

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

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

**Projet de fin d'études
Pour l'obtention de diplôme de
Master en Fabrication Mécanique et Productique**

Titre :

Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface

Proposé et encadré par :
**Dr M.Temmar
Dr N.Melzi**

Etudié par :
**C.R.Djaffer
H.Kadri**

Année universitaire 2017/2018

Dédicace

*C'est avec un grand plaisir et une grande fierté que je dédie
ce modeste travail :*

À nos chers parents,

À mes frères et sœurs,

À nos amis, tous nos amis de près et de loin.

À tous nos collègues et nos enseignants.

À nos familles et toutes personnes qu'on aime.

Remerciements

Ce travail de mémoire a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Nous remercions Monsieur Temmar Mustapha et Madame Melzi Nesrine pour avoir accepté de diriger cette mémoire, et dont leurs aides précieuses nous ont été indispensables sur le plan scientifique et humain.

Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

Conclusion

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à étudier une opération du procédé de tournage sur une pièce d'acier et l'étude de l'influence des phénomènes induits lors de cette opération.

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution du procédé d'usinage ainsi que toutes les étapes importantes lors du processus de fabrication. Les différents procédés d'usinage ont été cités du fait que notre travail s'est concentré sur une opération du procédé de tournage.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré l'importance de la coupe des métaux qui parfois est difficilement réalisable car d'une part, elle est sujette aux conditions de coupe et d'autre part, les paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage influent d'une manière importante sur l'état de surface. Cependant, l'utilisation adéquate des paramètres de coupe peut améliorer cet état de surface.

Un mauvais choix d'un paramètre de coupe conduit l'obtention d'un mauvais état de surface.

Notre travail nous a permis :

- D'étudier le phénomène de l'état de surface,
- Grace aux paramètres de coupe, il est possible d'étudier l'évolution du système outil-pièce,
- Les surfaces de réponses permettent d'apprécier l'influence de l'avance et de rayon de bec sur l'état de surface lors de l'application des plans d'expériences.

- L'augmentation de chacun des facteurs influant la rugosité, vitesse de rotation, l'avance et le rayon de bec font augmenter la rugosité,
- Les faibles avances permettent de diminuer la rugosité,
- Les valeurs de la rugosité totale R_t et R_a sont obtenues par la méthode des plans d'expériences. Le même principe est pris en considération à savoir trois différentes valeurs du rayon du bec de l'outil coupant.

SOMMAIRE

| | |
|--------------------------|------|
| Remerciements..... | i |
| Table des matières..... | ii |
| Listes des figures..... | ii |
| Liste des tableaux | iii |
| Liste des symboles..... | iiii |
| Résumé..... | iiii |

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur l'usinage et le procédé de tournage

| | |
|--|----|
| I.1/ EVOLUTION DU MATERIEL D'USINAGE..... | 3 |
| I.1.1/ GRANDES ETAPES DU PROGRES TECHNIQUE DANS LE DOMAINE DE L'USINAGE | 3 |
| I.2/DIFFERENTS PROCEDES..... | 4 |
| I.3/ PROCEDE DE TOURNAGE | 5 |
| I.3.1/ PRINCIPE DU TOURNAGE | 5 |
| I.3.2/ LE TOUR | 6 |
| I.3.3/ LES DIFFERENTES OPERATIONS D'USINAGE | 7 |
| I.3.4/ LES DIFFERENTS MONTAGES | 8 |
| I.3.5/ L'OUTIL | 9 |
| I.3.6/ FORMATION DU COPEAU | 10 |

Chapitre II : Coupe des métaux

| | |
|---|----|
| II.1/ PRINCIPE DE LA COUPE DES METAUX | 12 |
| II.2 : OUTIL DE COUPE | 15 |
| II.3/ MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE | 22 |
| II.4/ LES PARAMETRES DE COUPE | 22 |
| II.4.1/ VITESSE DE COUPE (VC) | 23 |

| | |
|---|----|
| II.4.2/ VITESSE D'AVANCE (V_F) ET AVANCE/TOUR (F) | 24 |
| II.4.3/ PROFONDEUR DE PASSE | 25 |

Chapitre III : Effets des paramètres de coupe

| | |
|--|-----------|
| III.1/ Introduction | 26 |
| III.2/ SYSTEME PIECE/OUTIL DE COUPE/MACHINE-OUTIL (POM) | 27 |
| III.2.1/ DESCRIPTION DU SYSTEME PIECE/OUTIL DE COUPE/MACHINE-OUTIL (POM)..... | 27 |
| III.2.1.1/ ELEMENTS INDEPENDANTS DE L'OPERATION D'USINAGE..... | 27 |
| III.2.1.2/ ELEMENTS DEPENDANTS DE L'OPERATION D'USINAGE | 28 |
| III.3/ MECANISME DE FORMATION DU PROFIL MICROGEOMETRIQUE DES SURFACES USINEES | 29 |
| III.4/ DETERMINATION THEORIQUE DE LA RUGOSITE..... | 30 |
| III.5/ Expérience..... | 32 |
| III.6/ Travaux comparatifs..... | 36 |
| III.7/ Application des plan d'expériences..... | 39 |
| III.7.1/ Définition..... | 39 |
| III.7.2/ Notion de modélisation mathématique et application | 44 |
| III.7.3/ Choix d'un modèle..... | 45 |

Listes des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Les différents procédés | 4 |
| Figure I.2 : Procédé de tournage..... | 5 |
| Figure I.3 : Constitution d'un tour parallèle..... | 6 |
| Figure I.4 : Opérations de base en tournage..... | 8 |
| Figure I.5 : Opération de dressage d'un tube | 8 |
| Figure I.6 : Montage en lunette..... | 9 |
| Figure I.7 : Angles de coupe..... | 9 |
| Figure I.8 : Influence du rayon du bec de l'outil sur la surface à usinée..... | 10 |
| Figure I.9 : Copeau continu | 11 |
| Figure I.10 : Copeau cisailé | 11 |
| Figure I.11 : Copeau discontinu | 11 |
| Figure II.1 : Usinage par enlèvement de matières..... | 12 |
| Figure II.2 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage..... | 13 |
| Figure II.3 : Critères permettant de définir les paramètres de coupe..... | 14 |
| Figure II.4 : Surfaces de la pièce..... | 15 |
| Figure II.5 : Eléments de l'outil..... | 16 |
| Figure II.6 : Angles du taillant (outil en travail)..... | 17 |
| Figure II.7 : Plans et angles en main sur les outils courants : outil à chariot droit (NF E 66-502).... | 18 |
| Figure II.8 : Définition de base d'un outil en tournage | 20 |
| Figure II.9 : Géométrie de l'arête de coupe..... | 21 |
| Figure II.10 : Gamme des angles d'orientation d'arête..... | 21 |
| Figure II.11 : Dimensions des angles de coupe dans le de tournage | 23 |
| Figure II.12 : Vitesse de coupe..... | 23 |
| Figure II.13 : Vitesse de coupe, diamètre et vitesse de rotation..... | 24 |
| Figure II.14 : Vitesse d'avance..... | 25 |
| Figure II.15 : Avance f dans le cas de tournage..... | 25 |
| Figure III.1 : Définition de système Pièce/Outil de coupe/Machine-outil..... | 26 |
| Figure III.2 : Hauteur théoriques des aspérités sur pièces sphérique ou toriques..... | 31 |
| Figure III.3 : Effet de la vitesse de rotation sur l'avance..... | 33 |
| Figure III.4 : Effet de la profondeur sur le rayon du bec..... | 34 |

