

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

UNIVERSITE A-MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : conception mécanique et productique

Présenté par :

BAZIZ Kahina

ZOUAOUI Sabrina

Thème

**Angles de coupe des outils en acier rapide pour l'usinage des
plastiques**

Soutenu le **20/06/2017** devant le jury composé de:

Dr. BECHIR.H

Président

Melle. BOUZIDIS

Examineur

Dr. BELAMRIA

Rapporteur

2016-2017

Remerciements

Dieu merci pour la santé, la volonté et le courage qui nous ont accompagnés durant le cursus universitaire afin de réaliser ce modeste travail.

Toutes nos estimés et nos respectueuses grátitudes vont à Monsieur BELAMRI Abdelatif d'avoir accepté d'être notre promoteur. Ce travail témoigne de sa confiance et de soutien dans les moments les plus difficiles. Qu'il trouve ici l'expression de nos profondes reconnaissances.

Nous adressons nos plus sincères remerciements au Docteur BECHIR.H de nous avoir fait l'honneur de présider le jury et d'évaluer ce mémoire.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi à Melle BOUZIDI.S d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

A ceux qui ont tant éveillé la nuit, tant sacrifié de leurs temps pour nous instruire et qui ont su faire face aux difficultés de tous les jours avec vaillance et qui ont pu les surmonter malgré tout et cela dans le seul souci de notre bien être,

à vous mes très chers

parent que dieu vous protège.

A mon frère Ali et sa femme Mahjouba.

A mon frère Djahid et sa femme Hanane.

A mon petit frère Kamel.

A mon grand père.

A la mémoire de mon grand père et mes grandes mères.

A toute ma famille : tantes, oncles, cousins, cousines.

A tous mes amis(es).

A tous les étudiants de la promotion Génie Mécanique.

KAHINA

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

A ceux qui ont tant éveillé la nuit, tant sacrifié de leurs temps pour nous instruire et qui ont su faire face aux difficultés de tous les jours avec vaillance et qui ont pu les surmonter malgré tout et cela dans le seul souci de notre bien être,

à vous mes très chers

parent que dieu vous protège.

A ma sœur Kenza et son mari Hakim.

A mes nièces Schaima, Maya et Meriem.

A mon frère Samir et sa femme Salima.

A mon petit frère Nassim.

A mes grandes mères.

A la mémoire de mes grands pères.

A tout ma famille : tantes, oncles, cousins et cousines.

A tous mes amis (es).

A tous les étudiants de la promotion Génie Mécanique.

SABRINA

Liste des figures

Figure 1 Quelques erreurs faites lors de l'usinage du polyamide, à gauche utilisation d'outils pour l'usinage des aciers, à droite utilisation de la lubrification pour évacuer les copeaux.....	2
Figure 2 Polymère thermoplastique	3
Figure 3 Polymère thermodurcissable.....	4
Figure 4 Polymère élastomère.....	4
Figure 5 Les polymères amorphes, semi-cristallins, cristallin	5
Figure 6 Courbe σ - ε polymères	6
Figure 7 Principales zones de déformation et paramètres de la coupe orthogonale.....	9
Figure 8 Élément de l'outil.....	11
Figure 9 Plan de l'outil.....	13
Figure 10 Angle d'arrêt de l'outil.....	14
Figure 11 Angle des faces	14
Figure 12 Procédure de tournage	20
Figure 13 Composantes de tour.....	21
Figure 14 Mouvement de coupe et d'avance	24
Figure 15 Fraisage en opposition et en avalant	24
Figure 16 Composantes de la fraiseuse	25
Figure 17 Principe d'usinage.....	27
Figure 18 Condition de coupe	27
Figure 19 Conditions de coupe en tournage.....	29
Figure 20 Vitesse de coupe	29
Figure 21 Vitesse d'avance – Avance par tour	30
Figure 22 Condition de coupe en fraisage.....	31
Figure 23 Vitesse de coupe – vitesse de broche.....	32
Figure 24 Vitesse d'avance – avance par dent	32
Figure 25 Tour à commande numérique type <i>emco concept turn 55</i> , à commande Siemens 810 T.	35
Figure 26 Élaboration d'outil de coupe n°1 usiné.....	36
Figure 27 Élaboration d'outil de coupe n°2 usiné.....	36
Figure 28 Élaboration d'outil de coupe n°3.	37
Figure 29 Meule de l'ébauche –meule de finition.....	38

Figure 30 Elaboration des pièces à usiner.	38
Figure 31 Exemple de programme en G-code.....	39
Figure 32 Evolution qualité du copeau en fonction la vitesse de coupe.	45
Figure 33 Evolution qualité du copeau en fonction de la profondeur de passe en mm.	46
Figure 34 Evolution qualité du copeau en fonction de l'angle de coupe de l'outil.....	48

Liste des tableaux

Tableau 1 Pièces des polymères usinées	6
Tableau 2 Angles de coupe	15
Tableau 3 Les outils de coupe de tournage ARS	17
Tableau 4 Les outils de fraisage ARS	19
Tableau 5 Différentes opérations de tournage.....	22
Tableau 6 Opérations de fraisage	26
Tableau 7 Condition de coupe.....	33
Tableau 8 Les valeurs variation de valeurs prises pour chaque facteur de notre étude.	35
Tableau 9 Les différentes combinaisons (27) établies pour les essais de chariotage.....	40
Tableau 10 Attribution de la qualité du copeau pour chaque essai.	43
Tableau 11 Influence du diamètre de la pièce sur la qualité du copeau pour un angle de coupe de 0° (outil 1):	49
Tableau 12 Influence du diamètre de la pièce sur la qualité du copeau pour un angle de coupe de 2.5° (outil 2).....	50
Tableau 13 Influence du diamètre de la pièce sur la qualité du copeau pour un angle de coupe de 5° (outil 3).....	50

Sommaire

Introduction	1
Problématique	2

Chapitre I : Généralités sur les polymères

I.1 définition d'un polymère.....	3
I.2 Classification des polymères.....	3
I.2.1 Les thermoplastiques.....	3
I.2.2 Les thermodurcissables	3
I.2.3 les élastomères.....	4
I.3 Propriétés mécaniques	5
I.3.1 Module d'élasticité E	5
I.3.2 La limite d'élasticité	5
I.4 Exemple de pièces usinées.....	6

Chapitre II: Angles de coupe et géométries des outils

II.1 L'usinage	8
II.2 Etat de l'art.....	8
II.3 Les outils de coupe	10
II.3.1 Éléments de l'outil	11
II.3.1.1 Corps de l'outil.....	12
II.3.1.2 Partie active de l'outil.....	12
II.3.2 Plans de l'outil	12
II.3.3 Angle de l'outil	13
II.3.4 Angle des faces.	14
II.3.5 Matériaux d'outil	15
II.3.6 Les outils de tournage	17
II.3.7 Les outils de fraisages	19

Chapitre III: Procédés d'usinage et conditions de coupe

III.1 Tournage.....	20
III.1.1 Définition.....	20
III.1.2 Les tours	21
III.1.3 Classification des machines de tour.....	22
III.1.4 Différentes opérations de tournage.....	22

III.2 Fraisage	23
III.2.1 Définition.....	23
III.2.2 Mode de coupe.....	24
III.2.2.1 Fraisage en opposition	24
III.2.2.2 Fraisage en avalant.....	24
III.2.3 Les fraiseuses.....	25
III.2.4 Classification des fraiseuses	26
III.2.5 Opération de fraisage.....	26
III.3 Condition de coupe.....	26
III.3.1 Explication des critères de choix :.....	28
III.3.2 Cas de tournage	29
III.3.2.1 Vitesse de coupe.....	29
III.3.2.2 Vitesse d'avance – Avance par tour.....	30
III.3.2.3 Profondeur de passe	30
III.3.3 Cas de fraisage.....	31
III.3.3.1 Vitesse de coupe.....	31
III.3.3.2 Vitesse d'avance-Avance par tour-Avance par dent.....	32
III.3.3.3 Profondeur de passe	33

Chapitre IV: Résultats et discussion

IV.1 Option pour la méthode des plans d'expériences	34
IV.2 Partie expérimentale.....	34
IV.2.1 Préparation des essais	35
IV.2.1.1 Préparation des outils de coupe	36
IV.2.1.2 Préparation des pièces à usiner	38
IV.2.2 Déroulement des essais	39
IV.2.3 Trace des courbes des effets des paramètres de coupes	44
IV.2.4 Influence du diamètre de la pièce sur la qualité du copeau.....	49
Conclusion.....	52

Introduction générale

Introduction générale

L'obtention des formes requises d'une pièce par enlèvement de matière est encore à ce jour le procédé de fabrication le plus répandu. Malgré les progrès réalisés par les procédés de mise en forme des matériaux (formage, fonderie...). L'usinage se révèle nécessaire pour l'obtention des produits finaux.

Le moulage est évidemment la technique la plus répandue pour la mise en forme des matières plastiques. Il permet d'obtenir des pièces finies en une seule opération. Mais pour de petites séries, pour la fabrication de pièce aux formes compliquées peut être plus économique d'avoir recours à l'usinage.

L'usinage des matières plastiques s'est d'abord inspiré des méthodes applicables au bois ou aux métaux. Mais leurs propriétés outre qu'elles varient sensiblement d'un type à l'autre, s'écartent fortement de celles des matériaux classiques. Des règles de travail et des machines particulières doivent donc être adoptées pour ces matières.

Notre travail s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les polymères ;

Le deuxième chapitre est consacré sur les angles de coupe, géométries et matériaux des outils, formation de copeau;

Le troisième chapitre est consacré généralités sur les procédés d'usinage qui contient des définitions et les conditions de coupe ;

Le quatrième chapitre concerne le protocole expérimentale que nous avons entrepris pour l'ensemble de nos essais, termine par des interprétations des résultats ;

Notre travail termine par une conclusion générale.

Problématique

L'objectif de notre travail est d'étudier une opération de chariotage d'une pièce cylindrique en polyamide, le choix de cette matière est justifié par le fait que de nombreux industriels de notre région, l'utilisent pour la fabrication de pièce de rechange pour la machine du domaine de l'agroalimentaire. La remarque faite est que les opérateurs sur machines perdent beaucoup de temps dans la fabrication de ce genre de pièce et rencontrent des problèmes d'évacuation des copeaux qui reste accumulé autour de la pièce et altère l'état de surface de la pièce et engendre des arrêts machine importants afin de nettoyer le pourtour de la pièce et de pouvoir continuer le travail. La figure suivante illustre quelque erreur commise lors de l'usinage du polyamide, tel qu'utilisation d'outils pour l'usinage des aciers ou bien l'utilisation de la lubrification pour évacuer les copeaux.



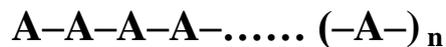
Figure 1 : Quelques erreurs faites lors de l'usinage du polyamide, à gauche utilisation d'outils pour l'usinage des aciers, à droite utilisation de la lubrification pour évacuer les copeaux.

Chapitre I

Chapitre I Généralités sur les polymères

I.1 définition d'un polymère

Un polymère est un matériau composé de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules. Ces dernières sont des molécules résultant de l'enchaînement covalent de motif $-A-$ appelés monomères. Le nombre « n » représente le degré de polymérisation du matériau [1].



I.2 Classification des polymères

I.2.1 Les thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes, elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leurs nouvelles formes [2].

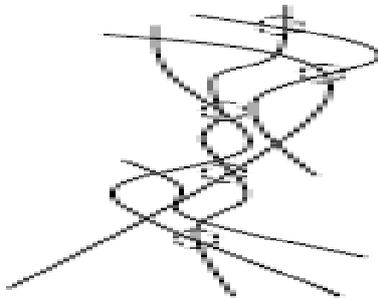


Figure 2 : Polymère thermoplastique [2].

I.2.2 Les thermodurcissables

Les matières thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermodurcies ou thermorigides. Dans ce cas les chaînes de départ sont beaucoup

plus courte et plus réactives, ces chaînes vont se lier ensemble chimiquement, cette réaction conduit à des liens chimiques rigides et mis au jeu toutes les molécules présentes pour former un réseau tridimensionnel [2].



Figure 3: Polymère thermodurcissable [2].

I.2.3 les élastomères

Ces polymères présentant les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elle-même, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer [2].

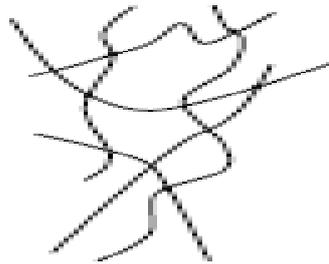


Figure 4: Polymère élastomère [2].

Ces polymères peuvent exister à l'état [3,4] :

a) Les polymères amorphes

Ils sont transparents, la structure moléculaire de la chaîne satiriquement irrégulière ;

b) Les polymères semi cristallins

Ces polymères présentent un comportement qui présente à la fois une fusion cristallin et une transition vitreuse, donc sa structure est mixte une phase amorphe et une phase cristalline ;

c) Les polymères cristallins

Il faut que la structure moléculaire de la chaîne soit régulière, et aussi que les conditions de refroidissement permettent la cristallisation.

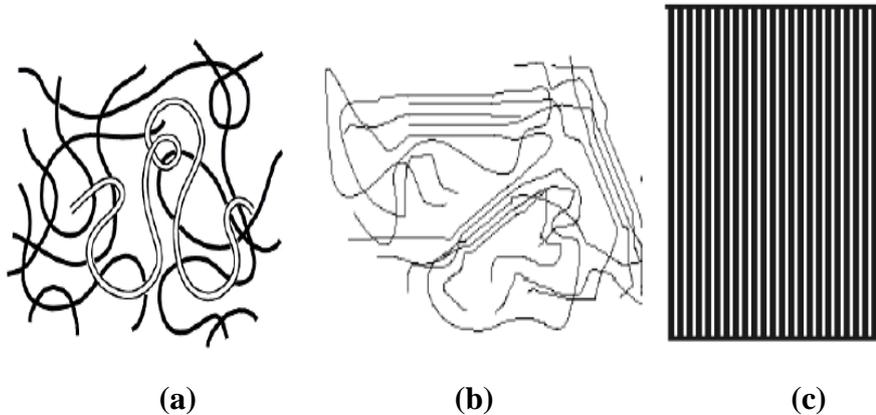


Figure 5: Les polymères amorphes, semi-cristallins, cristallin [3].

I.3 Propriétés mécaniques

I.3.1 Module d'élasticité E

Pour les matières plastiques, on constate une courbe linéaire uniquement dans le secteur le plus bas du diagramme tension – dilatation. Dans ce secteur, c'est la loi de Hook qui agit, ce qui veut dire que le quotient de tension et de dilatation (module d'élasticité) est constant [5].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (MPa) } \dots\dots \text{ (I.1)}$$

I.3.2 La limite d'élasticité

- Tous les solides (métaux, céramiques, Polymères, composites) ont une limite élastique.
- Une fois cette limite dépassée:
 - ça passe : Le matériau se déforme plastiquement ;
 - ça casse: Rupture fragile.
- Limite d'élasticité des polymères: ~1% de déformation.
- Comportement dépend de la T d'essai (Te) et de Tg [5].

