Cours 6 : Efforts et puissance de coupe* [PDF]. Consulté le 24 mai 2025, sur <https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/Cours%206%20Efforts%20et%20puissance%20de%20coupe.pdf>

[47] DeZURIK. (n.d.). *Guide de sélection des matériaux*.
<https://www.dezurik.com/fr/resources/material-selection-guide/>

[48] Baudoin, M. (s.d.). *Chapitre 4 : Principe fondamental de la statique* [PDF]. Département de Mécanique, Université de Lille. Consulté le 24 mai 2025, sur https://pro.univ-lille.fr/fileadmin/user_upload/pages_pros/michael_baudoin/C4MI.pdf

[49] Villeneuve, S. (s.d.). *Contraintes dans les poutres en flexion* [PDF]. CCHIC. Consulté le 24 mai 2025, sur <https://appx.cchic.ca/svilleneuve/materiaux/chap9.pdf>

[50] Belkadi, A. A. (s.d.). *Chapitre 6 : Flexion simple* [PDF]. Département de Génie Civil, Université de Batna 2. Consulté le 24 mai 2025, sur https://gc.univ-batna2.dz/sites/default/files/dept-gc/files/ch_1_rdm.pdf

[51] Bourahla, K. (2019). *Résistance des matériaux : Efforts tranchants et contraintes de cisaillement* [PDF]. Département de Génie Mécanique, Université de Tlemcen. Consulté le 24 mai 2025, sur https://www.univ-tlemcen.dz/gm/cours/RDM_Efforts_Tranchants.pdf

[52] Longeot, H., & Jourdan, L. (1982). *Construction industrielle* (Collection H. Longeot). Dunod.

[53] Calloch, S., & Bouvet, C. (2015). *Mécanique des structures : Résistance des matériaux et calcul des structures* (2e éd.). Dunod.