| | |
|--|----|
| <u>Figure III.5</u> : Effet de la vitesse de rotation sur la profondeur..... | 34 |
| <u>Figure III.6</u> : Amplitude en fonction de la profondeur..... | 35 |
| <u>Figure III.7</u> : présente la partie réelle de la fonction de réponse en fonction de la fréquence de l'outil de coupe..... | 37 |
| <u>Figure III.8</u> : Evolution du processus d'usinage | 38 |
| <u>Figure III.9</u> : Tracé des lobes de stabilité..... | 38 |
| <u>Figure III.10</u> : Tracé des lobes de stabilité..... | 39 |
| <u>Figure III.11</u> : Domaine de variation d'un seul facteur..... | 41 |
| <u>Figure III.12</u> : Domaine de variation de deux facteurs..... | 42 |
| <u>Figure III.13</u> : Points expérimentaux dans l'espace expérimental..... | 42 |
| <u>Figure III.14</u> : Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs..... | 43 |
| <u>Figure III.15</u> : Représentation d'une surface de réponse..... | 44 |
| <u>Figure III.16</u> : Représentation du domaine d'étude de deux facteurs..... | 45 |
| <u>Figure III.17</u> : Diagramme expérimental..... | 46 |
| <u>Figure III.18</u> : Domaine d'étude de la vitesse de rotation et de l'avance..... | 48 |
| <u>Figure III.19</u> : Domaine d'étude de la profondeur de passe et de rayon de bec..... | 48 |
| <u>Figure III.20</u> : surface de réponse pour R_a | 50 |
| <u>Figure III.21</u> : surface de réponse pour R_t | 50 |
| <u>Figure III.22</u> : Interaction de l'avance et de rayon de bec en fonction de R_a et R_t | 51 |

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Paramètres d'usinage33

Tableau III.2 : Les 4 facteurs, leurs unités, leurs maximums et leurs minimums.....47

Liste des symboles

- α : Angle de dépouille
- β : Angle de taillant
- γ : Angle de coupe
- λ : Angle d'inclinaison de l'arête
- χ_r : Angle de direction de l'arête
- ψ_r : Angle de direction complémentaire
- ζ_r : Angle de pointe
- **Mc** : Le mouvement de coupe
- **Ma** : Le mouvement d'avance
- **Mp** : Le mouvement de profondeur
- **Pre** : Plan de référence en travail
- **Pse** : Plan d'arête en travail
- **Pfe** : Plan de travail
- **Ppe** : Plan vers l'arrière en travail
- *kr* : Angle de direction d'arête de l'outil
- **Pr** : plan de référence
- **Ps** : plan d'arête
- **As** : Angle d'inclinaison d'arête de l'outil
- ϵ_r : Angle de pointe de l'outil
- **Ps'** : plan d'arête secondaire
- *kr'* : Angle de direction d'arête secondaire de l'outil
- *kre* : Angle de direction d'arête en travail
- *lse* : Angle d'inclinaison d'arête en travail
- **Po (Poe)** : plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail)
- **Pn (Pne)** : plan normal à l'arête
- **Pf** : plan de travail conventionnel (plan de travail Pfe)
- **Pp** : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail Ppe)
- **ap** : profondeur de coupe
- **af** : engagement de l'arête
- *f* : avance
- *h* : épaisseur de coupe
- *b* : largeur de coupe
- *b_D* : largeur nominale de coupe
- κ_r : angle de direction d'arête
- **D** : point principal de l'arête

- **V_c** : vitesse de coupe
- **D** : le diamètre du cercle
- **N** : la vitesse de rotation
- **π** : constant = 3.14....
- **V_f** : La vitesse d'avance
- **f** : L'avance notée
- **a** : La profondeur de passe notée
- **R_t** : la rugosité théorique
- **R_a** : rugosité arithmétique
- **R** : Rayon de la pièce usinée (mm)
- **θ** : Déplacement angulaire de l'outil pour une rotation de la pièce (rd)
- **r_f** : rayon de bec
- **x_i** : Valeur codifiée à trouver,
- **u_i** : Valeur réelle du paramètre,
- **u_{max}** : Valeur maximale du paramètre,
- **u_{min}** : Valeur minimale du paramètre.
- **a₀** : La valeur moyenne de l'effet des quatre facteurs
- **a₁** : A l'effet de l'avance par tour
- **a₂** : B l'effet de la vitesse de rotation
- **a₃** : C l'effet de la profondeur de passe
- **a₄** : D l'effet de rayon de bec
- **a₁₂** : AB l'interaction entre **a₁** et **a₂**
- **a₁₃** : AC l'interaction entre **a₁** et **a₃**
- **a₁₄** : AD l'interaction entre **a₁** et **a₄**
- **a₂₃** : BC l'interaction entre **a₂** et **a₃**
- **a₃₄** : CD l'interaction entre **a₃** et **a₄**
- **a₁₂₃** : ABC l'interaction entre **a₁**, **a₂** et **a₃**
- **a₁₂₄** : ABD l'interaction entre **a₁**, **a₂** et **a₄**
- **a₁₃₄** : ACD l'interaction entre **a₁**, **a₃** et **a₄**
- **a₂₃₄** : BCD l'interaction entre **a₂**, **a₃** et **a₄**
- **a₁₂₃₄** : ABCD l'interaction entre les quatre facteurs

Mémoire

| Désignation | |
|-----------------------|----|
| Page de garde | Ok |
| Remerciement | Ok |
| Dédicace | Ok |
| Table de matière | Ok |
| Liste des figures | Ok |
| Liste des tableaux | Ok |
| Liste des symboles | Ok |
| Introduction Générale | Ok |
| Chapitre 1 | Ok |
| Chapitre 2 | Ok |
| Chapitre 3 | Ok |
| Conclusion Générale | Ok |
| Bibliographie | |

Bibliographie

- [1] Maurel-Pantel, Aurelien. Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage: Applications à l'identification paramétrique des lois de comportement. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté, 2009.
- [2] Germain, Guenaël. Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser. Diss. Arts et Métiers ParisTech, 2006.
- [3] AVEVOR, Yao et MOUFKI, Abdelhadi. Influence de la vitesse de coupe sur les conditions thermomécaniques à l'interface outil-copeau. S09d Procédés d'usinage, 2015.
- [4] Davies ,matthew A , pratt,jon R,Dutterer,Brian S et al the stability of low radial immersion milling .CIRP annais-Manufacturing Technology , 2002 ,vol 55,no 5,p,503-518,
- [5] J. L. Fanchon, Guide des sciences et technologie industrielle, Edition Nathan Paris, France, 1994.
- [6] Groupe Kistler France, Mesure des efforts de coupe, www.kistler.com.
- [7] L. Pimbaud, G. Layes, J. Moulin, Guide pratique de l'usinage, tome 1, Edition Hachette, France, 2003.
- [8] E .J.Armarego, S.Verezub, P.Samaranayake, The effects of coatings on the cutting process, friction, forces and predictive cutting models in machining operations, Journal of Engineering Manufacture, n° 216, pp. 347-356, 2002.
- [9] N.S. Atcherkane, Les machines travaillant par enlèvement de métal, Société des publications mécaniques Paris, France.
- [10] J. Boulanger, Tolérences et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface, Article B7010, Technique de l'Ingénieur, 1991.
- [11] J.M. Linares, J.M. Sprauel C. Marty, Analyse du processus élémentaire de mesure, Revue Contrôle industriel, n°205, p27-31, 1997.
- [12] OXLEY, peter Louis Brennan .the mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability ,chichester,England :E,Horwood,1989 .
- [13] MELZI, N., TEMMAR, M., et OUALI, M. Applying a Numerical Model to Obtain the Temperature Distribution while Machining. Acta Physica Polonica A, 2017, vol. 131, no 3, p. 504-506.
- [14] MELZI Nesrine, TEMMAR Mustapha, OUALI Mohamed, et al. The prediction of the surface quality based on the stability lobes and the optimization of the cutting parameters in

the vibration restraining. *Mediterranean Journal of Modeling and Simulation*, 2016, vol. 6, no 1, p. 045-058.