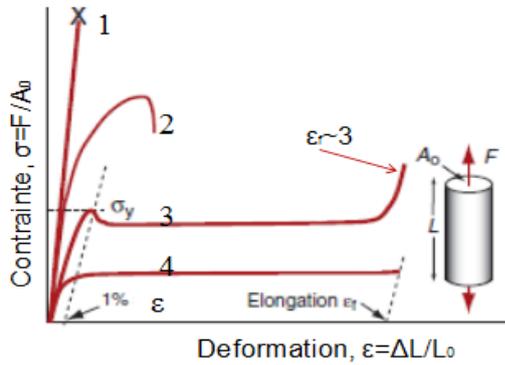


Figure 6 : Courbe σ - ϵ polymères [5]

- 1- $T_e \ll T_g$ Totalement fragile ;
- 2- $T_e = 0,7-0,8T_g$ Partiellement plastique ;
- 3- $T_e = T_g$ Étirage à froid ;
- 4- $T_e \gg T_g$ Écoulement visqueux.

I.4 Exemple de pièces usinées

Le tableau suivant représente quelques pièces de polymères usinées par une Entreprise française « Matechplast » [6] :

Tableau 1 : Pièces des polymères usinées [6].

Matières plastiques	Pièce	Domaine d'application
<p>PC est un polycarbonate non stabilisé U.V. c'est un matériau rigide à haute résistance mécanique associée à une bonne résistance aux chocs même à basse température.</p>		<p>Pièces pour des mécanismes de précision, pièce d'isolation électrique, pièce en contact avec les denrées alimentaires, organe d'appareils médicaux et pharmaceutiques.</p>
<p>PVC : haute rigidité, difficilement inflammable, haute résistance chimique, coefficient de dilatation thermique réduit, excellentes propriétés d'isolation électrique, application universelle, facilité de mise en œuvre.</p>		<p>Automobile, électrotechnique, corps de pompe, turbines de pompes, éléments de compteurs d'eau, traitement des eaux.</p>

<p>PTFE-TEFLON : un faible coefficient de friction, une excellente résistance aux agents extérieurs.</p>		<p>Automobile, fabrication de joint, absorbeurs de chocs.</p>
<p>POLYAMIDE 6-G : est un polyamide coulé pouvant être produit dans des dimensions illimitées par une polymérisation directe aux moules. Il a de meilleures propriétés physiques, extrudé, comme une résistance élevée à la traction et à la pression, une meilleure résistance à l'usure.</p>		<p>Galet de roulement et guidages, poulies de câbles de téléphériques, paliers lisses, patins de glissement roues dentées.</p>
<p>PPOM : est obtenu par polymérisation en présence d'oxygène. Le PPOM n'est pas utilisable pur (prix élevé, difficulté de transformation), d'où modification du produit par addition de polystyrène.</p>		<p>Automobile, électrotechnique, corps de pompes, turbines de pompes, éléments de compteurs d'eau, traitement des eaux.</p>

Chapitre II

Chapitre II Angles de coupe et géométries des outils

II.1 L'usinage

L'enlèvement de matière se fait par une action mécanique d'un outil coupant bien défini (matériau, dimension, revêtement...) sur une pièce bien déterminée (matériau, dimensions...), ce qui engendre des zones de cisaillements qui mettent en jeu des phénomènes tels que [7] :

- La métallurgie (dislocation, fissuration, transformations structurales...);
- La thermodynamique (écoulement, l'échauffement...);
- La tribologie (contact, frottement, usure...);
- La métrologie (macro et micro géométrie, dimensionnelle, intégrité des surfaces);
- La mécanique des matériaux (loi de comportement à des températures et des vitesses de déformation importantes);
- La mécanique des milieux continus (contraintes résiduelles, déformations, vitesse de déformation...);
- La mécanique des solides (dynamique, efforts, vibrations...).

II.2 Etat de l'art

Les polymères se mettent en œuvre le plus souvent par moulage ; cependant, des usinages sont assez souvent pratiqués pour différentes raisons comme :

- le perçage pour assemblage ultérieur par boulonnage ou rivetage ;
- le détournage de pièces moulées ;
- la fabrication de petites séries ;
- l'obtention de cotes extrêmement précises ;
- la découpe de préforme à thermoformer.

Les caractéristiques des polymères qui, de près ou de loin, ont une influence sur les opérations d'usinage, sont les suivantes :

- **Le module d'élasticité et la dureté** : les plastiques sont très souples par rapport aux aciers (modules compris entre 1 000 et 20 000 MPa) et beaucoup moins durs, ce qui impose, par exemple, des précautions de serrage particulières pour ne pas déformer la pièce ni en marquer la surface ;

- **Les contraintes internes** : les pièces en plastique contiennent souvent des contraintes internes après moulage, dues, en particulier, au retrait de la matière passant de l'état liquide à l'état solide. Il arrive fréquemment que l'usinage modifie la répartition de ces contraintes. Des précautions doivent par conséquent être prises pour qu'il n'y ait pas d'accumulation de contraintes susceptibles d'entraîner des fissurations.

L'objectif de ce travail est de présenter la coupe à l'échelle du copeau et de l'outil. La terminologie de la formation du copeau est décrite à travers la coupe orthogonale qui a l'avantage de limiter le nombre de paramètres influençant les diverses sollicitations thermomécaniques (contraintes, déformations, vitesses de déformation, la température)

La coupe la plus élémentaire est la coupe dite « orthogonale » (voir figure 7). Dans cette configuration, l'arête de coupe est perpendiculaire à la fois aux directions de coupe et d'avance. L'outil est incliné de l'angle de coupe α par rapport à la verticale et se déplace avec la vitesse de coupe V_c . La quantité de matière enlevée est représentée par l'épaisseur du copeau non déformé t_1 (ou avance par tour f) et la profondeur de passe a_p . Le copeau d'épaisseur t_2 se déplace le long de la face de coupe de l'outil avec la vitesse V_{cop} et quitte en se courbant l'interface outil-copeau à la distance l_c de la pointe de l'outil (longueur de contact).

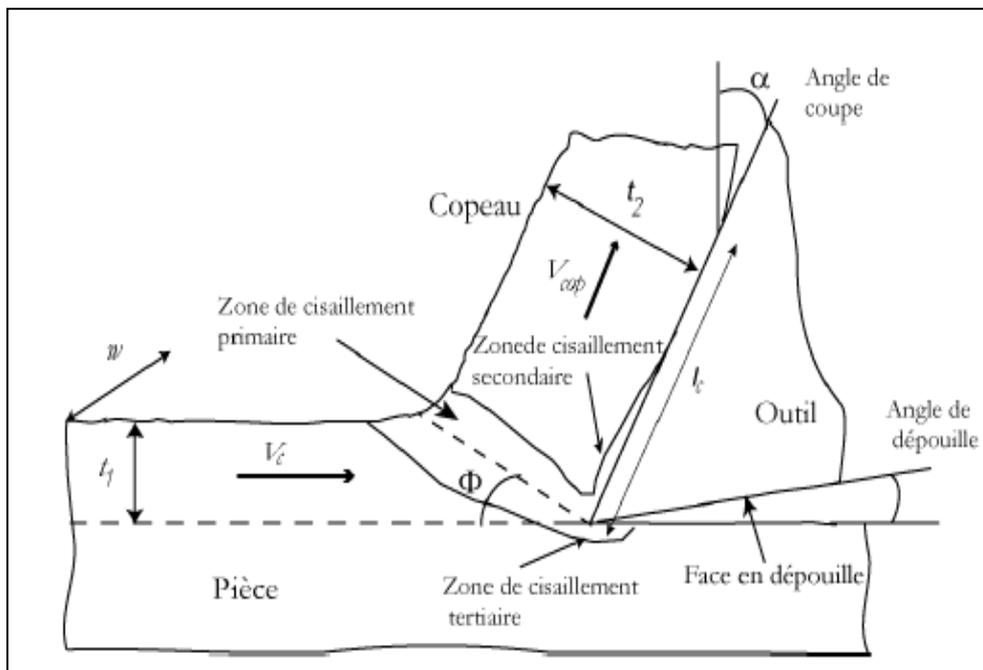


Figure 7: Principales zones de déformation et paramètres de la coupe orthogonale.

La vitesse de coupe joue un rôle fondamental sur la stabilité de la coupe. La quantité de chaleur dégagée dans les zones de coupe croît avec la vitesse de coupe, de telle sorte que la température s'élève avec cette dernière. La segmentation des copeaux est donc principalement observée dans le domaine des grandes vitesses de coupe. Bien que qualifié d'instable, ce phénomène peut être recherché car il est associé à une baisse des efforts et à une amélioration de l'évacuation des copeaux.

En fonction des conditions de coupe et du couple outil/matière, des copeaux de morphologies très différentes peuvent être formés. On les classe traditionnellement en trois catégories :

- Les copeaux continus formés dans un état de déformation plastique stationnaire (associés à une coupe stable) : les champs de déformation, des vitesses de déformation et de la température sont constants dans le temps,
- Les copeaux formés avec arrête rapportée qui résultent d'un état d'équilibre dynamique du système composé de l'outil, du copeau et d'une zone de stagnation de matière au niveau de l'arrête,
- Les copeaux discontinus ou segmentés formés dans un état de déformation plastique non stationnaire; les copeaux sont composés d'éléments plus ou moins connectés entre eux. On parle aussi de copeaux ondulants ou festonnés, de copeaux à localisation de déformation ou encore de copeaux à dents de scies. La segmentation des copeaux est très influencée par les phénomènes de fissuration et de rupture, d'instabilité et de localisation des déformations plastiques. La coupe est alors qualifiée d'instable.

II.3 Les outils de coupe

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement sous forme de copeaux. Il existe une très grande variété d'outils de coupe : différents types de géométries, de matériaux et de revêtement. Malgré leur destination ainsi que leur aspect extérieur différent, n'importe quel outil comporte une partie active, c'est à dire celle qui enlève directement le copeau. La partie active de tous les outils de coupe, quelque soit sa forme ressemble à un outil de tournage classique. Tandis que les dents des outils de coupe spéciaux, tels que la meule ont des grains dont les arrêtes enlèvent les copeaux [8].

On exige de l'outil d'avoir les propriétés suivantes [8] :

- La pression d'exécution de la forme de la pièce à usiner.
- La précision des cotes à usiner.
- L'état de surface de la pièce à usiner.
- L'efficacité influence sur le rendement du travail.
- La solidité (stabilité).
- Le prix de revient bas.

II.3.1 Éléments de l'outil

Les principaux éléments des différents outils sont semblables. Un outil de coupe peut être caractérisé par une géométrie d'arrête et une orientation dans l'espace définie par des angles de coupe normalisés. Généralement, dans un outil de coupe on trouve les éléments suivants (voir figure 8) [9] :

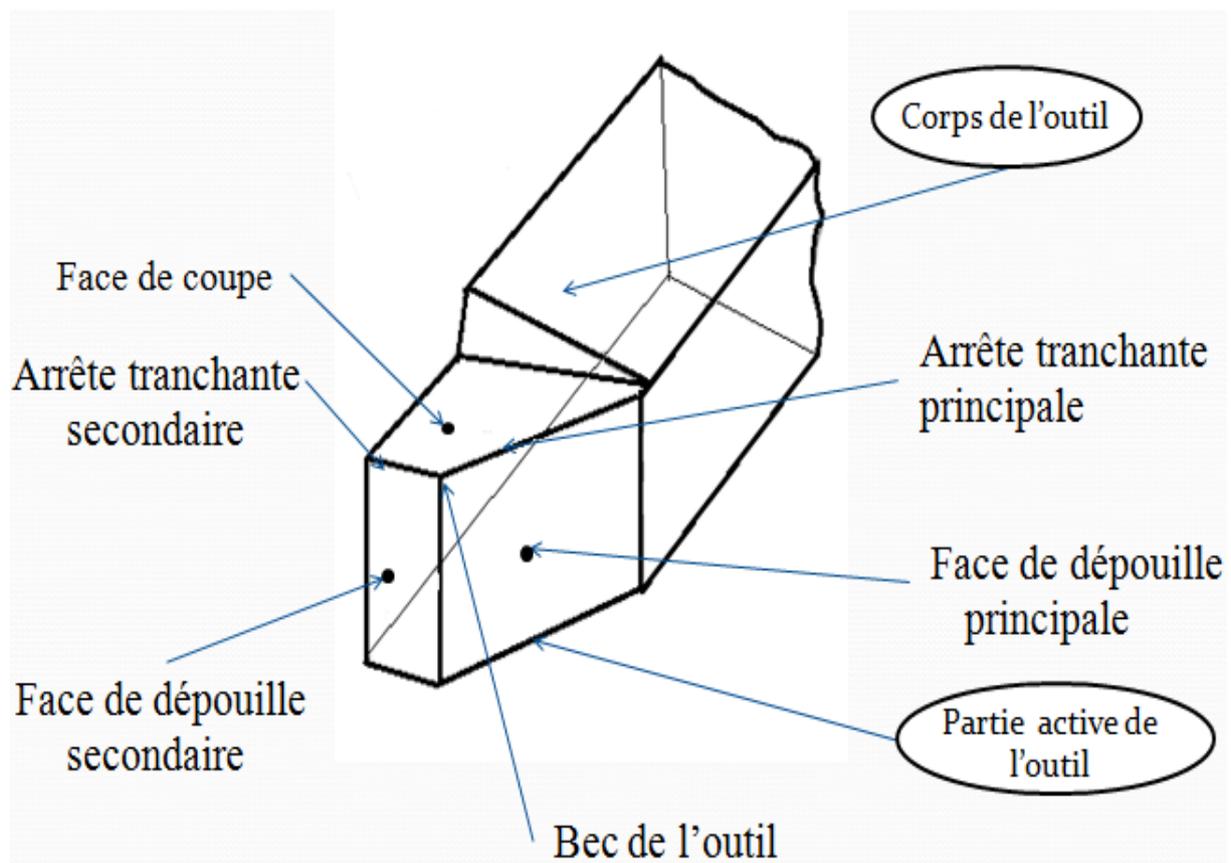


Figure 8: Élément de l'outil [10].