[15] M.G.Vigier, *Pratique des plans d'experience*, les editions d'organisation, pp 190, 1988.

[16] Jacques Goupy, *Plans d'experiences pour surfaces de réponse*, Edition Dunod, 2001.

[17] American Supplier Institute, Inc, *Orthogonal arrays and linear graphs*, ASI, 1987.

Introduction Générale

L'usinage par enlèvement de matière permet d'élaborer des pièces mécaniques finies.

L'outil de coupe enlève de la surépaisseur pour générer une nouvelle surface. Cette coupe est influencée principalement par les propriétés du matériau de la pièce à usiner, la géométrie de l'outil de coupe, les conditions de coupe, les conditions de lubrification et les paramètres dynamiques (raideur, amortissement) du système usinant.

L'apparition de vibrations pendant le fonctionnement de la machine-outil ne peut être évitée. Généralement, ces vibrations représentent des déplacements périodiques du système élastique autour de sa position d'équilibre. Ces vibrations sont générées par l'interaction entre le système usinant élastique et le processus d'usinage associé au fonctionnement de la machine. Ce système élastique comprend le dispositif de fixation, la pièce et l'outil. L'interaction, entre les systèmes élastiques et les processus d'usinage, constitue le système dynamique du système usinant.

Notre travail, effets des paramètres de coupe sur l'état de surface, va nous permettre de prendre un exemple une des opérations de tournage et d'analyser par la suite les effets des paramètres de coupe utilisés.

Notre travail se divise en trois chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les notions nécessaires sur l'usinage et sur le procédé de tournage.

Le chapitre II sera consacré sur les généralités des paramètres de coupe. On prendra comme l'exemple le procédé de tournage.

Dans le chapitre III, une recherche bibliographique introduira les notions de vibrations en usinage et par la suite les effets des paramètres de coupe lors de l'usinage. La partie expérimentale se fera au niveau de l'atelier d'usinage de notre département.

La dernière partie sera consacrée à la conclusion Générale.

Chapitre I

Généralités sur l'usinage et le procédé de tournage

I.1/ EVOLUTION DU MATERIEL D'USINAGE :

I.1.1/ GRANDES ETAPES DU PROGRES TECHNIQUE DANS LE DOMAINE DE L'USINAGE :

Jusqu'en 1850, les outils à main sont presque exclusivement employés par les artisans (menuisiers, forgeron, ajusteur,...). L'ouvrier prépare l'outil et parfois le conçoit, il l'anime et le conduit par sa force musculaire.

De 1850 à 1914, les machines-outils prennent une place sans cesse accrue dans les ateliers. Il s'agit de machines simples (tour, fraiseuse, perceuse, raboteuse) nécessitant un grand nombre d'opérations manuelles. L'ouvrier équipe le porte-pièce et le porte-outil ; il sélectionne les éléments de coupe n , a , p prend les passes successives et effectue les mesures. Depuis 1914, les machines-outils automatiques se substituent de plus en plus souvent aux machines classiques. Les progrès sont lents au début et obtenus le plus souvent par dispositifs mécaniques.

Depuis 1946, les dispositifs électro-mécaniques, hydro-mécaniques, puis électroniques nous amènent dans la période actuelle.

Par contre avec l'usage des machines-outils automatiques, le rôle des techniciens s'accroît et se diversifie pour la préparation des travaux et des outillages spéciaux. [1]

On trouve :

- Les machines semi-automatiques,
- Les machines automatiques,
- Les machines automatiques spéciales.

I.2/DIFFERENTS PROCEDES :

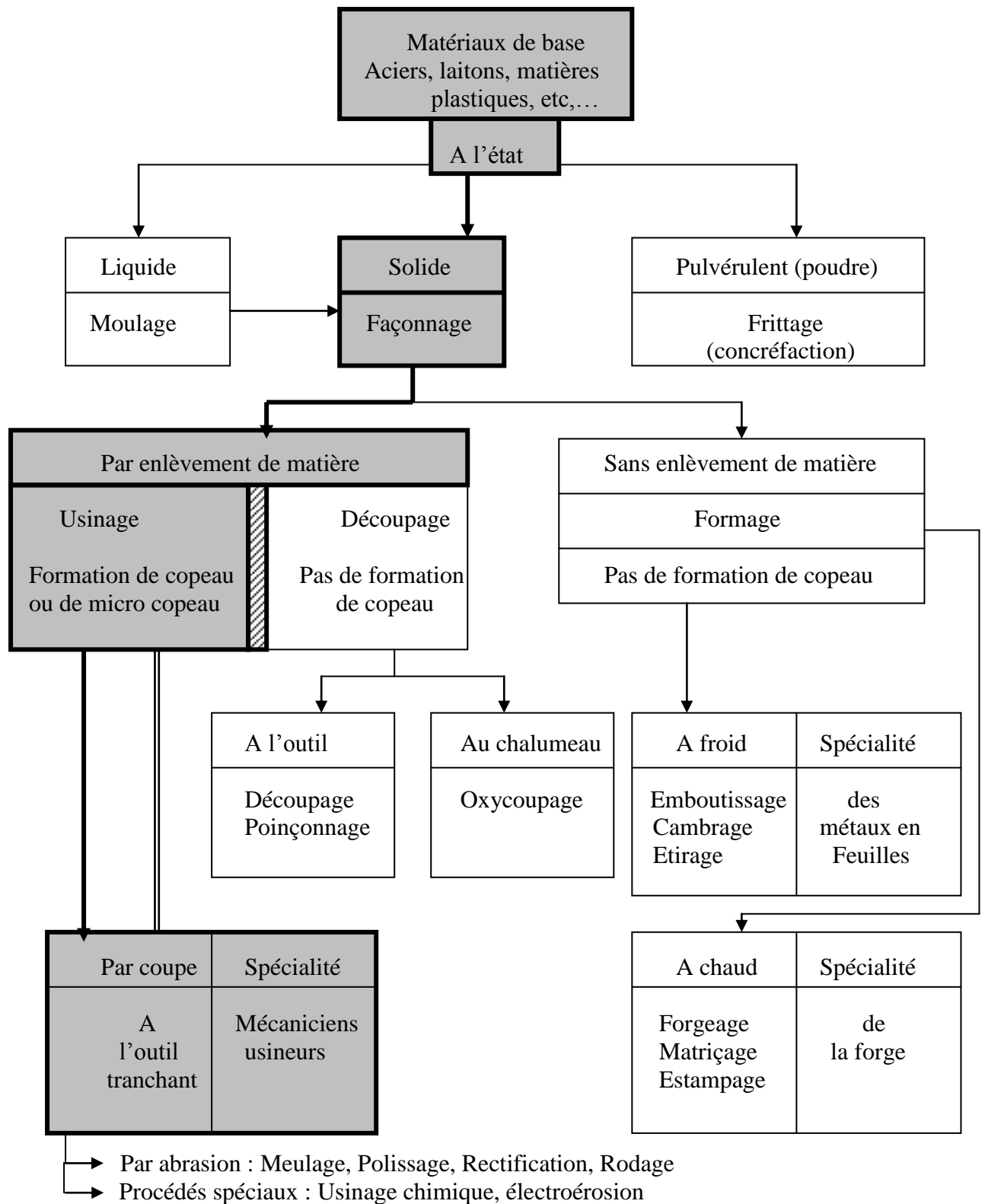


Figure I.1 : Les différents procédés

I.3/ PROCEDE DE TOURNAGE :

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé.

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. 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).

I.3.1/ PRINCIPE DU TOURNAGE :

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme (M_c) et est généralement tenue par le mandrin. [2]

L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions qui sont perpendiculaires entre elles et 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.

La **figure I.2** représente le procédé de tournage.

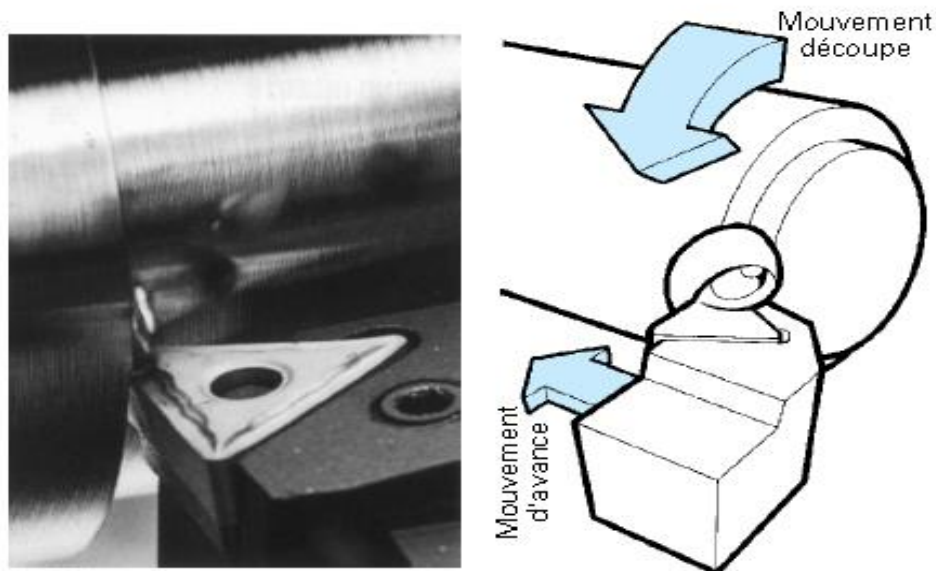


Figure I.2 : Procédé de tournage

I.3.2/ LE TOUR :

Le type de machine utilisé en tournage est le tour. [3]

Les tours permettent de réaliser des surfaces hélicoïdales (filetage) et des surfaces de révolution: cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale des ces machines est l'usinage des arbres.

On peut classer les tours en deux catégories : Les tours parallèles qui sont réservés aux travaux unitaires et en petite série et les tours spéciaux automatiques et semi-automatiques qui sont destinés au travail en série.

On distingue deux classes : tours monobroches et tours multibroches (le nombre de broches porte-pièces est : 4, 6 ou 8 broches). Chaque broche comporte généralement deux chariots porte-outils radiaux et un porte-outil axial. Les outils travaillent simultanément.

On trouve :

- Tour Semi-Automatique A Décolleter,
- Tour Revolver, Tour A Copier,
- Tour A Commande Numérique,
- Etc,...

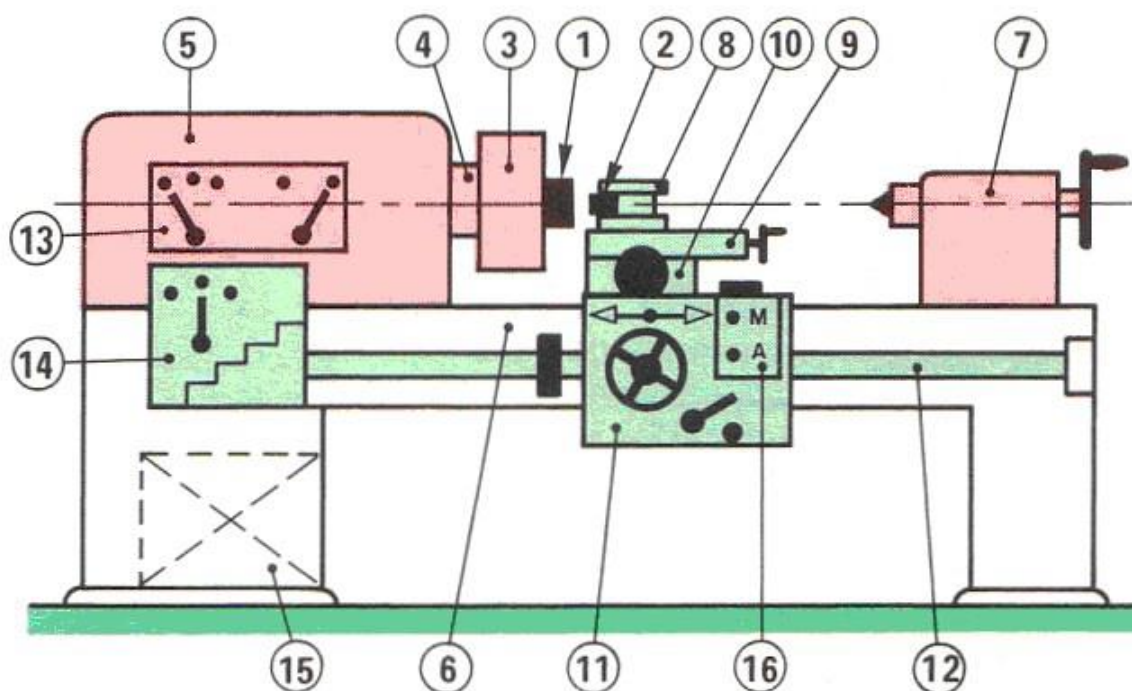


Figure I.3 : Constitution d'un tour parallèle

Avec :

- 1 = Pièce
- 2 = Outil
- 3 = Mandrin
- 4 = Broche
- 5 = Poupée fixe
- 6 = Banc
- 7 = Poupée mobile
- 8 = Tourelle porte-outils
- 9 = Chariot supérieur
- 10 = Chariot transversal
- 11 = Trainard
- 12 = Barre de chariotage
- 13 = Boite des vitesses
- 14 = Boite des avances
- 15 = Moteur
- 16 = Contacteur

I.3.3/ LES DIFFERENTES OPERATIONS D'USINAGE :

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe.

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, quatre opérations de base :

1. tournage longitudinal, ou chariotage,
2. dressage,
3. tournage de cônes,
4. contournage.

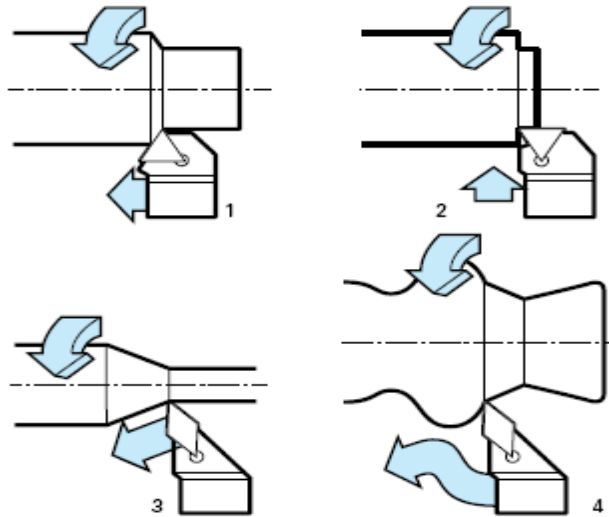


Figure I.4 : Opérations de base en tournage

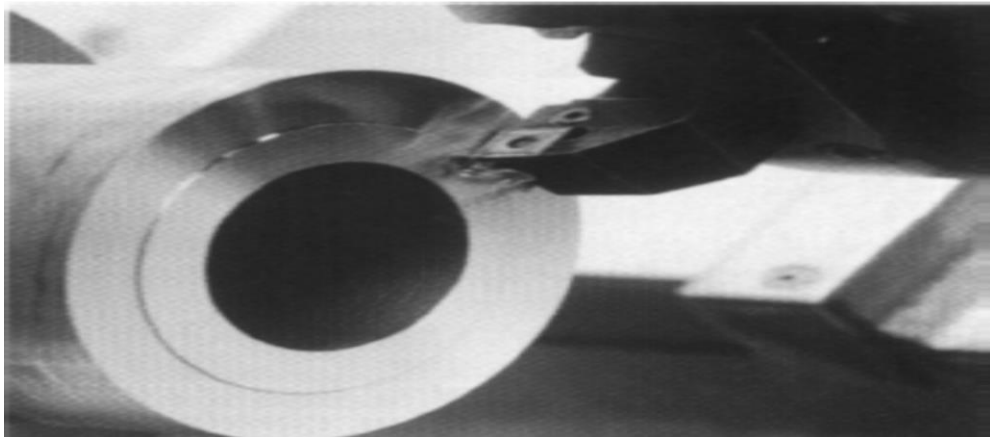


Figure I.5 : Opération de dressage d'un tube

I.3.4/ LES DIFFERENTS MONTAGES :