II.3.1.1 Corps de l'outil

C'est la partie de l'outil qui porte éléments composants l'outil (éléments coupants où les plaques) et qui sert à sa fixation et à mise en position sur la machine [10] ;

II.3.1.2 Partie active de l'outil

C'est la partie qui intervienne directement dans l'opération de coupe. La partie active de l'outil est composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arrêtes tranchantes [10].

a) Face de coupe $A\gamma$

C'est la surface sur laquelle glisse le copeau lors de la coupe [10].

b) Face de dépouille $A\alpha$

C'est la surface devant laquelle passe la surface coupée par l'outil. En distingue la face en dépouille principale et la face en dépouille secondaire. La face en dépouille principale est celle dont l'intersection avec la face de coupe donne l'arrête tranchante principale [10].

c) Arrête tranchante principale S

C'est l'arrête tranchant destiné à l'enlèvement de la matière. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face en dépouille principale $A\alpha$ [10].

d) Arrête tranchante secondaire S'

C'est une arrête qui commence à l'extrémité de l'arrête principale et qui s'étend dans une autre direction. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face en dépouille secondaire $A\alpha'$. Certains outils possèdent plusieurs arrêtes secondaires [10].

e) Bec de l'outil

C'est la partie où se rejoignent l'arrête principale et l'arrête secondaire. Cette partie peut être droite, arrondie, où vive [10].

II.3.2 Plans de l'outil

a) Plans de référence de l'outil Pr : plans passant par le point considéré de l'arrête et contenant l'axe de l'outil ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil [10] ;

b) Plan d'arrête de l'outil P_s : plans tangent à l'arrête, au point considéré, et perpendiculaire au plans de référence de l'outil Pr [10] ;

c) Plans de travail conventionnel P_f : plans perpendiculaire au plans de référence de l'outil Pr , au point considéré de l'arrête, et parallèle à la direction supposée d'avance de l'outil [10] ;

- d) **Plans vers l'arrière de l'outil P_p** : plans perpendiculaire au plans de référence de l'outil P_r et au plans de travail conventionnel P_f , au point considéré de l'arrête [10].

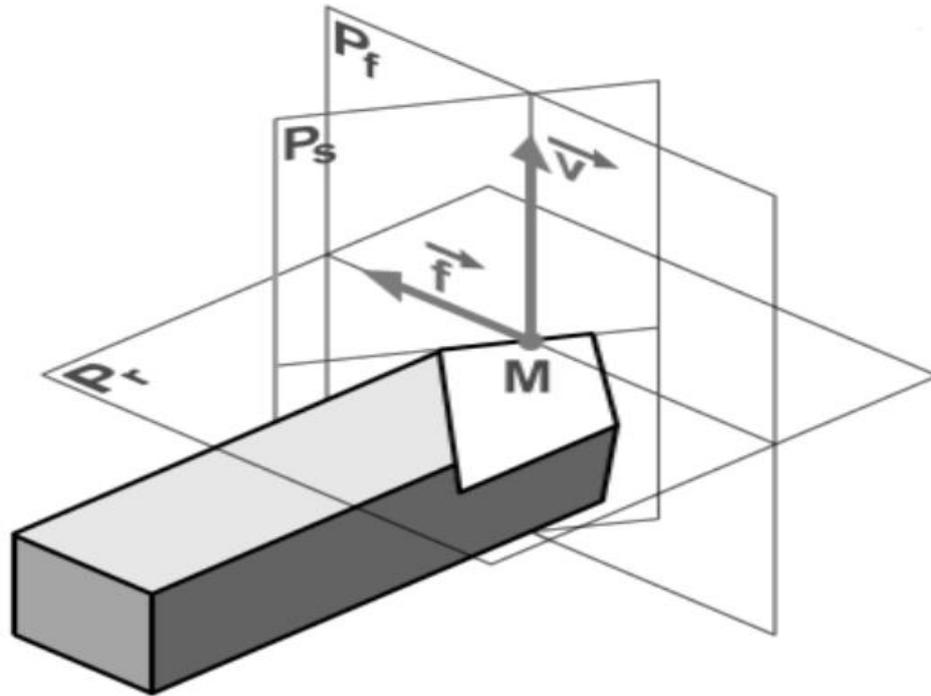


Figure 9: Plan de l'outil [10].

II.3.3 Angle de l'outil

- a) **Angle de direction d'arrête de l'outil K_r** : (voir figure 10.a) angle aigu mesuré dans le plan de référence P_r , entre le plan de d'arrête P_s et le plans de travail P_f . Il est mesuré de P_f vers P_s et dans le sens où la trace P_r s'éloigne du bec de l'outil [9].
- b) **Angle d'inclinaison d'arrête de l'outil λ_s** : (voir figure 10.b) angle aigu mesuré dans le plan d'arrêt P_s , entre l'arrêt et le plan de référence P_r . Il est positif lorsqu'en s'éloignant de la pointe de l'outil l'arrête se trouve en dessous du plan P_r [9].
- c) **Angle de pointe de l'outil ϵ_r** : (voir figure 10.a) C'est l'angle mesuré dans le plan P_r , entre le plan d'arrêt P_s et le plans d'arrêt secondaire P_s' [9].
- d) **Angle de direction d'arrête secondaire de l'outil K_r'** : C'est l'angle, mesuré dans le plan P_r , entre le plan conventionnel de travail P_f et la projection de l'arrête secondaire dans le plan de référence de l'outil P_r [9].

– Les angles de direction d'arrête de l'outil, de pointe de l'outil et de direction d'arrête secondaire de l'outil sont liés par la relation :

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

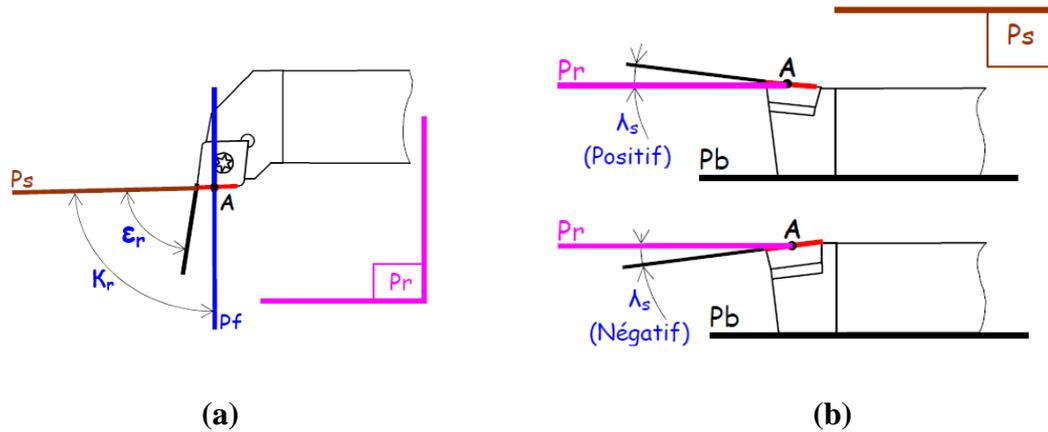


Figure 10: Angle d'arrêt de l'outil [9].

II.3.4 Angle des faces.

La position des faces de coupe et de dépouille est définie dans des plans de sections particuliers qui passent tous par un point considéré de l'arrêt. Lorsqu'on fait une section de l'outil par ces plans et quelques soit le plan considéré pour définir la section on trouve [11] :

- a. **Angle de dépouille α** : angle aigu entre la face de dépouille $A\alpha$ et le plan d'arrêt P_s (P_{se}) ;
- b. **Angle de taillant β** : angle aigu entre la face de coupe $A\gamma$ et la face de dépouille $A\alpha$;
- c. **Angle de coupe γ** : angle aigu entre la face de coupe $A\gamma$ et le plan de référence P_r (P_{re}).

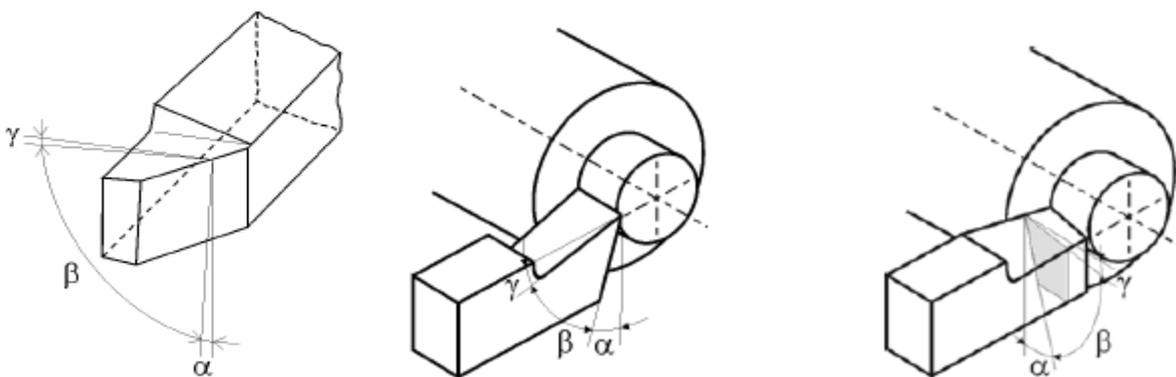


Figure 11: Angle des faces [11].

Dans un même plan de section, que ce soit dans le système de l'outil en main ou de l'outil en travail, ces trois angles sont liés par la relation :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de section suivant [11] :

- **Po (Poe)** : plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence Pr (Pre) et au plan d'arrêt Ps (Pse), au point considéré de l'arrêt ;
- **Pn (Pne)** : plan normal à l'arrêt, plan perpendiculaire à l'arrêt au point considéré (Pn = Pne) ;
- **Pf** : plan de travail conventionnel (plan de travail Pfe) ;
- **Pp** : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail Ppe).

Le tableau suivant représente quelques angles de coupe des polymères :

Tableau 2 : Angles de coupe [12].

Matières plastiques	Angle de dépouille (°)	Pente d'affutage (°)	Angle d'arrêt (°)
PVC	8 – 10	0 – 5	50 – 60
PMMA	5 – 10	0 – 4	15
PTEF	10 – 15	15 – 20	0 – 45
Polycarbonate PC	5 – 15	0 – 15	0 – 45
Polyuréthane	10 – 15	15 – 25	/
Polystyrène	6	Négative	20 – 30
Polyamide	40	Nulle	10

II.3.5 Matériaux d'outil

a) Carbures

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide [13].

Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

- Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement.
- Composition : Noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°) ou en carbure de titane (3100°).

b) Cermets

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de titane, de carbonitrure de titane ou de nitrure de titane. Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...) [13].

c) Céramique

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium. Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité)

Avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée. Et permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil) [13].

d) Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures [13].

Son utilisation requiert :

- Une machine stable ;
- Une grande rigidité de la pièce et de la porte pièce ;
- Un arrosage.

e) Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules. Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arrêt rapportée (donc peut d'encrassement). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650° se transforme en un vulgaire morceau de graphite... On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à base température : alliage d'aluminium, de cuivre : de magnésium, résines thermodurcissables... [13].

f) ARS

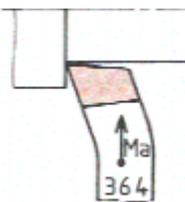
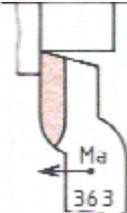
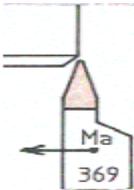
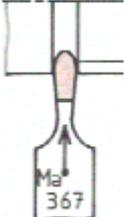
Les outils ARS (Acier rapides supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les fortes, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible. Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arrête de coupe [13].

- Fabrication : par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres ;
- Composition : 0.7 % de carbone minimum, 4 % de chrome environ ;
- Dureté : de 63 à 66 Hrc.

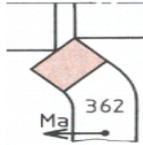
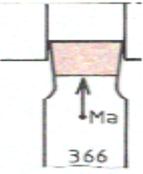
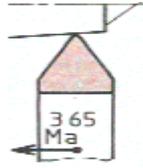
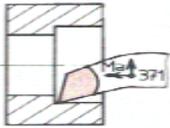
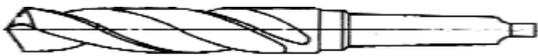
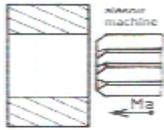
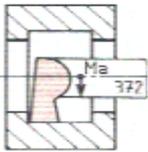
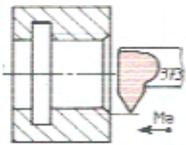
II.3.6 Les outils de tournage

Le tableau suivant représente quelques outils de tournage

Tableau 3 : Les outils de coupe de tournage ARS [13].

Outil à dresser d'angle	
Outil couteau	
Outil à fileter	
Outil à saigner	

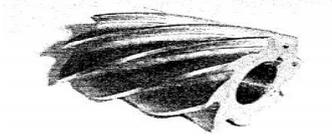
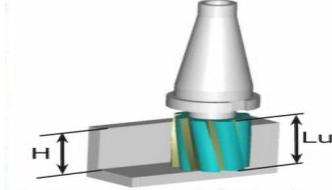
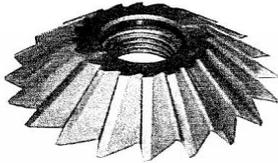
Chapitre II : Angles de coupe et géométries des outils

Outil à charioter	
Outil pelle	
Outil à retoucher	
Outil à aléser – dressé	
Foret	
Alésoir	
Outil à chambrer	
Outil à fileter intérieur	

II.3.7 Les outils de fraisages

Le tableau suivant représente quelques outils de fraisage

Tableau 4 : Les outils de fraisage ARS [14].

<p>Foret</p>	
<p>Fraise 1 taille</p>	
<p>Fraise 2 tailles à queue cône</p>	 <p>Longueur utile de la fraise : L_u Hauteur usinée : H Attention : $L_u > H$</p>
<p>Fraise 3 tailles</p>	
<p>Fraise conique de forme</p>	

Chapitre III

Chapitre III Procédés d'usinage et conditions de coupe

Parmi les différentes techniques de transformation de la matière, la mise en forme par enlèvement de matière (usinage) présente un poste onéreux tant par le parc des machines mobilisées que par les outils de coupe utilisés ou la perte inévitable de la matière par formation de copeaux, mais néanmoins c'est la seule méthode qui permet de produire des formes complexes avec des tolérances très serrées.

III.1 Tournage

III.1.1 Définition

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe M_c , qui le mouvement principal du procédé. L'outil est animé d'un mouvement de translation parallèle ou oblique par rapport à l'axe de rotation c'est le mouvement d'avance M_f [15].

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [15].

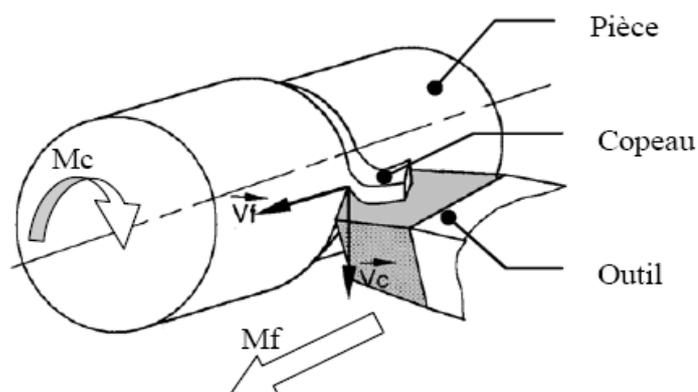


Figure 12: Procédure de tournage [16].

III.1.2 Les tours

Les tours permettent de réaliser des surfaces de révolution et hélicoïdales (filetage) : cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale des ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenu par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche [17].

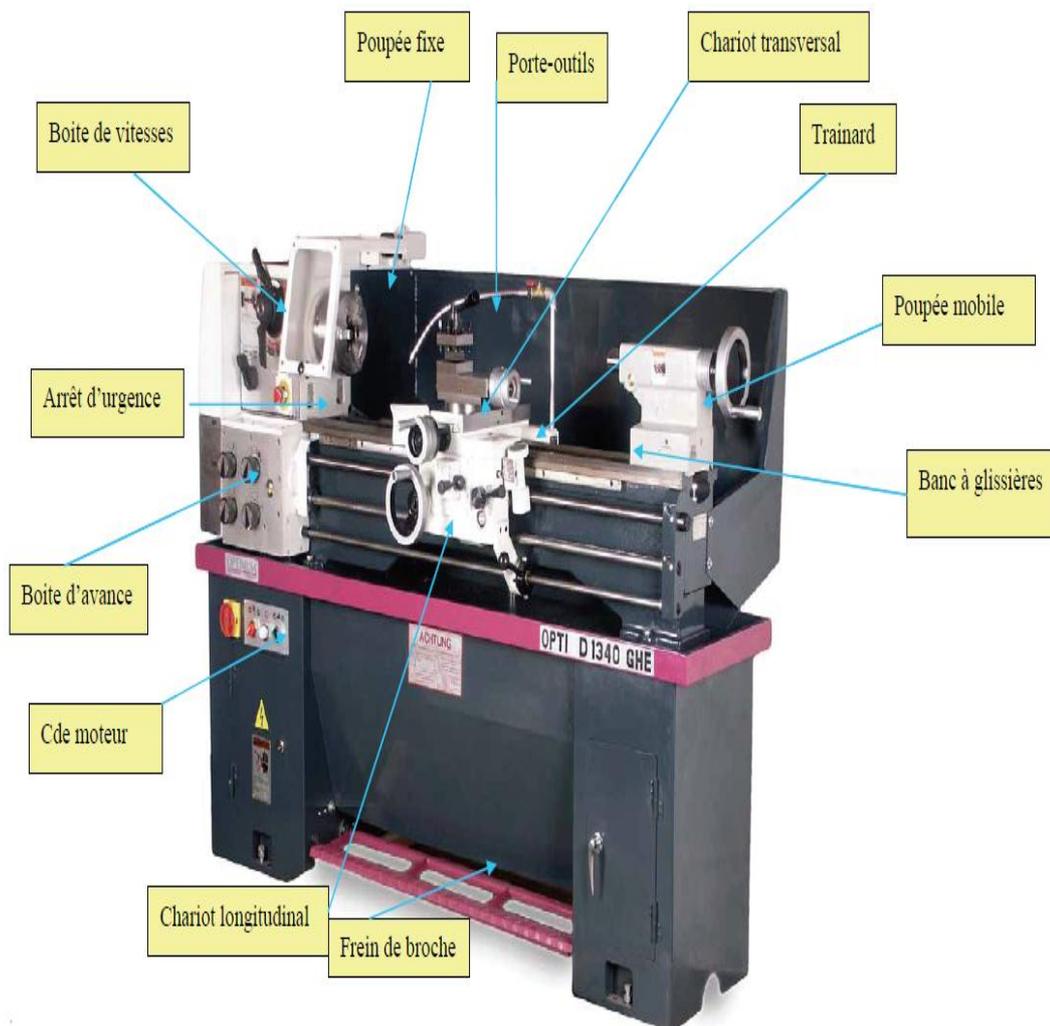


Figure 13: Composantes de tour [17].

III.1.3 Classification des machines de tour

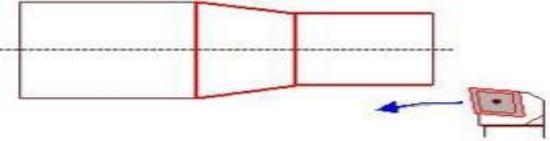
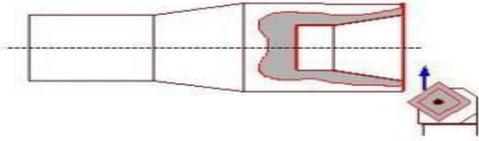
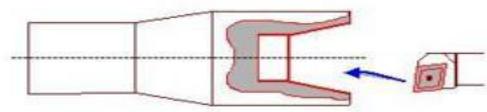
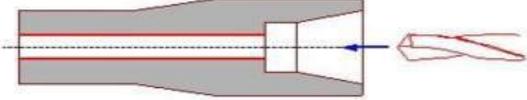
Les machines outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont [18] :

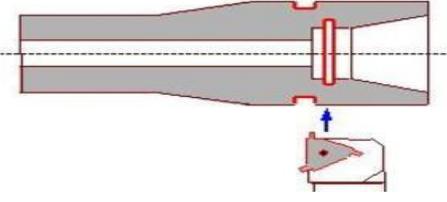
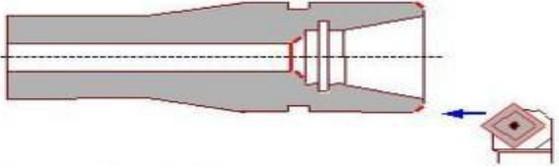
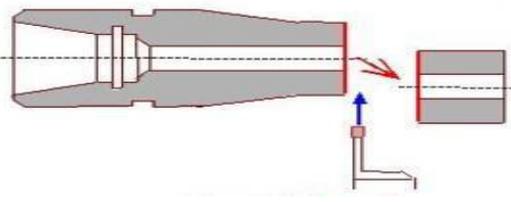
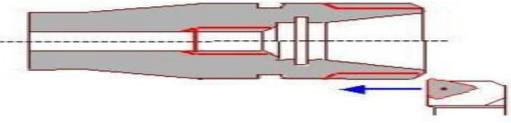
- Les tours parallèles à charioter et à fileter ;
- Les tours à copier ;
- Les tours semi-automatiques ;
- Les tours automatiques ;
- Les tours automatiques multibroches ;
- Les tours à commandes numériques.

III.1.4 Différentes opérations de tournage

Le tableau suivant résume les différentes opérations de tournage

Tableau 5 : Différentes opérations de tournage [18].

<p>Chariotage : opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.</p>	
<p>Dressage : opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure.</p>	
<p>Alésage : opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure.</p>	
<p>Perçage : opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'un foret.</p>	

<p>Rainurage : opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple.</p>	 A technical diagram showing a cylindrical workpiece with a tapered section. A cutting tool is positioned to create an internal groove. A blue arrow indicates the tool's axial movement, and a red arrow indicates the cutting direction.
<p>Chanfrenage : opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.</p>	 A technical diagram of a cylindrical workpiece with a chamfered end. A cutting tool is shown removing a sharp corner. A blue arrow indicates the tool's axial movement, and a red arrow indicates the cutting direction.
<p>Tronçonnage : opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.</p>	 A technical diagram showing a cutting tool performing a parting operation on a cylindrical workpiece. A red arrow indicates the cutting direction, and a blue arrow shows the tool's axial movement. A small inset shows the resulting cut-off section.
<p>Filetage : opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.</p>	 A technical diagram of a cylindrical workpiece with a threaded section. A cutting tool is shown creating the threads. A blue arrow indicates the tool's axial movement, and a red arrow indicates the cutting direction.

III.2 Fraisage

III.2.1 Définition

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

- Mouvement de rotation de la fraise qui est entraîné par la broche de la machine, M_c (mouvement rapide circulaire de coupe).
- Mouvement de translation de la pièce qui est fixée sur la table de la machine, M_a (mouvement lent rectiligne uniforme d'avance). Le mouvement de translation est orienté de façon à pousser la pièce contre la fraise suivant une direction généralement perpendiculaire par rapport à son axe.

Le fraisage permet la réalisation des pièces : prismatiques, de révolution intérieure et extérieure, de profils spéciaux, hélices, cames, engrenages....etc [19].

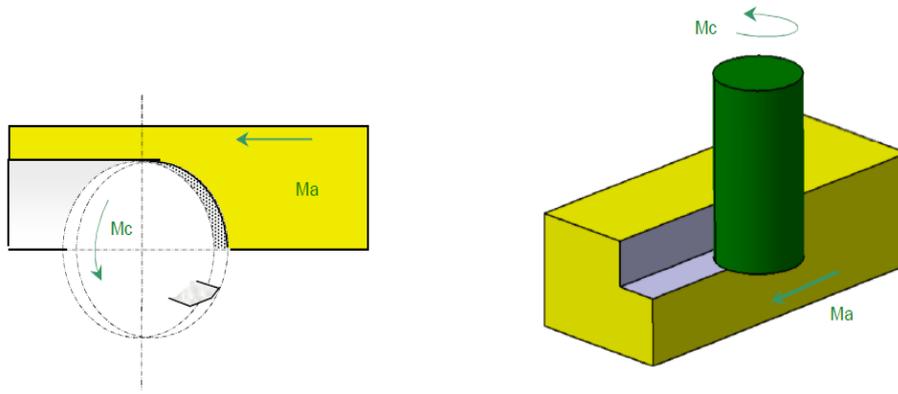


Figure 14: Mouvement de coupe et d'avance [19].

III.2.2 Mode de coupe

Il existe deux modes de coupe, selon le sens de rotation de la fraise et la direction du déplacement de la pièce à usiner.

III.2.2.1 Fraisage en opposition

En fraisage en opposition, la fraise s'oppose au mouvement de la pièce : les vecteurs vitesses de la coupe et la vitesse d'avance sont opposés. Les efforts de coupe ont donc tendance à plaquer l'écrou de la table contre les filets de la vis. Le jeu n'intervient donc pas (voir la figure 15.a) [20].

III.2.2.2 Fraisage en avalant

Si on fraise en avalant, la fraise entrainerait brutalement la pièce de la valeur de jeu, en déplaçant la table et l'écrou en appui sur le second flanc de filets de la vis. L'épaisseur du copeau serait alors très importante d'où risque de casse de l'outil (voir la figure 15.b) [20].

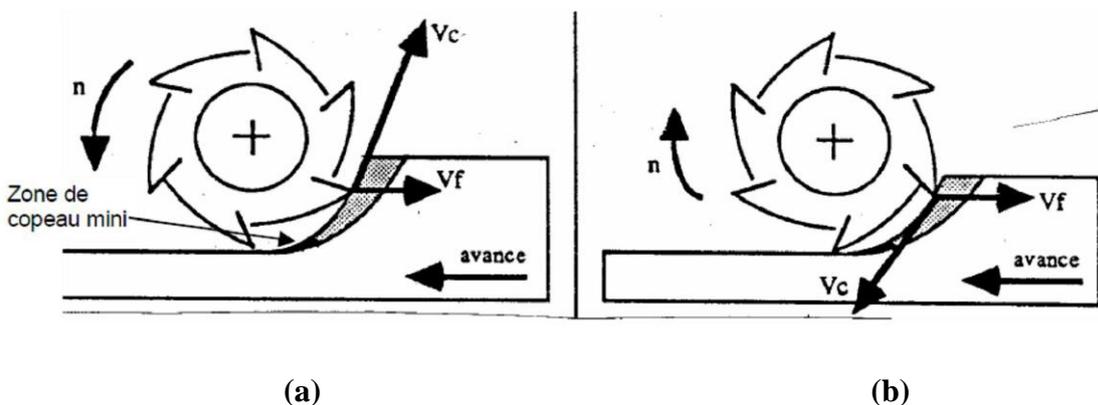


Figure 15: Fraisage en opposition et en avalant [20].

III.2.3 Les fraiseuses

La fraiseuse est une machine-outil permettant de réaliser des opérations d'usinage à l'aide d'une fraise. Elle peut également être équipée d'un foret, de taraud ou d'alésoir pour réaliser des opérations de perçage et taraudage.

La pièce à usiner est serrée dans l'étau (voir la figure16). L'étau est positionné par l'intermédiaire de rainure en T puis serre sur la table. La table peut se déplacer suivant les axes X, Y et Z soit manuellement (à l'aide des volants) soit automatiquement (avec des moteurs électriques). Un cône de broche est fixé sur la fraise, l'ensemble est mis en position sur la broche et serré par une visse. La broche est entraînée en rotation par un moteur électrique indépendant [21].

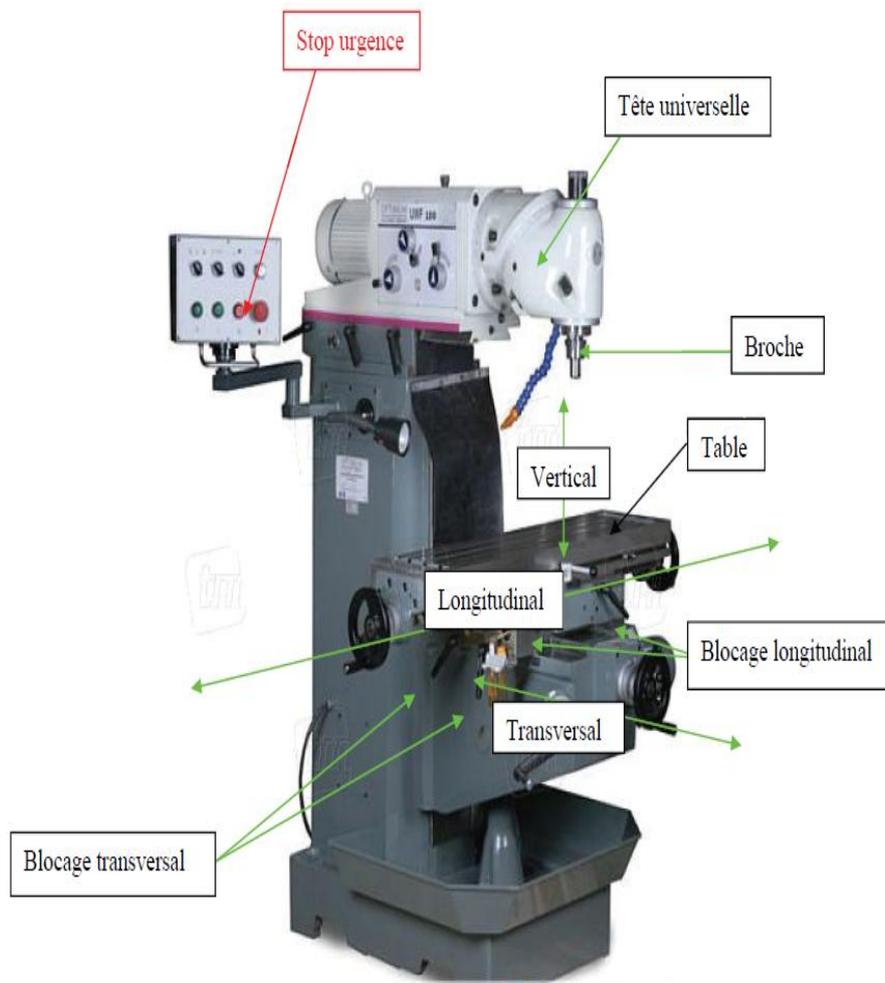


Figure 6: Composantes de la fraiseuse [21].