En tournage, les différents montages sont :

- Montage en l'air sur mandrin à trois mors qui convient pour le tournage extérieur ou intérieur des pièces courtes,
- Montage entre pointes ou tournage en lunettes qui convient pour le tournage extérieur des pièces longues et flexibles). On utilise des lunettes qui sont des supports auxiliaires. Dans ce montage, l'axe de la pièce doit coïncider en permanence avec l'axe de la broche du tour,
- Montage mixte.

La figure I.7 illustre un des différents montages à savoir le montage en lunette.

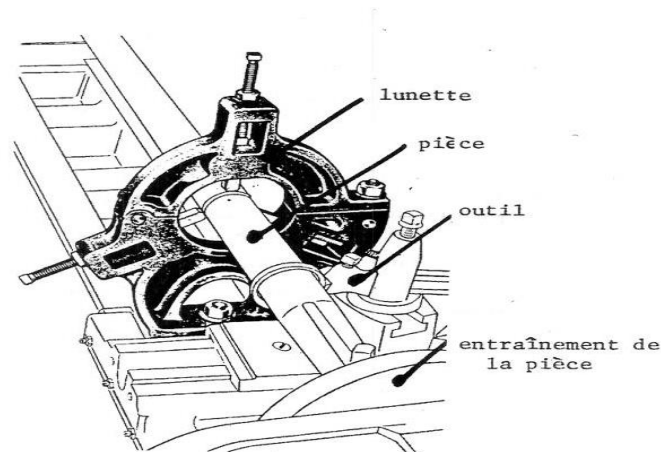


Figure I.6: Montage en lunette

I.3.5/ L'OUTIL :

L'outil est l'intermédiaire entre la machine et la pièce à usiner.

La partie active d'un outil est foncée dans la pièce et se déplace mécaniquement par rapport à celle-ci de façon à éliminer la surépaisseur sous forme de copeau. [4].

De la même manière que la constitution des outils de coupe (coupants), les angles caractéristiques de l'outil (tournage) sont :

- Angle de dépouille α ,
- Angle de taillant β ,
- Angle de coupe γ ,
- Angle d'inclinaison de l'arête λ ,
- Angle de direction de l'arête χ_r ,
- Angle de direction complémentaire ψ_r ,
- Angle de pointe ζ_r .

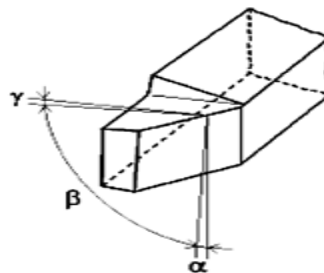


Figure I.7 : Angles de coupe

En tournage, la forme du bec influence l'état de surface. Le choix du rayon de bec est fonction de l'opération à effectuer : ébauche ou finition.

Pour le cas d'une opération d'ébauche, et afin d'obtenir une arrête de coupe résistante, il faut choisir le rayon r_e de bec le plus grand possible.

Pour le cas d'une opération de finition, l'état de surface et les tolérances qu'il est possible d'obtenir sont essentiellement fonction du rayon de bec et de l'avance. Pour des conditions d'usinage favorable, l'avance doit être utilisée avec un état de surface donné et un rayon de bec déterminé.

Ainsi, les principales formes sont : Intersection vive, rayon et plat.

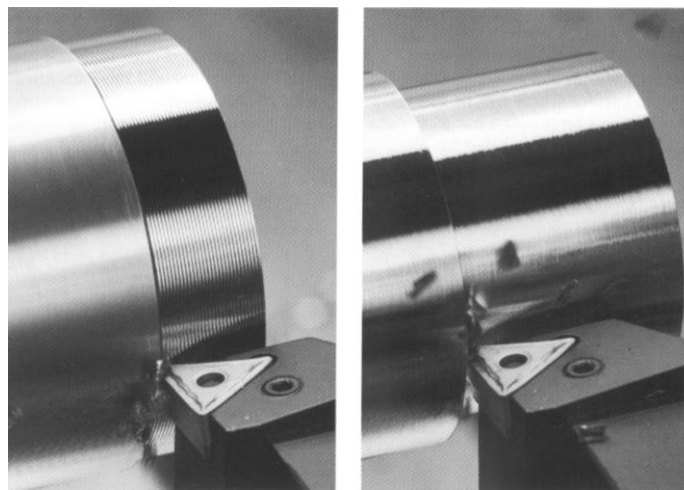


Figure I.8 : Influence du rayon du bec de l'outil sur la surface à usinée

I.3.6/ FORMATION DU COPEAU :

La coupe (formation du copeau) est un processus physique complexe qui s'accompagne de déformations plastiques et élastiques ; elle donne lieu à un frottement important (outil-pièce), au dégagement de chaleur, à la formation d'une arrête rapportée (copeau adhérent sur le bec de l'outil), à l'enroulement et au retrait du copeau, au durcissement de la pièce (surface usinée écrouie) et à l'usure de l'outil (détérioration de la partie active de l'outil).

La formation du copeau joue un rôle important sur la rugosité de la surface usinée.

Les formes du copeau varient suivant les conditions d'usinage.

L'usinage des métaux plastiques (aciers) donne lieu à trois types de copeaux : continu, cisailé et discontinu.

On obtient aussi le copeau fragmenté produit par l'usinage de métaux peu plastiques (fontes, bronzes,...).

- **Le copeau continu** : Il apparaît lorsque l'acier est usiné à une grande vitesse. Il s'écoule alors en forme d'une bande longue.

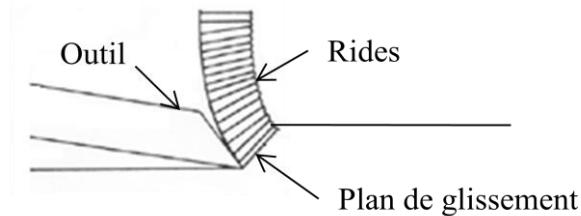


Figure I.9 : Copeau continu

- **Le copeau cisailé** : Il s'obtient lorsque l'usinage de l'acier se fait à vitesse moyenne. La face du copeau en regard de l'outil est lisse, alors que sa face opposée porte des entailles qui définissent la direction bien marquée des éléments isolés fortement liés les uns aux autres.

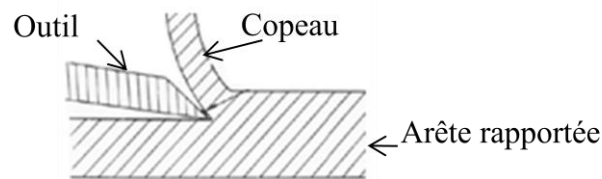


Figure I.10 : Copeau cisailé

- **Le copeau discontinu** : Il s'obtient lors de l'usinage des métaux durs et peu ductiles, à faible vitesse de coupe. Il est composé d'éléments séparés, déformés plastiquement, peu liés ou pas liés du tout entre eux.