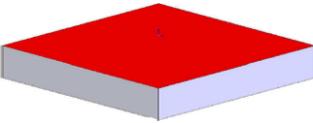
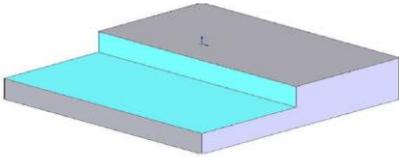
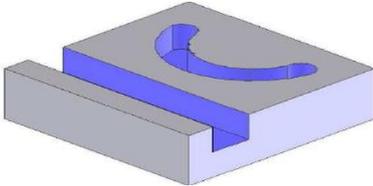
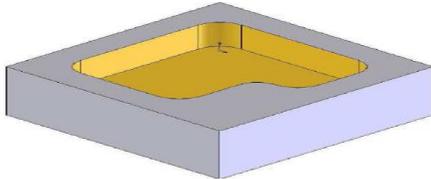
III.2.4 Classification des fraiseuses [20]

- Fraiseuses d'outillage ;
- Fraiseuses horizontales ;
- Fraiseuses verticales ;
- Fraiseuses de production (a programme, commande numérique).

III.2.5 Opération de fraisage

Le tableau suivant résume les différents types d'opérations en fraisage

Tableau 6 : Opérations de fraisage [22,23].

Surfaçage : c'est l'usinage d'un plan par une fraise.	
Plans épaulés : c'est l'association de 2 plans perpendiculaires	
Rainurage : c'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire aux deux autres plans.	
Poche : est délimitée par des surfaces verticales quelconques. C'est une forme creuse dans la pièce.	

III.3 Condition de coupe

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se trouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante (voir la figure 17).

Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau. L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner. Ces mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine outil [14].

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidités de l'usinage, usure modérée de l'outil,...) on doit régler les paramètres de coupe [14].

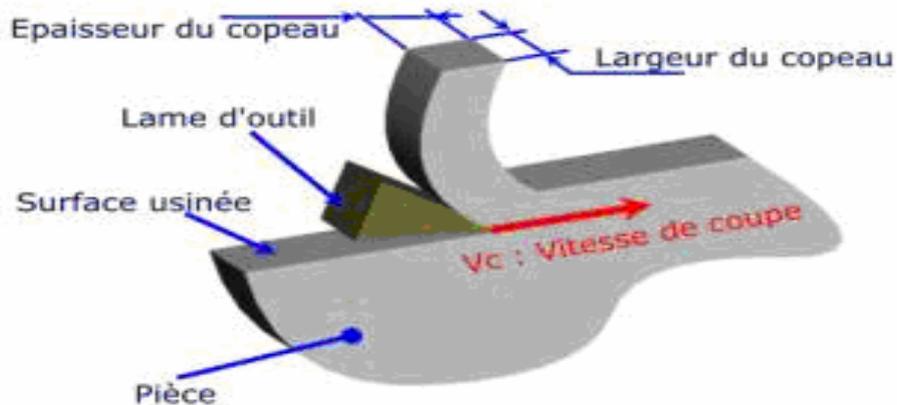


Figure 7: Principe d'usinage [14].

Il ya plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de coupe, notamment [14]:

- Le type de la machine (tournage, fraisage, perçage) ;
- La puissance de la machine ;
- La matière usinée (polymère, acier, aluminium) ;
- La matière de l'outil (ARS, carbure) ;
- Le type de l'opération (chariotage, perçage, surfaçage).

L'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans des bonnes conditions. Pour cela il faut déterminer certains paramètres spécifiques [14]:

- La vitesse de coupe V_c ;
- La vitesse d'avance F ;
- La profondeur de passe a .

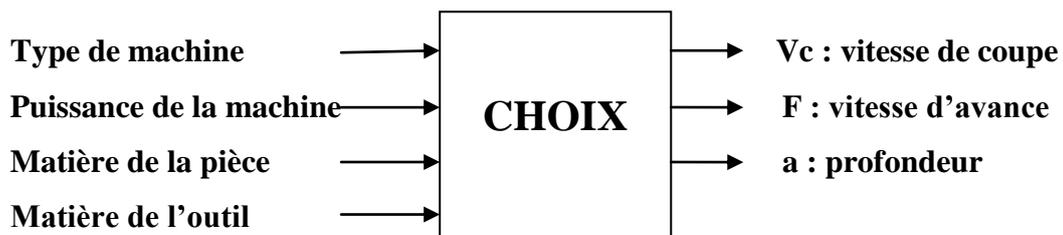


Figure 8: Condition de coupe [14].

III.3.1 Explication des critères de choix :

Tous ces critères sont intimement liés.

➤ **Type de machine**

Suivant le type d'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc choisir la machine à utiliser. Donc il faut choisir entre le tournage, fraisage et le perçage. Naturellement il y a souvent plusieurs possibilités pour réaliser un même type d'usinage [14].

➤ **Puissance de la machine**

La puissance de la machine influe sur les performances. Pour l'usinage, il y a deux grands cas de figure [14] :

- **Usinage en ébauche** : on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps, l'objectif est dans ce cas d'augmenter au maximum le débit de copeaux. Mais la machine doit être suffisamment puissante, ainsi que l'attachement pièce/porte-pièce, sinon la machine peut caler ou la pièce peut voler ;
- **Usinage en finition** : cette fois, c'est la qualité de réalisation qui est importante. La surface doit être lisse, les cotes doivent être correctes. Comme les efforts en jeu sont plus faibles que pour une ébauche, la puissance de la machine n'est pas un critère primordial.

➤ **Matière de la pièce**

Il est évident que les efforts de coupe ne sont pas les mêmes si vous usinez une pièce en polymère ou en acier. Donc la matière influe sur des choix relatifs à la puissance machine [14].

➤ **Matière de l'outil**

C'est l'outil qui doit usiner la pièce et non l'inverse, donc cela influe sur l'usure de l'outil et sa durée de vie [14].

III.3.2 Cas de tournage

Le mouvement de coupe anime la pièce (pièce tournante). On en déduit la vitesse de coupe V_c . Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil par rapport à la pièce, on en déduit V_f [17].

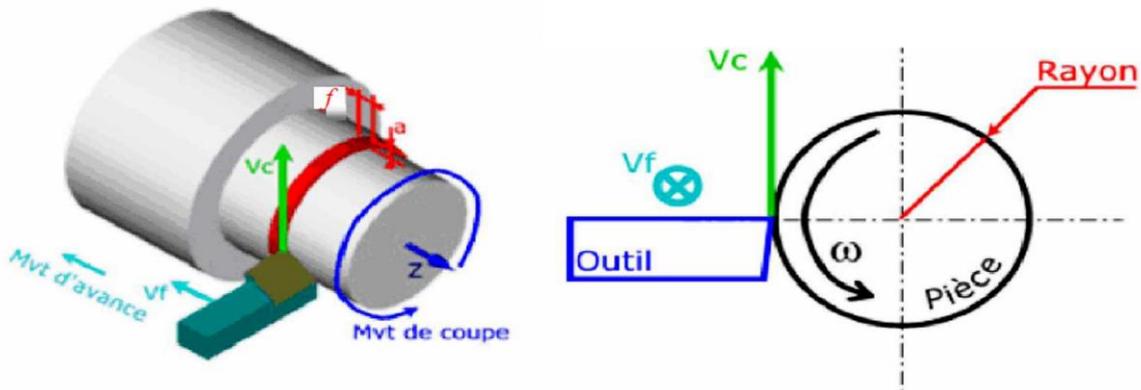


Figure 9 : Conditions de coupe en tournage [17].

III.3.2.1 Vitesse de coupe

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse ω rad/s (soit N tr/min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via la porte pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre D , la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil vaut [15]:

$$V_c \text{ (m/min)} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad \dots\dots \text{(III.1)}$$

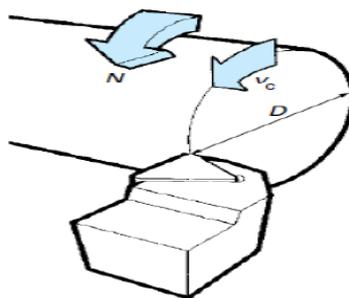


Figure 20 : Vitesse de coupe [15].

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe, soit avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique :

- V_c : vitesse de coupe (m/min) ;
- D : diamètre de la pièce (mm) ;
- N : fréquence de rotation (tr/min).

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés [15].

III.3.2.2 Vitesse d'avance – Avance par tour

La vitesse d'avance V_f (mm/min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti.

L'avance par tour f (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectuée une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influence non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais sur la manière dont ils se brisent [15].

$$V_f = f * N \quad \dots(III.2)$$

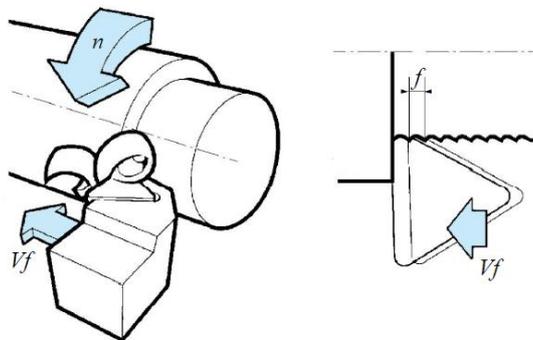


Figure 10 : Vitesse d'avance – Avance par tour [15].

III.3.2.3 Profondeur de passe

La profondeur de coupe « a » (mm) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usinée et le diamètre usiné. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arrête de l'outil [18,24].

III.3.3 Cas de fraisage

Le mouvement de coupe anime l'outil (fraise tournante). Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil [14].

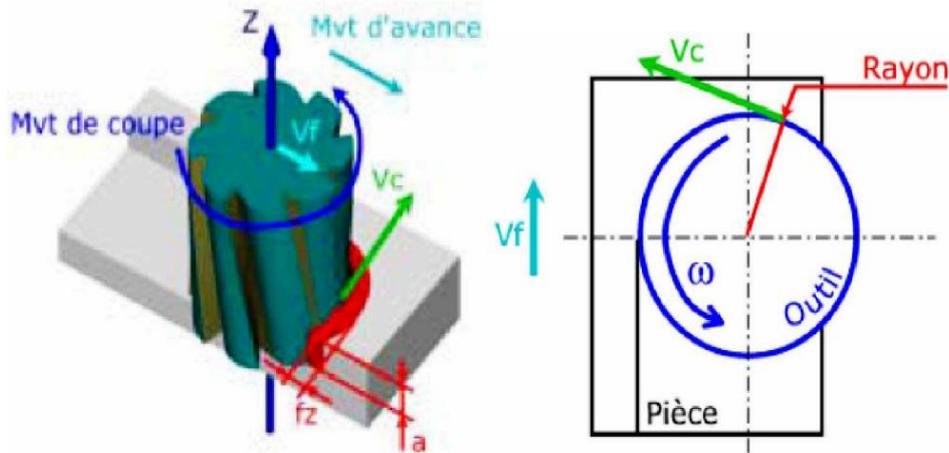


Figure 11 : Condition de coupe en fraisage [14]

III.3.3.1 Vitesse de coupe

Elle indique la vitesse à laquelle l'arrête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné (Voir la figure 23) [15].

La vitesse de broche (N en tr/min) (voir figure 23) est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute. La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par la formule [15] :

Avec D : Le diamètre de la fraise

$$Vc \text{ (m/min)} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad \dots\text{.(III.3)}$$

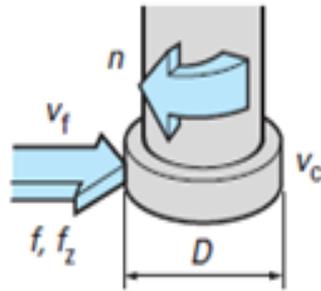


Figure 12 : Vitesse de coupe – vitesse de broche [15].

III.3.3.2 Vitesse d'avance-Avance par tour-Avance par dent

- **Vitesse d'avance V_f (mm/min)** (figure 24) est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de la table [15].
- **Avance par tour f (mm/tour)** est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfer à travailler en finition. Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation [15].
- **Avance par dent f_z** est un paramètre important en fraisage. L'avance par dent indique la distance linéaire parcourue par l'outil alors qu'une certaine dent est engagée. L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc être exprimée en fonction du nombre d'arrête de l'outil (z) et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par tour [15].

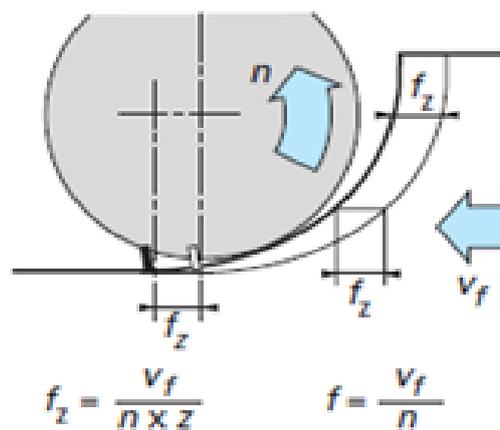


Figure 13 : Vitesse d'avance – avance par dent [15].

III.3.3.3 Profondeur de passe

La profondeur de passe « a » (mm) correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce [15].

Le tableau suivant représente les conditions de coupe de certains polymères :

Tableau 7 : Condition de coupe [12].

Matière plastiques	Avance (mm/tr)	Vitesse de coupe (m/min)
Thermodurcissable moules	0.1	45 à 60
Polyamide	0.3	100
Polystyrène	0.04	60 à 80
PVC	0.3 – 0.5	200 à 400
PMMA	0.1 – 0.2	200 à 300
Polycarbonate PC	<0.05	200 à 400

Chapitre IV

Chapitre IV Résultats et discussions

IV.1 Option pour la méthode des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences est à la fois nouvelle et ancienne. Nouvelle pour l'ingénierie mécanique et électronique qui traditionnellement, est portée vers les sciences exactes. Ce n'est que depuis quelques années qu'une approche statistique donnant la part aussi belle à l'incertain suscite un tel regain d'intérêt chez les esprits scientifiques, toutes formations confondues.

En fait, on prend conscience aujourd'hui que loin de nier la connaissance technique, la méthode des plans d'expériences la valorise. Elle permet aux techniciens de **structurer leurs démarches expérimentales**, de confronter et de valider leurs propres hypothèses, pour mieux comprendre les phénomènes étudiés et solutionner leurs problèmes.

La méthode des plans d'expériences permet de tirer d'un nombre d'essais donné un maximum d'informations **crédibles** concernant l'influence des facteurs. Elle permet notamment de maximiser le ratio informations recueillies/nombre d'essais réalisés. Elle offre ainsi la possibilité de quantifier et de hiérarchiser les effets d'un grand nombre de facteurs du système étudié, et cela avec un nombre d'essais relativement faible, c'est-à-dire dans le minimum de temps et de coûts.

L'intérêt pour le développement technologique étant reconnu, la méthode des plans d'expériences pénètre des secteurs d'activité comme l'industrie mécanique, l'automobile, l'électronique, le spatial, etc.

IV.2 Partie expérimentale

Dans cette partie nous avons élaboré un protocole expérimentale afin de voir l'influence des paramètres de coupes sur la formation du copeau, le paramètre de vitesse d'avance par tour étant pris constant, $f_a = 0.1$ mm/tr, ce paramètre est le plus important pour l'état de surface de la pièce, nous avons définie ce dernier constant afin de travailler dans le but d'avoir un bon état de surface tout en assurant une bonne coupe et une meilleur évacuation du copeau, ceci est assuré par le bon choix de la combinaison, vitesse de coupe notée V_c , de la profondeur de passe P_r , et de l'angle de coupe de l'outil élaboré.

Le tableau suivant résume les variations des conditions de coupes choisi dans notre cas, suivant le vocabulaire de la méthode des plans d'expérience nous avons trois facteurs (V_c , Pr , γ) à trois niveaux pour chacun (niveau dit -1, niveau dit 0, niveau dit +1).

Tableau 8 : Les valeurs variation de valeurs prises pour chaque facteur de notre étude.

Facteur	Niveau -1	Niveau 0	Niveau +1
Vitesse de coupe	60	120	250
Profondeur	3	4,5	6
Angle de coupe	0°	2,5°	5°

IV.2.1 Préparation des essais

Les essais sont faits sur le tour à commande numérique type *emco concept turn 55* à commande Siemens 810T (figure 25) disponible au niveau du laboratoire de FAO au niveau du hall de technologie de l'université de Bejaïa. Les caractéristiques de cette machines sont:

- Puissance de 750W ;
- Couple de coupe de 14 Nm ;
- Force lors de l'avance de chariot: 1000 N.

Le détail de toutes les caractéristique de cette machine sont données en annexe A



Figure 14 : Tour à commande numérique type *emco concept turn 55*, à commande Siemens 810 T.

IV.2.1.1 Préparation des outils de coupe

Les outils de coupe sont élaborés par nous même en utilisant des barreaux en acier rapide supérieur de section 12x12 (mm²) et de longueur de 60 mm, les détails de la forme géométrique de ces outils sont donné sur les figures suivantes :

Les détails de ces outils sont donnés en annexe B



Figure 15 : Élaboration d'outil de coupe n°1 usiné.



Figure 16 : Élaboration d'outil de coupe n°2 usiné.



Figure 17 : Élaboration d'outil de coupe n°3.

Les angles caractéristiques sont comme suit:

a- Outil N°1

$$\alpha = 3^\circ$$

$$\beta = 87^\circ$$

$$\gamma = 0^\circ$$

b- Outil N°2

$$\alpha = 38^\circ$$

$$\beta = 49.5^\circ$$

$$\gamma = 2.5^\circ$$

c- Outil N°3

$$\alpha = 18^\circ$$

$$\beta = 67^\circ$$

$$\gamma = 5^\circ$$

L'affutage est élaboré au niveau du hall de technologie sur une meule de type almo TD 300 pour l'ébauche et l'autre de type SOLID DS-200-E pour la finition (voir la figure 29) la mise en forme ce fait de manière graduelle en petites passes et refroidissement permanent après chaque passe afin d'éviter l'échauffement de l'outil de coupe et altérer les caractéristiques mécaniques de cet outil, telle que la dureté qui est un paramètre très important pour les outils

de coupe (la dureté moyenne d'un acier rapide supérieur est de l'ordre de 2300 HV ou 60 HRC).



Figure 18 : Meule de l'ébauche –meule de finition.

IV.2.1.2 Préparation des pièces à usiner

Les pièces à usiner (voir figure 30) sont découpées d'un long cylindre plein en polyamide de diamètre 50mm, nous avons découpé de pièce de 83 mm de longueur, dressés, mises en longueur (80mm) et mises en place d'un trou de centre, sur un tour conventionnel.



Figure 30 : Elaboration des pièces à usiner.

IV.2.2 Déroulement des essais

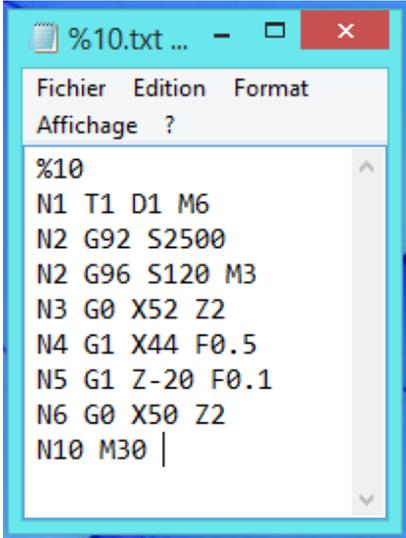
Prise des pièces en centrage long avec appuis de la contre pointe, les essais élaborés sont des chariotages d'une longueur de 80mm.

Elaboration d'un programmes en G-code nous permettant de changer la vitesse de coupe V_c en m/min et de la profondeur de passe en mm, l'avantage du tour à commande numérique est que même si le diamètre de la pièce diminue le programme de la machine recalcule automatiquement la vitesse de rotation de la broche afin de garder la vitesse linéaire (V_c) constante.

Voici le programme que nous avons écrit:

Les détails de ce programme sont donnés en annexe C

PRG



```
%10
N1 T1 D1 M6
N2 G92 S2500
N2 G96 S120 M3
N3 G0 X52 Z2
N4 G1 X44 F0.5
N5 G1 Z-20 F0.1
N6 G0 X50 Z2
N10 M30 |
```

Figure 19 : Exemple de programme en G-code.

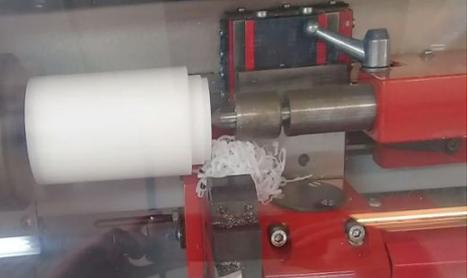
Pour chaque outil utilisé (angle de coupe différent) nous avons fait varié la vitesse de coupe (sur la ligne N2 du programme donné sur la figure 31) de 60 m/min (indice -1) à 120 m/min (indice 0) puis à 250 m/min (indice +1) et pour chaque vitesse choisie nous avons fait varié les profondeurs de passe de 3mm (indice -1) à 4.5mm (indice 0) puis à 6mm (indice +1), le tableau suivant illustre les différentes combinaisons que nous avons choisies pour les opérations de chariotage, le nombre de facteurs étant de 3 avec 3 niveaux pour chaque facteur, nous aurons 3^3 essais, autrement dit 27 essais à faire pour élaborer un plan d'expérience complet et pouvoir analyser les résultats. Pour des raisons de reproductibilité des résultats nous avons fait deux essais pour chaque combinaison.

Tableau 9 : Les différentes combinaisons (27) établies pour les essais de chariotage.

Essais n°	Vitesse de coupe	Profondeur	Angle de coupe	Qualité du copeau
1	-1	-1	-1	
2	0	-1	-1	
3	1	-1	-1	
4	-1	0	-1	
5	0	0	-1	
6	1	0	-1	
7	-1	1	-1	
8	0	1	-1	
9	1	1	-1	
10	-1	-1	0	
11	0	-1	0	
12	1	-1	0	
13	-1	0	0	
14	0	0	0	
15	1	0	0	
16	-1	1	0	
17	0	1	0	
18	1	1	0	
19	-1	-1	1	
20	0	-1	1	
21	1	-1	1	
22	-1	0	1	
23	0	0	1	
24	1	0	1	
25	-1	1	1	
26	0	1	1	
27	1	1	1	

Après les essais nous avons pris le soin de prendre en photo la formation des copeaux pour chaque essai, puis nous avons classé ces copeaux suivant le critère d'une bonne coupe bien propre (un copeaux sans bavure et sans trop d'enchevêtrement autour de la pièce) et un deuxième critère qui est un copeau bien évacué au delà de la pièce, nous avons remarqué l'existence de 10 types de copeaux différents, nous les avons classé du moins bon au plus bon, autrement dit, le copeau de classe 1 est le plus mauvais et celui de classe 10 est le plus bon.

Les figures suivantes présentent les différents types de copeaux rencontrés avec l'indice de classement de 1 à 10.

Image copeau	Capture vidéo	Classement de la qualité
		1
		2
		3
		4

		5
		6
		7
		8
		9
		10

Le tableau suivant résume la qualité de copeau attribué pour chaque combinaison d'essais

Tableau 10 : Attribution de la qualité du copeau pour chaque essai.

Essais n°	Vitesse de coupe	Profondeur	Angle de coupe	Qualité du copeau
1	-1	-1	-1	5
2	0	-1	-1	1
3	1	-1	-1	10
4	-1	0	-1	6
5	0	0	-1	7
6	1	0	-1	9
7	-1	1	-1	5
8	0	1	-1	9
9	1	1	-1	9
10	-1	-1	0	5
11	0	-1	0	3
12	1	-1	0	1
13	-1	0	0	6
14	0	0	0	6
15	1	0	0	8
16	-1	1	0	6
17	0	1	0	3
18	1	1	0	8
19	-1	-1	1	5
20	0	-1	1	3
21	1	-1	1	4
22	-1	0	1	3
23	0	0	1	7
24	1	0	1	2
25	-1	1	1	7
26	0	1	1	8
27	1	1	1	10

IV.2.3 Trace des courbes des effets des paramètres de coupes

Afin d'avoir une bonne vision des résultats nous avons tracé les courbes d'évolution de la qualité du copeau en fonction des paramètres de coupes choisis.

a. Influence de la vitesse de coupe V_c [m/min]

Pour chaque vitesse de coupe nous avons 9 essais différents, pour chaque essai nous avons noté le type de la qualité du copeau puis nous avons calculé la moyenne de la qualité du copeau pour chaque vitesse de coupe.

Les résultats sont comme suit:

- $V_c = 60$ mm/min (indice -1)

$$Moy = \frac{5 + 6 + 5 + 5 + 6 + 6 + 5 + 3 + 7}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 5.33

- $V_c = 120$ mm/min (indice 0)

$$Moy = \frac{1 + 7 + 9 + 3 + 6 + 3 + 3 + 7 + 8}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 5.22

- $V_c = 250$ mm/min (indice 1)

$$Moy = \frac{10 + 9 + 9 + 1 + 8 + 8 + 4 + 2 + 10}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 6.78

La courbe de la qualité du copeau en fonction de la vitesse de coupe V_c est illustrée sur la figure suivante (voir figure 32).

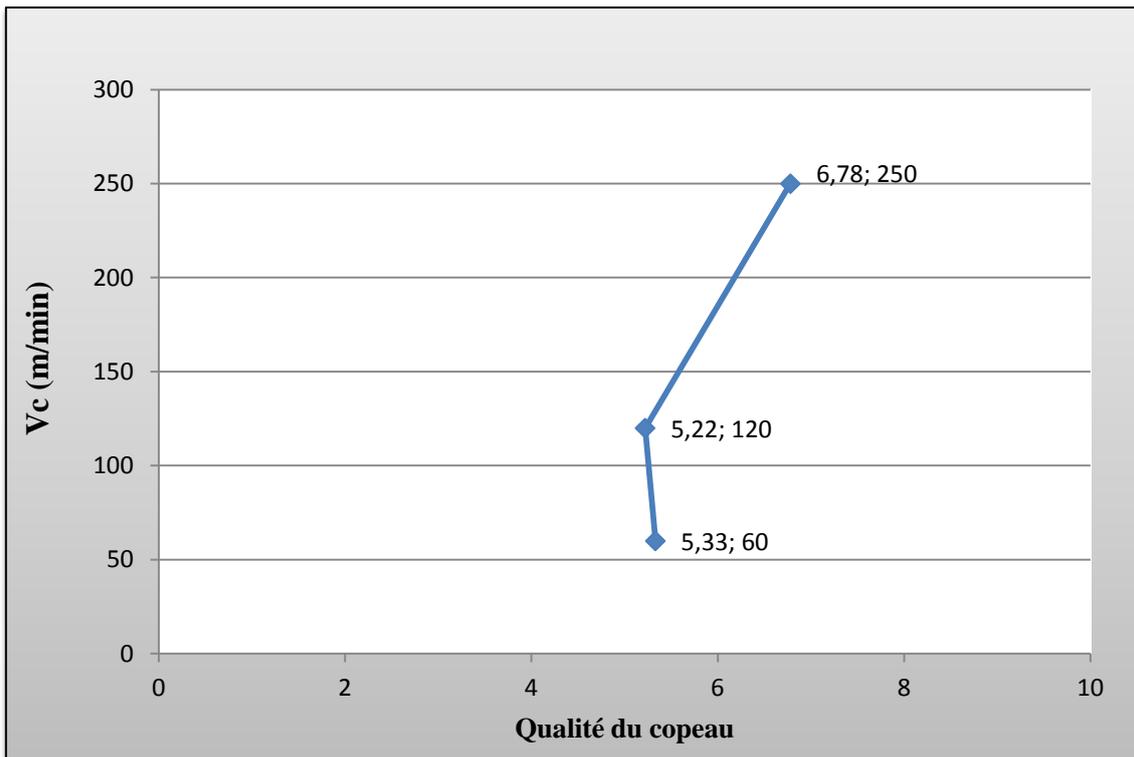


Figure 20 : Evolution qualité du copeau en fonction la vitesse de coupe.

Il est remarquable de constaté que la qualité du copeau est légèrement sensible pour des vitesses de coupes inférieur à 120 m/min où on constate une légère diminution de la qualité au moment où cette qualité augment jusqu'à 6.78 pour une vitesse de coupe de 250m/min.

b. Influence de la profondeur de passe [mm]

Pour chaque profondeur de passe nous avons 9 essais différents, pour chaque essai nous avons noté le type de la qualité du copeau puis nous avons calculé la moyenne de la qualité du copeau pour chaque passe.