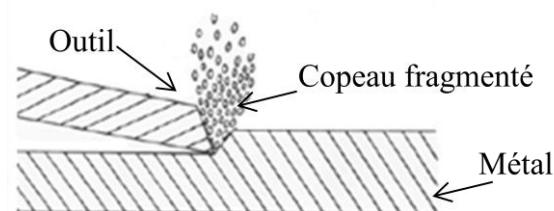


Figure I.11 : Copeau discontinu

Chapitre II

Coupe des métaux

II.1/ PRINCIPE DE LA COUPE DES METAUX :

La coupe des métaux (ou usinage) consiste à enlever une couche de métal pour obtenir une pièce finie conforme au dessin de définition.

Cette coupe est effectuée sur des machines à l'aide d'outils tranchants de dimensions et de formes diverses.

Lors de l'usinage, on trouve :

- Une lame d'outil qui pénètre dans la matière et enlève un copeau,
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine outil. [5].

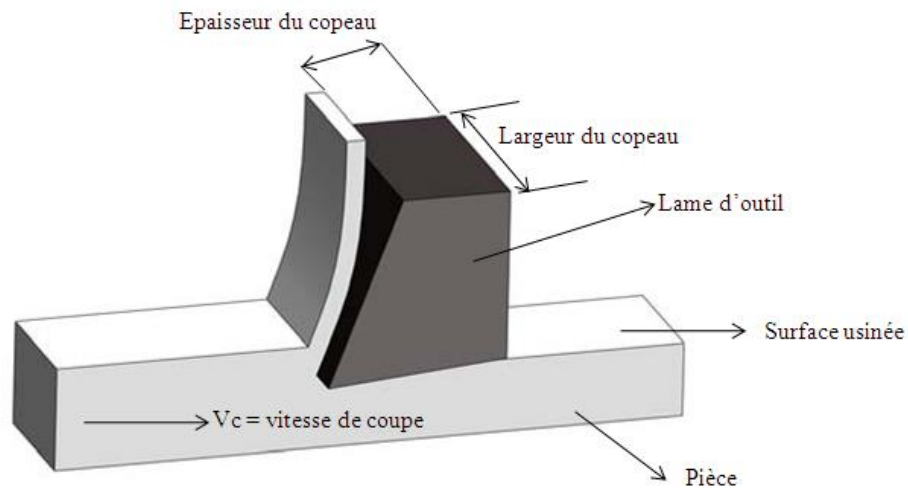


Figure II.1 : Usinage par enlèvement de matières

La conjugaison de 3 mouvements soit à l'outil où soit à la pièce permet la coupe.

Ces 3 mouvements sont :

- Le mouvement de coupe, M_c
- Le mouvement d'avance, M_a
- Le mouvement de profondeur, M_p

Avec :

Mouvement de coupe M_c = Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce. Il est le mouvement principal à l'élaboration du copeau pendant la course de la machine. Il est caractérisé par la vitesse de coupe v_c qui est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce. Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation n et du diamètre D de l'élément en rotation. Pour le tournage, il faut prendre le diamètre du cercle qui se trouve sur le point de l'arête de coupe le plus éloigné de l'axe de rotation.

Mouvement d'avance M_a = Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance est caractérisé par la **vitesse d'avance v_f** qui est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en mm/min soit en mm/tour. [6].

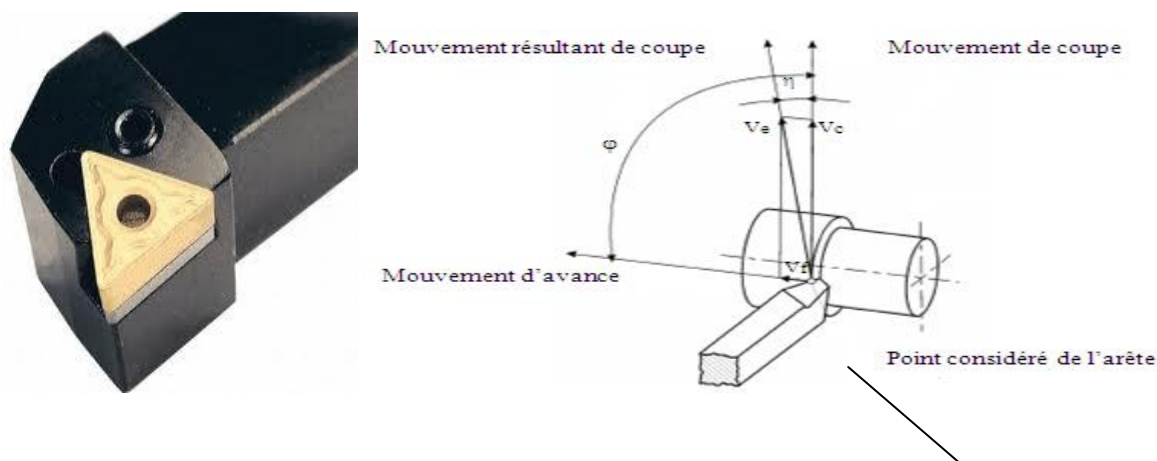


Figure II.2 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage

Mouvement de profondeur M_p

Les paramètres d'usinage sont des grandeurs qui caractérisent les mouvements de l'outil et de la pièce à usiner ainsi que les valeurs de la surépaisseur d'usinage et de la section de coupe. Le mouvement de profondeur M_p est un mouvement perpendiculaire aux mouvements de coupe et d'avance. Il détermine la pénétration de l'outil dans la pièce (l'épaisseur du copeau à enlever).

Pour enlever de la matière en cours d'usinage, deux mouvements sont nécessaires : **mouvement de coupe** et **mouvement d'avance**. D'une manière générale, ces mouvements de coupe peuvent être donnés soit par la pièce soit par l'outil.

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil,...), on doit régler les paramètres de coupe ; ou, il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de coupe, comme le montre la figure II.3:

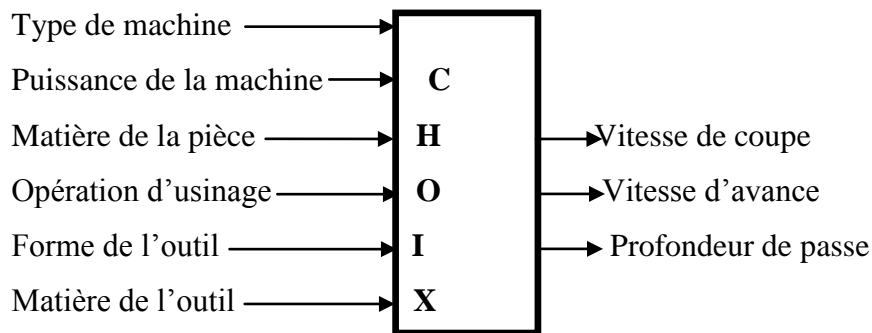


Figure II.3 : Critères permettant de définir les paramètres de coupe

Suivant le type d'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc choisir la machine à utiliser : Tournage, fraisage ou perçage.

De ces paramètres, on peut citer :

Surépaisseur d'usinage : La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires).

Avance : Valeur du déplacement de l'arête tranchante pendant que la pièce fasse un tour (pour le tournage). Elle est déterminée par la profondeur de passe, de l'état de surface (ébauche ou finition), la nature de l'outil et suivant le déplacement de l'outil (longitudinal, transversal ou oblique).

Profondeur : est la valeur de la couche du métal enlevé (surépaisseur). Elle est déterminée par la nature du métal à usiner et par l'épaisseur du métal à usiner (ébauche ou finition).

Usinage en ébauche : on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps.

Usinage en finition : cette fois, c'est la qualité de réalisation qui est importante. La surface doit être lisse, les cotes doivent être correctes.

La figure II.4 illustre les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée **surface de la pièce**. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes. La **surface engendrée** (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée **surface coupée**. [7][8].

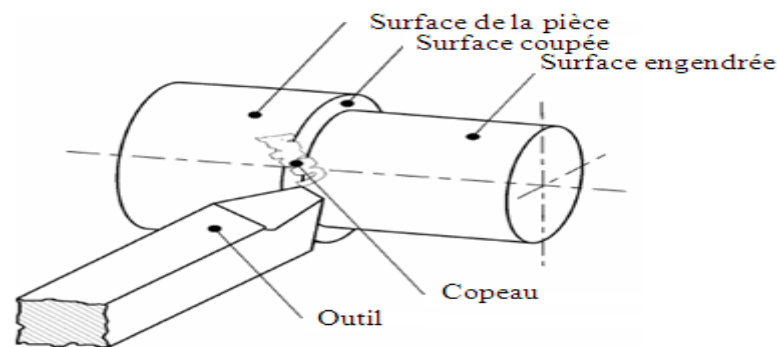


Figure II.4 : Surfaces de la pièce

II.2 : OUTIL DE COUPE :

Les outils permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables sur la pièce.

Il existe une grande diversité d'outils de coupe. Toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons sur un outil de coupe en tournage. Les définitions peuvent ensuite être déduites pour tout autre type d'outil. Dans cette partie, on ne donne que les définitions nécessaires à la compréhension de phénomènes de coupe expliqués plus loin. Les définitions complètes se trouvent dans la norme ISO3002/1982.

Aussi, un outil de coupe consiste en un **corps** et une **queue**. Un corps est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Parfois, les arêtes peuvent être taillées directement dans le corps. D'autre part, la queue de l'outil est la partie par laquelle celui-ci est maintenu.

La partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille) est appelée **partie active**. On y distingue différentes faces et arêtes qui sont illustrées sur la figure I.6 (les arêtes, la force de coupe et la face de dépouille). [9].

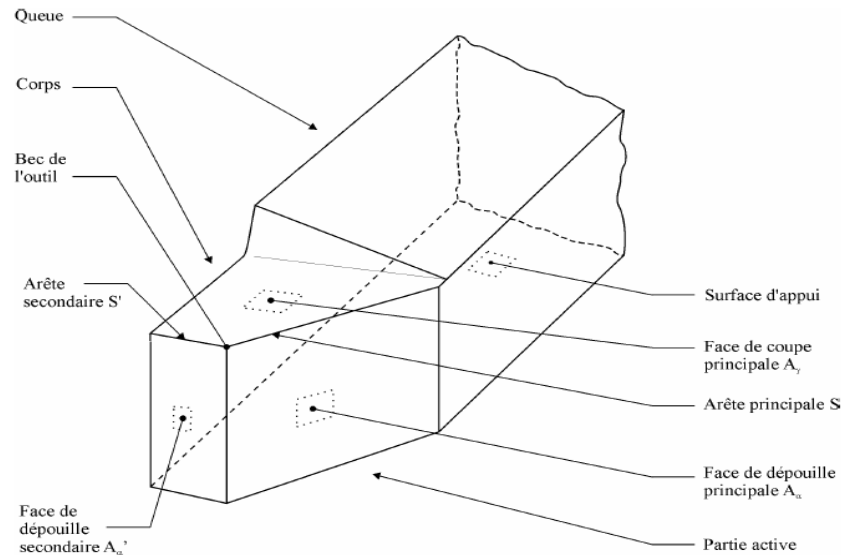


Figure II.5 : Eléments de l'outil

Avec :

Le Corps d'outil : Partie de l'outil qui porte les éléments composants l'outil (éléments coupants où plaquettes) et qui sert à sa fixation et à sa mise en position sur la machine.

La partie active de l'outil : Partie qui intervienne directement dans l'opération de coupe. Elle est composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arrêts tranchantes.

La face de coupe : Surface sur laquelle glisse le copeau lors de la coupe.

La face de dépouille : Surface devant laquelle passe la surface coupée par l'outil.

L'arrête tranchante principale : Arête tranchante destinée à l'enlèvement de la matière. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe A_γ et de la face en dépouille principale A_α .

L'arrête tranchante secondaire : 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_γ et de la face en dépouille secondaire A_α' .

Le Bec d'outil : Partie où se rejoignent l'arrête principale et l'arrête secondaire. Cette partie peut être droite, arrondie, où vive.

La partie de l'outil impliquée directement dans la coupe est appelée taillant. Elle est limitée par trois faces : la face de coupe le long de laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) le long desquelles passent les surfaces coupée et engendrée.

On appelle une **arête** un bord de la face de coupe destiné à l'enlèvement de matière. Dans un outil de tournage simple, on peut distinguer une arête principale, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille principale, et une arête secondaire, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille secondaire. La jonction des arêtes principale et secondaire forme le bec de l'outil. Il peut être droit, arrondi ou représenter l'intersection vive des deux arêtes. Pour faciliter l'explication des phénomènes de la coupe il est nécessaire de définir les angles ayant la plus grande influence sur les dits phénomènes.

La figure II.6 illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux du taillant :

- **Angle de dépouille α ,**
- **Angle de taillant β ,**
- **Angle de coupe γ .**

Ces angles sont dans les systèmes de référence outil en travail : outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

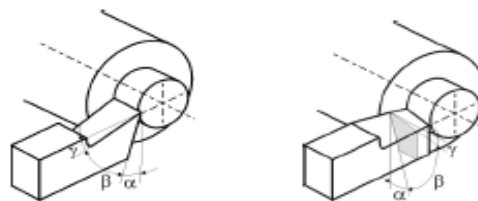


Figure II.6 : Angles du taillant (outil en travail)

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° .

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (I.2)$$

Dans le cas où la somme de α et de β est supérieure à 90° , on parle de coupe négative (γ négatif).