Les résultats sont comme suit:

- P = 3mm (indice -1)

$$Moy = \frac{5 + 1 + 10 + 5 + 3 + 1 + 5 + 3 + 4}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 4.11

- P = 4.5mm (indice 0)

$$Moy = \frac{6 + 7 + 9 + 6 + 6 + 8 + 3 + 7 + 2}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 6

- P = 6mm (indice 1)

$$Moy = \frac{5 + 9 + 9 + 6 + 3 + 8 + 7 + 8 + 10}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 7.22

La courbe de la qualité du copeau en fonction de la profondeur de passe est illustrée sur la figure suivante (voir figure 33).

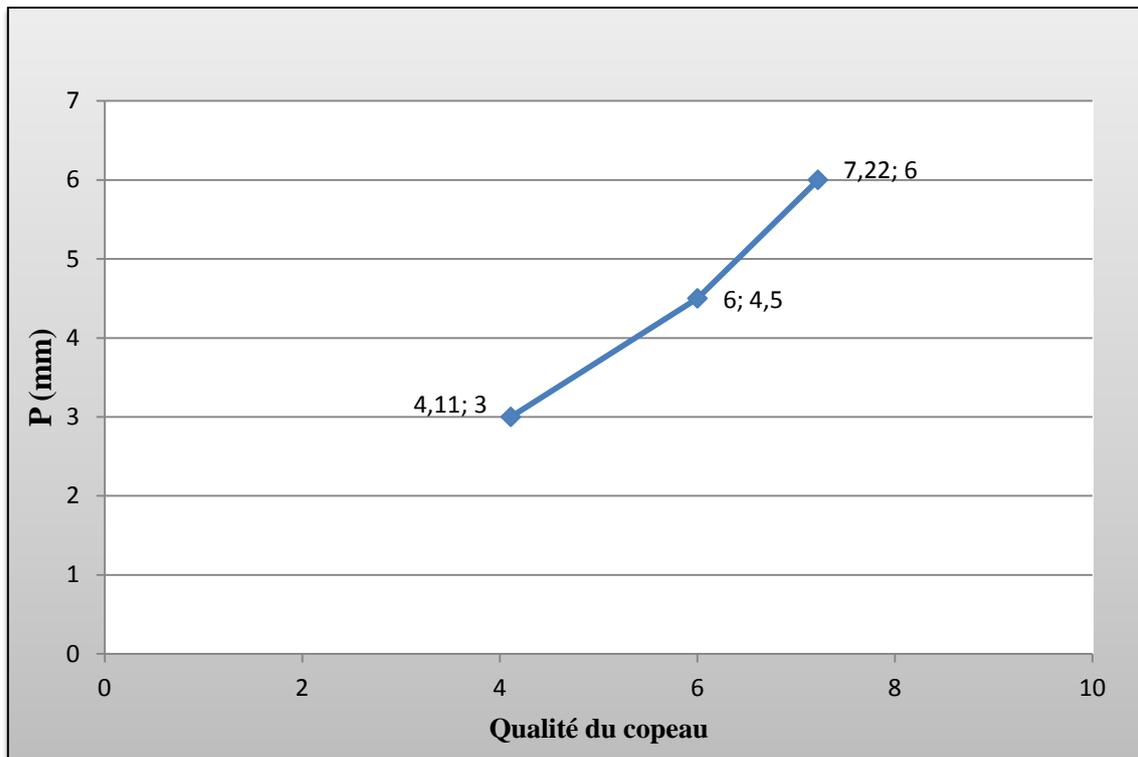


Figure 21 : Evolution qualité du copeau en fonction de la profondeur de passe en mm.

Il est remarquable de constaté que la qualité du copeau progrès de manière presque linéaire et passe de la qualité 4 pour une profondeur de passe de 3 mm à la qualité 7 pour une passe de 6mm.

c. Influence de l'angle de coupe γ [°]

Pour chaque type d'outil nous avons 9 essais différents, pour chaque essai nous avons noté le type de la qualité du copeau puis nous avons calculé la moyenne de la qualité du copeau pour chaque angle de coupe.

Les résultats sont comme suit:

- $\gamma = 0^\circ$ (indice -1)

$$Moy = \frac{5 + 1 + 10 + 6 + 7 + 9 + 5 + 9 + 9}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 6.78

- $\gamma = 2.5^\circ$ (indice 0)

$$Moy = \frac{5 + 3 + 1 + 6 + 6 + 8 + 6 + 3 + 8}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 5.11

- $\gamma = 5^\circ$ (indice 1)

$$Moy = \frac{5 + 3 + 4 + 3 + 7 + 2 + 7 + 8 + 10}{9}$$

Moyenne de la qualité du copeau = 5.44

La courbe de la qualité du copeau en fonction de l'angle de coupe est illustrée sur la figure suivante (voir figure 34).

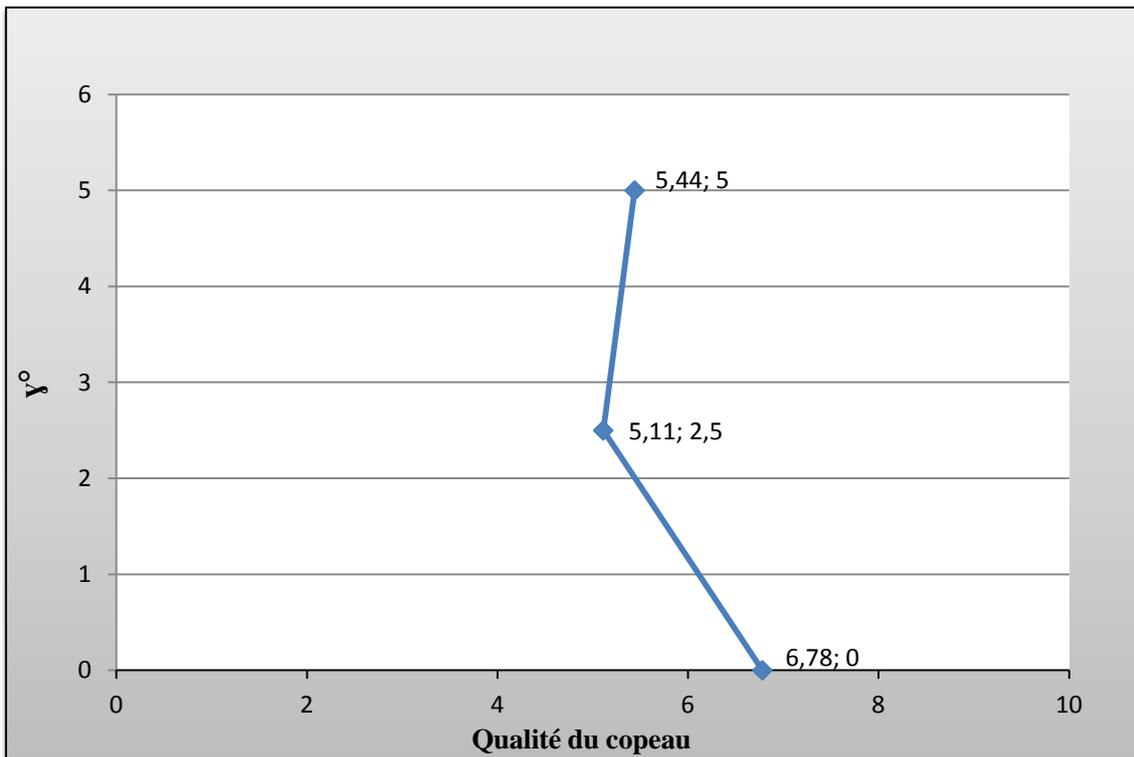


Figure 22 : Evolution qualité du copeau en fonction de l'angle de coupe de l'outil.

Il est remarquable de constater que la qualité du copeau est sensible pour les angles de coupe inférieurs à $2,5^\circ$ où on constate une diminution de la qualité du copeau elle passe de presque 7 pour un angle de 0° à la qualité 5 pour un angle de $2,5^\circ$ au moment où cette qualité est légèrement sensible pour des angles de $2,5^\circ$ à 5° où elle reste presque constante.

Conclusion n°1

Sous la lumière des résultats obtenus, nous pouvons mettre une première conclusion sur l'usinage du polyamide sur un tour à commande numérique de 750W de puissance.

- La bonne formation du copeau est meilleure pour des vitesses de coupe comprise entre 120 et 250 m/min, il faut éviter d'usiner ce type de matériaux à des faibles vitesses de coupe.

- L'augmentation de la profondeur de passe augmente la qualité du copeau et le matériau de la pièce en polyamide s'usine mieux, reste à évaluer l'effort de coupe maximum

qui nous guidera à la profondeur maximale à ne pas attendre suivant la puissance de la machine.

- Un angle de coupe neutre (0°) nous donne une très bonne évacuation du copeau, arrivé même à le faire sortir complètement de la machine, qui est l'objectif souhaité.

IV.2.4 Influence du diamètre de la pièce sur la qualité du copeau

Lors de nos essais nous avons pris les soins de prendre note des diamètres de chariotage avant chaque essai, vu que les passes de chariotage sont faites sur les mêmes pièces à différentes combinaisons d'essais.

Cette partie est juste une initiation au prochain travail qui fera la suite de notre travail, ici nous allons faire les premiers constats de l'influence du diamètre de la pièce sur la formation du copeau en fonction des conditions de coupes et de l'angle de coupe de notre outil.

a. Outil 1 ($\gamma = 0^\circ$)

Tableau 11 : Influence du diamètre de la pièce sur la qualité du copeau pour un angle de coupe de 0° (outil 1).

N°	V _c	P _r	Diamètre usiné						Qualité du copeau					
			50	47	44	41	38	35	5	5	5	5	5	5
1	60	3	50	47	44	41	38	35	5	5	5	5	5	5
2	120	4,5	44	41	38	35	32	29	1	1	1	1	1	1
3	250	6	38	35	32	29	26	50	10	10	10	10	5	10
4	60	3	32	27,5	50	45,5	47	42,5	6	5	6	5	6	5
5	120	4,5	50	45,5	41	36,5	38	33,5	5	7	5	2	2	2
6	250	6	41	36,5	32	50	29	50	2	9	10	10	2	9
7	60	3	32	50	45,5	29,5	45,5	39,5	5	5	6	6	6	5
8	120	4,5	44	38	33,5	29	33,5	50	7	9	9	9	9	6
9	250	6	32	50	50	44	44	38	9	9	10	10	9	9

Sur le **tableau 11** nous nous sommes aussi intéressés aux vitesses de coupe et profondeur de passe qui nous ont donné de meilleurs résultats $V_c=250\text{m/min}$ et $P=6\text{mm}$, une remarque importante apparaît c'est que pour des diamètres faibles avoisinant les 30 mm (ligne N°3) la qualité du copeau est très bonne.

b. Outil 2 ($\gamma = 2.5^\circ$)

Tableau 12 : Influence du diamètre de la pièce sur la qualité du copeau pour un angle de coupe de 2.5° (outil 2).

N°	Vc	Pr	Diamètre usiné						Qualité du copeau					
			50	47	36	33	38	35	6	5	5	8	5	5
1	60	3	50	47	36	33	38	35	6	5	5	8	5	5
2	120	4,5	44	41	30	27	32	29	3	3	3	1	2	5
3	250	6	38	35	50	47	26	23	1	1	6	5	5	5
4	60	3	32	50	44	39,5	50	45,5	6	6	5	5	8	8
5	120	4,5	41	36,5	35	31,5	41	36,5	6	6	5	5	8	6
6	250	6	32	27,5	50	45,5	32	27,5	9	8	6	6	9	6
7	60	3	50	44	39,5	33,5	50	44	6	6	6	6	6	8
8	120	4,5	38	32	27,5	21,5	38	32	3	6	3	3	8	5
9	250	6	50	44	50	44	50	44	6	8	8	8	8	9

Pour le cas de cet outil on remarque une certaine stabilité des résultats, que ce soit pour les faibles ou les forts diamètres allant de 21.5 mm à 50 mm, la qualité du copeau reste moyenne.

c. Outil 3 ($\gamma = 5^\circ$)

Tableau 13 : Influence du diamètre de la pièce sur la qualité du copeau pour un angle de coupe de 5° (outil 3).

N°	Vc	Pr	Diamètre usiné						Qualité du copeau					
			50	47	41	38	38	35	5	5	5	5	3	1
1	60	3	50	47	41	38	38	35	5	5	5	5	3	1
2	120	4,5	44	41	35	32	32	29	3	3	1	1	1	1
3	250	6	38	35	50	47	50	45,5	4	4	9	3	7	7
4	60	3	32	27,5	44	41	41	36,5	3	3	5	5	5	7
5	120	4,5	50	45,5	30,5	50	32	50	7	7	2	5	1	7
6	250	6	41	36,5	45,5	41	45,5	39,5	4	4	3	3	2	9
7	60	3	31,5	50	36,5	50	33,5	50	7	6	7	6	5	6
8	120	4,5	44	38	44	38	44	38	8	8	3	3	4	4
9	250	6	32	50	50	44	50	44	9	10	10	9	10	10

Sur le **tableau 13** nous nous sommes intéressés aux vitesses de coupe et profondeur de passe qui nous ont donné de meilleurs résultats $V_c=250\text{m/min}$ et $P=6\text{mm}$, une remarque importante apparaît c'est que pour des diamètres avoisinant les 50 mm (ligne N°9) la qualité du copeau est très bonne, alors que pour de faibles diamètres avoisinant les 35mm (ligne N° 3) la qualité du copeau diminue.

Conclusion n°2

Sous la lumière des résultats d'analyse de la qualité du copeau en fonction du diamètre de la pièce deux résultats très intéressants sont à signaler:

- Pour les diamètres faibles avoisinant les 30mm, le choix d'un outil à un angle de 0° s'avère plus judicieux vu qu'il donne une meilleure qualité sous les mêmes conditions de V_c et P_r .

- Pour un angle de 5° cet outil est très performant pour les diamètres avoisinant les 50mm avec une vitesse de coupe de 250m/min et une profondeur de passe de 6mm.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

L'usinage du plastique est particulièrement intéressant nécessitant un choix minutieux des conditions de coupe ;

Nous avons élaboré un protocole expérimentale nous permettant de bien cibler les paramètres important a l'usinage de polyamide ;

Sous la lumière des résultats obtenus, nous pouvons mettre une première conclusion sur l'usinage du polyamide sur un tour à commande numérique de 750W de puissance.

- La bonne formation du copeau est meilleure pour des vitesses de coupe comprise entre 120 et 250 m/min, il faut éviter d'usiner ce type de matériaux à des faibles vitesses de coupe.
- L'augmentation de la profondeur de passe augmente la qualité du copeau et le matériau à de la pièce en polyamide s'usine mieux, reste à évaluer l'effort de coupe maximum qui nous guidera à la profondeur maximale à ne pas attendre suivant la puissance de la machine.
- Un angle de coupe neutre (0°) nous donne une très bonne évacuation du copeau, arrivé même à le faire sortir complètement de la machine, qui est l'objectif souhaité ;

Sous la lumière des résultats d'analyse de la qualité du copeau en fonction du diamètre de la pièce deux résultats très intéressant sont à signaler.

- Pour les diamètres faibles avoisinant les 30mm, le choix d'un outil à un angle de 0° s'avère plus judicieux vue qu'il donne une meilleure qualité sous les mêmes conditions de V_c et P_r .
- Pour un angle de 5° cet outil est très performant pour les diamètres avoisinant les 50mm avec une vitesse de coupe de 250m/min et une profondeur de passe de 6mm.

Références bibliographique :

- [1] **G .Teyssedre, L.Boudou** ; « Polymères et composites pour l'électroniques » ; Document de Technique de L'ingénieur, Série D2335 de Matériaux isolants en électronique ; Mai 2010.
- [2] **M .Fontanille, Y.Gnanou**; «Structure moléculaire des polymères » ; Série AM 3 037 de Technique de l'ingénieur, traité plastiques et composites ; octobre 2008.
- [3] **D .Feldman**; « Polymeric building materials»; 1989.
- [4] **A.Guidom**; « Polymères et Composites»; Matériau de construction.
- [5] **Hans-Henning kausch, N.Heymans, C.Jhon Plummer, P. Decroly**; «Matériaux polymères: Propriétés Mécaniques et Physiques ».
- [6] Entreprise Française **Matechplast**; « Usinage des plastiques »; fourniture et découpe plastiques; France.
- [7] **M. Meiller, J. L. Lebrun, M. Touratier, D. Ryckelynck**, « Friction law for tool Work piece contact area in dry machining, Proceedings of the International Workshop on Friction and Flow Stress in Cutting and Forming», ENSAM-Paris (France), (2000) 101–109.
- [8] **François BAGUR**; « Matériaux pour outils de coupe » ; Série BM 7080 de Technique de l'ingénieur ; 1999.
- [9] **D.Gelin, M.Vincent** ; « Eléments de fabrication» ,1995.
- [10] **C.Barlier, L.Girardin**, «Mémoth ; productique matériaux et usinage»,1995.
- [11] **L.Rimbaud, G.Layes, J.Moulin**; « Guide pratique de l'usinage » ; collection n°62.Edition n°06,1999.
- [12] **R .Cornubert** ; « Les matières plastiques », Fabrication, Technologie ; septembre1982.
- [13] **Philippe DEPEYRE** ; «Fabrication Mécanique », Faculté des sciences et Technologies ; 2004-2005.
- [14] **B.Vieille** ; «Usinage», Méthode et Fabrication.
- [15] **Alain Passeron**; « Tournage», Série BM7086 de Technique de l'ingénieur ,1997.

[16] **A .Bellonfi**, « Cours procédés de Fabrication », Master Maintenance Industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla ; 2010.

[17] **A .Toumine** ; « Usinage », INSA de Lyon, Groupe conception productique, 2007.

[18] **Rocdacier** ; « Cours sur le Tournage –Usinage » ; 2011.

[19] **T .Dereli, I.H.Filiz and A .Baykasoglu**, « Optimizing cutting parameters un process planning of prismatic parts by using senetic algorithms» ,International journal of production research ,vol .39 ,N15 ,3303-3328, 2001.

[20] **Gilles Prod ‘Homme** ; « Commande numérique des machines outils» ; Série B 7130, pp.3 de Techniques de l’ingénieure traité génie mécanique ; 1997.

[21] **P.Padila** ; « Production Mécanique » ; DUNOD 1986.

[22] **C.Rousseau** ; Département Homme au Travail, centre de l’INRS-Lorraine, Nancy.

[23] **A .Toumine** ; Eléments de cours : Usinage V1.1, cours de fabrication, « Usinage par enlèvement de copeaux ».

[24] **F.L.Fanchon** ; « Guide des sciences et technologie industrielle » ; Edition Nathan Paris France ; 1994.

Annexes

Annexe A : Caractéristiques techniques du tour EMCO concept turn 55

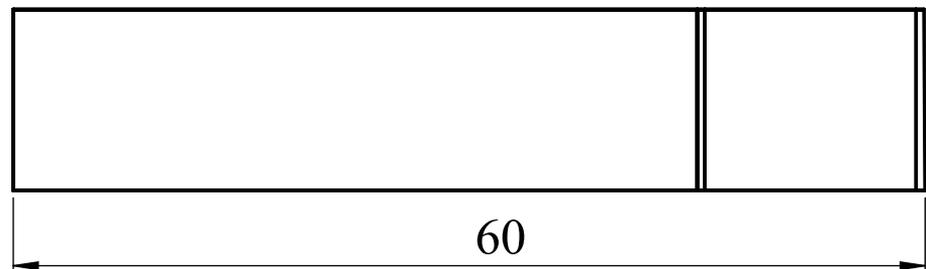
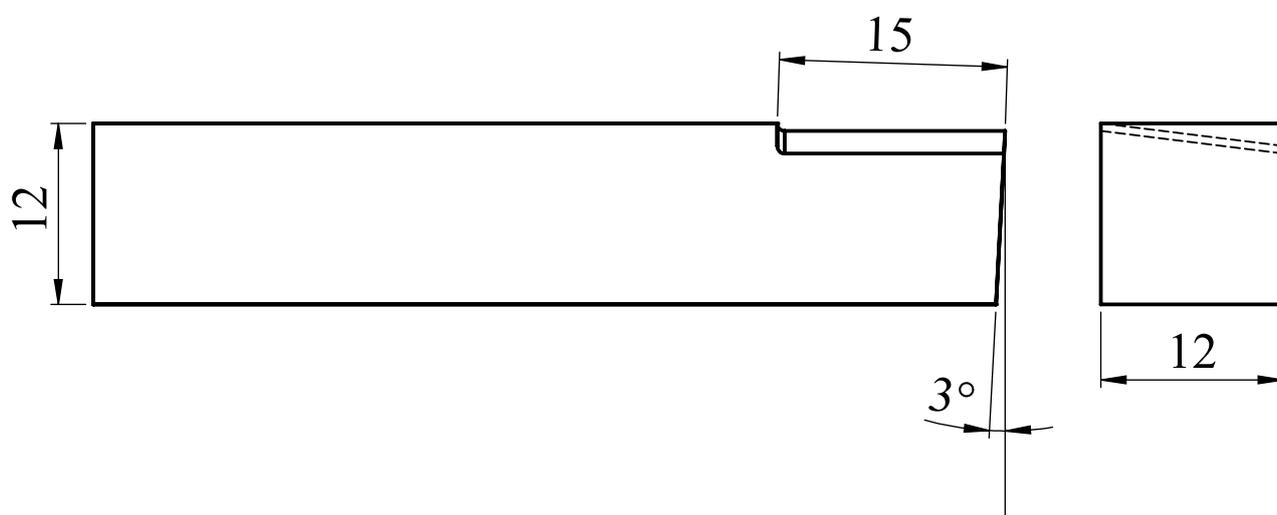
Volume d'usinage	
Diamètre de passage au-dessus du banc	ø 130 mm
Diamètre de passage au-dessus du chariot transversal	ø 60 mm
Diamètre de tournage maxi (pièces mandrinées avec poupée mobile)	ø 52 mm
Longueur de pièce maxi	215 mm
Course du chariot en X	48 mm
Plage de déplacement Course du chariot en Z	236 mm
Broche principale	
Raccord de broche selon norme usine	
Alésage de broche	ø 16 mm
Diamètre de mandrin	74 mm
Passage dans le mandrin	ø 15 mm
Plage de vitesses	120-4000 tr/min
Gammes de vitesses mécaniques	2
Couple maxi	14 Nm
Moteur principal	
Moteur asynchrone à courant triphasé, puissance	750 W
Vitesse nominale	1400 tr/min
Changeur d'outil	
Nombre de montages d'outils	8
Montages intérieurs / extérieurs	4 / 4
Section de l'outil pour outil	12 x 12 mm ²
Diamètre de queue pour barres d'alésage	ø 10 mm
Entraînements des avances	
Moteurs pas à pas 3 phases avec résolution de pas	0,0005 mm
Vitesse rapide en X / Z	2 m/min
Avance de travail en X / Z (réglage en continu)	0 - 2 m/min
Force d'avance en X / Z	1000 N

Annexe A : Caractéristiques techniques du tour EMCO concept turn 55

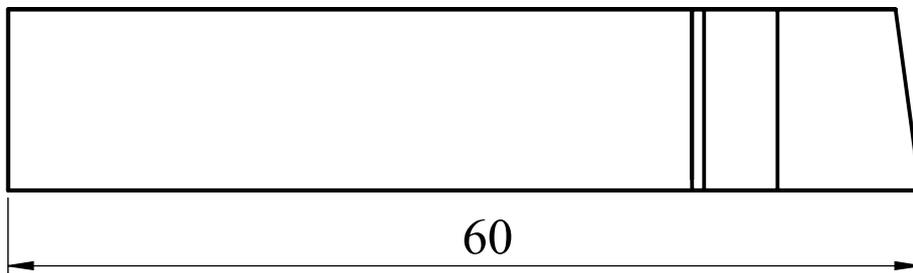
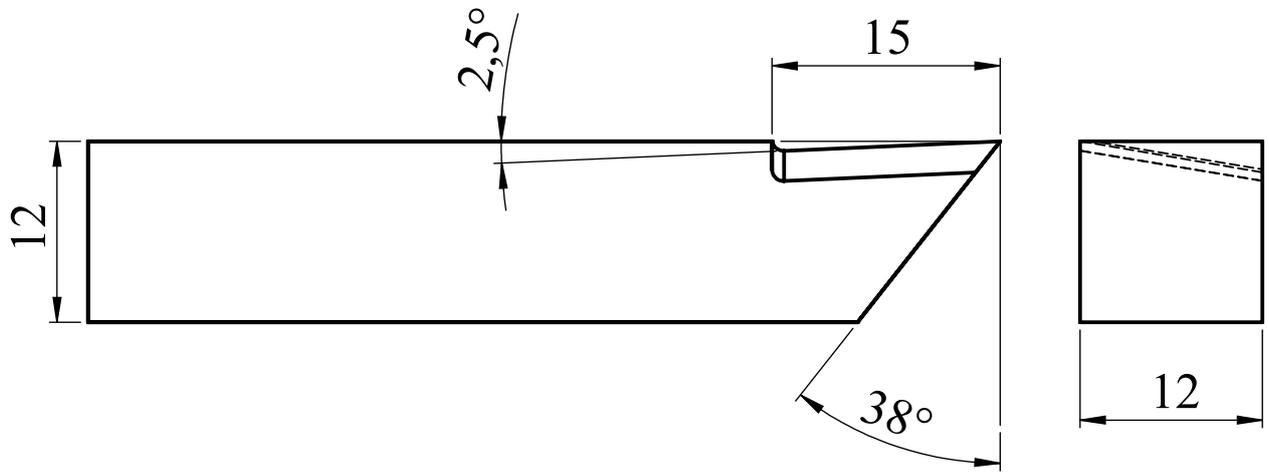
Dispersion de position moyenne selon VDI 3441 en X	0,008 mm
Dispersion de position moyenne selon VDI 3441 en Z	0,008 mm
Poupée mobile	
Course du fourreau	35 mm
Diamètre du fourreau	22 mm
Cône intérieur pour pointe tournante	MK 1
Système de lubrification	- Glissières huile - Tous les autres points de graissage Graisse

Annexe C : Syntaxe du langage G-code utilisé

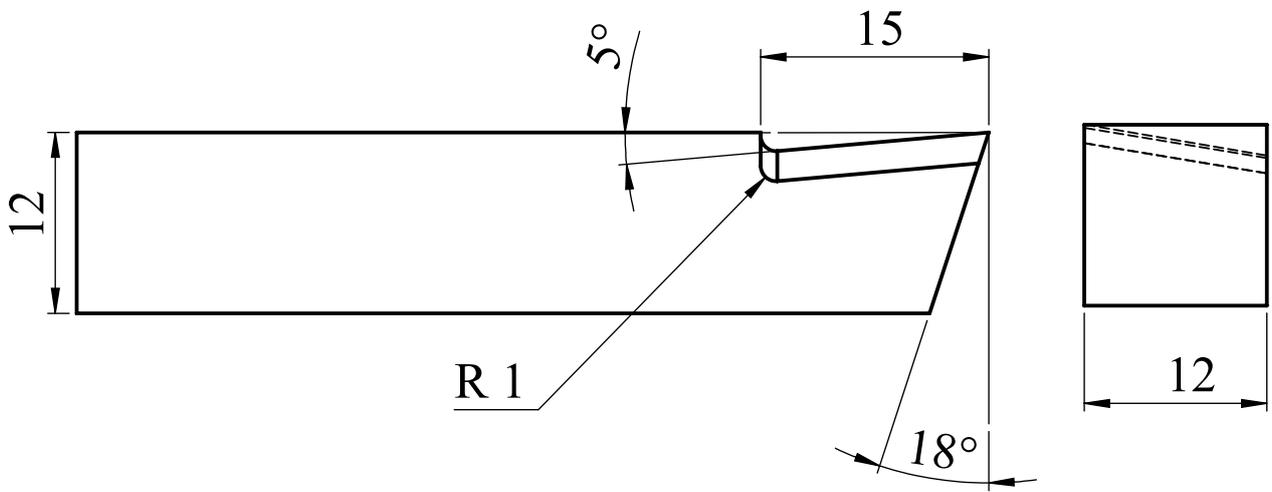
%10	Numéro de programme
N1, N2.....	Numéro de la ligne
T1	Numéro d'outil N°1
D1	Correcteur d'outil N°1
S	Vitesse de broche
F	Vitesse de déplacement en tr/min
X, Z	Coordonnées d'axes
S2500	Définit la vitesse de rotation maximum de la broche en tr/min
M3	Marche broche sens horaire
M6	Appel d'outil
M30	Fin de programme principal
G0	Interpolation linéaire a vitesse rapide
G1	Interpolation linéaire a vitesse programmée
G92	Limitation de vitesse
G96	Vitesse de coupe constante en m/min



UNIVERSITE A-MIRA BEJAIA		Dépt : GM
Echelle 2:1	Outil de coupe n°1	08/06/2017
		Matiere:ARS
BAZIZ.K & ZOUAOUI.S		M2 CMP



UNIVERSITE A-MIRA BEJAIA		Dépt : GM
Echelle 2:1	Outil de coupe n°2	08/06/2017
		Matiere:ARS
BAZIZ.K & ZOUAOUI.S		M2 CMP



UNIVERSITE A-MIRA BEJAIA		Dépt : GM
Echelle 2:1	Outil de coupe n°3	08/06/2017
		Matiere:ARS
BAZIZ.K & ZOUAOUI.S		M2 CMP