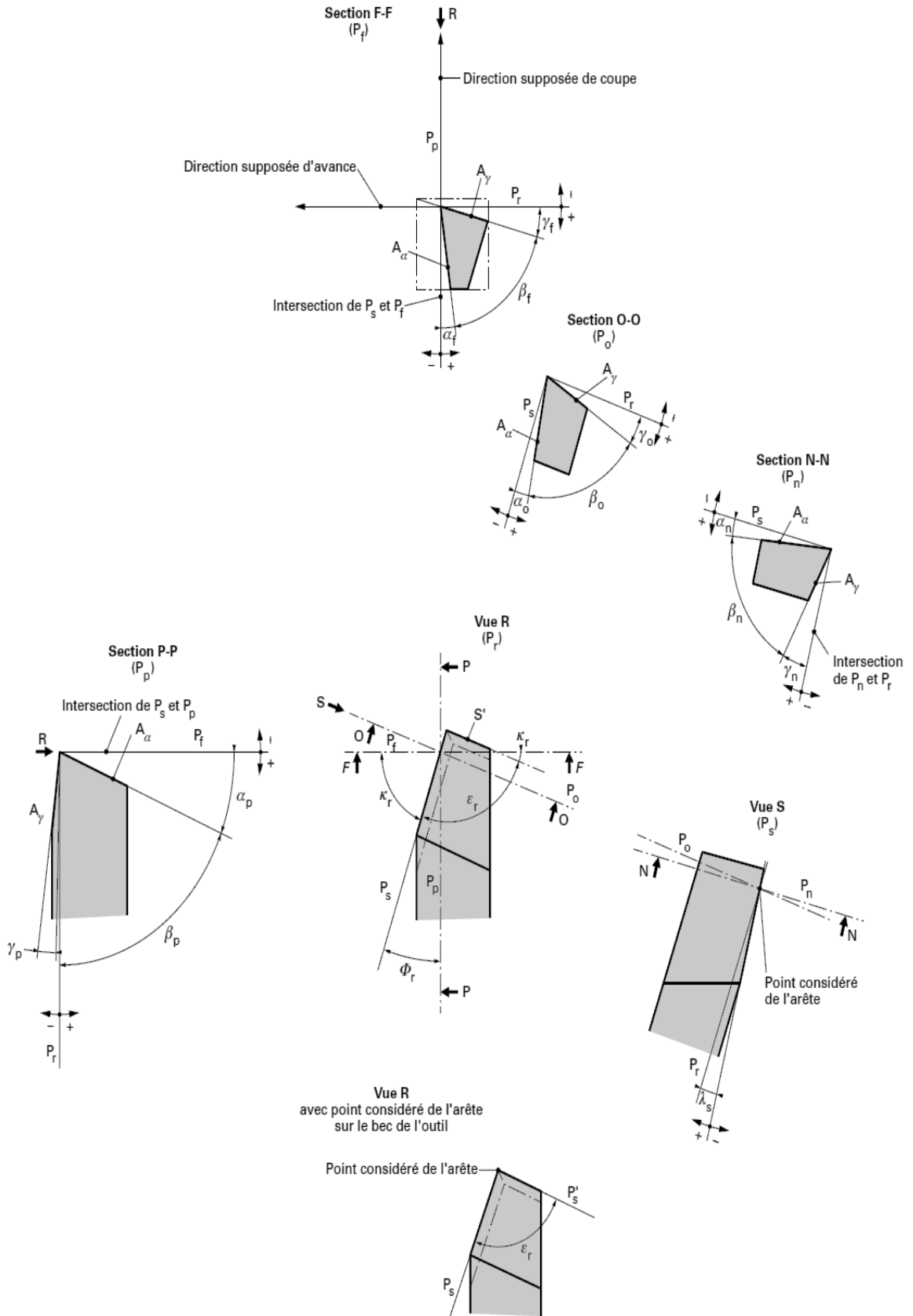


Figure II.7 : Plans et angles en main sur les outils courants : outil à chariotier droit (NF E 66-502)

Plan de l'outil en travail :

- Plan de référence en travail, **Pr** : plan perpendiculaire au point considéré de l'arête, à la direction de la vitesse résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point.
- Plan d'arête en travail, **Pse** : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence en travail **Pr**. Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe.
- Plan de travail, **Pfe** : plan contenant la direction de la vitesse de coupe et la direction de la vitesse d'avance au point considéré de l'arête. Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail **Pr**.
- Plan vers l'arrière en travail, **Ppe** : plan perpendiculaire au plan de référence en travail **Pr** et au plan de travail **Pfe**, au point considéré de l'arête.

Angles de l'outil :

Angles d'arête de l'outil en main :

- Angle de direction d'arête de l'outil k_r : angle aigu mesuré dans le plan de référence **Pr** entre le plan d'arête **Ps** et le plan de travail **Pf**. Il est mesuré de **Pf** vers **Ps** et dans le sens où la trace de **Ps** dans **Pr** s'éloigne du bec de l'outil.
- Angle d'inclinaison d'arête de l'outil λ_s : angle aigu mesuré dans le plan d'arête **Ps**, entre l'arête et le plan de référence **Pr**. Il est positif lorsqu'en s'éloignant de la pointe de l'outil l'arrêt se trouve en dessous du plan **Pr**.
- Angle de pointe de l'outil ϵ_r : C'est l'angle mesuré dans le plans **Pr**, entre le plan d'arête **Ps** et le plan d'arête secondaire **Ps'**.
- Angle de direction d'arête secondaire de l'outil $k_{r'}$: C'est l'angle, mesuré dans le plan **Pr**, entre le plan conventionnel de travail **Pf** et la projection de l'arête secondaire dans le plans de référence de l'outil **Pr**.

Les angles de direction d'arête de l'outil, de pointe de l'outil et de direction d'arête secondaire de l'outil sont liés par la relation : $k_r + \epsilon_r + k_{r'} = 180^\circ$

Angle d'arête de l'outil en travail :

- Angle de direction d'arête en travail k_{re} : c'est l'angle mesuré dans le plan **Pre**, entre les plans **Pfe** et **Pse**. La convention de sens adoptée pour k_{re} est la même que pour l'angle k_r .

- Angle d'inclinaison d'arête en travail λ_{se} : c'est l'angle mesuré dans le plan **Pse**, entre l'arête et le plan **Pre**. La convention de signe pour l'angle λ_{se} est la même que pour l'angle λ_s

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 suivants:

— P_o (P_{oe}) : plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence P_r (P_{re}) et au plan d'arête P_s (P_{se}), au point considéré de l'arête.

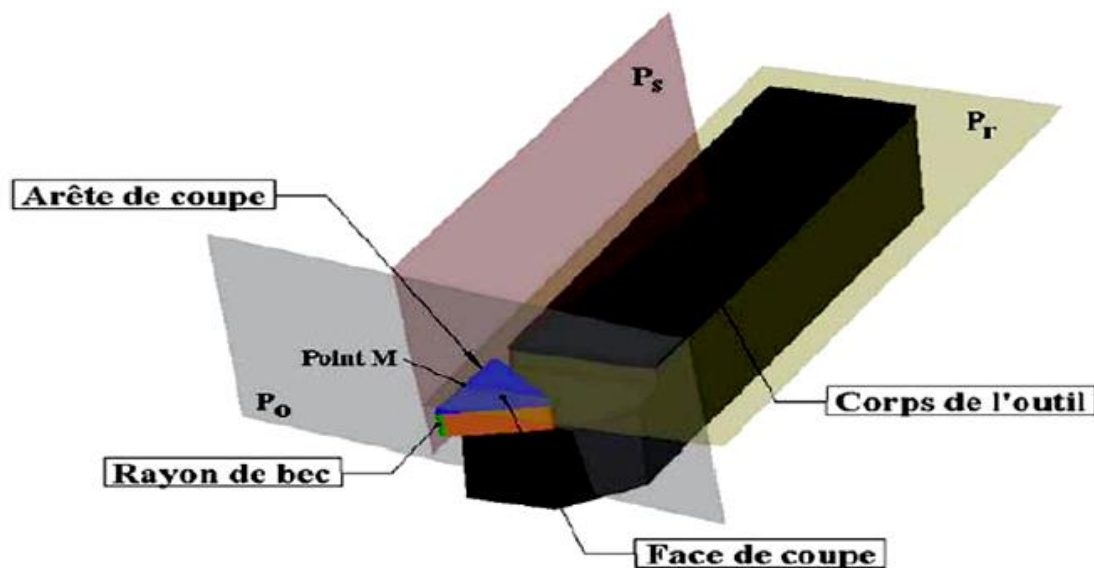


Figure II.8 : Définition de base d'un outil en tournage [10]

- P_n (P_{ne}) : plan normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré ($P_n = P_{ne}$)
- P_f : plan de travail conventionnel (plan de travail P_{fe})
- P_p : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail P_{pe})

La géométrie de l'arête :

Usuellement dans les modèles de coupe la partie active de l'outil est définie par trois plans sans raccordement.

En réalité, la zone de coupe de l'outil est constituée de trois plans raccordés par deux rayons : le rayon de bec r_e et le rayon d'acuité R de l'arête de coupe, qui est souvent négligé dans un grand nombre de modèles.

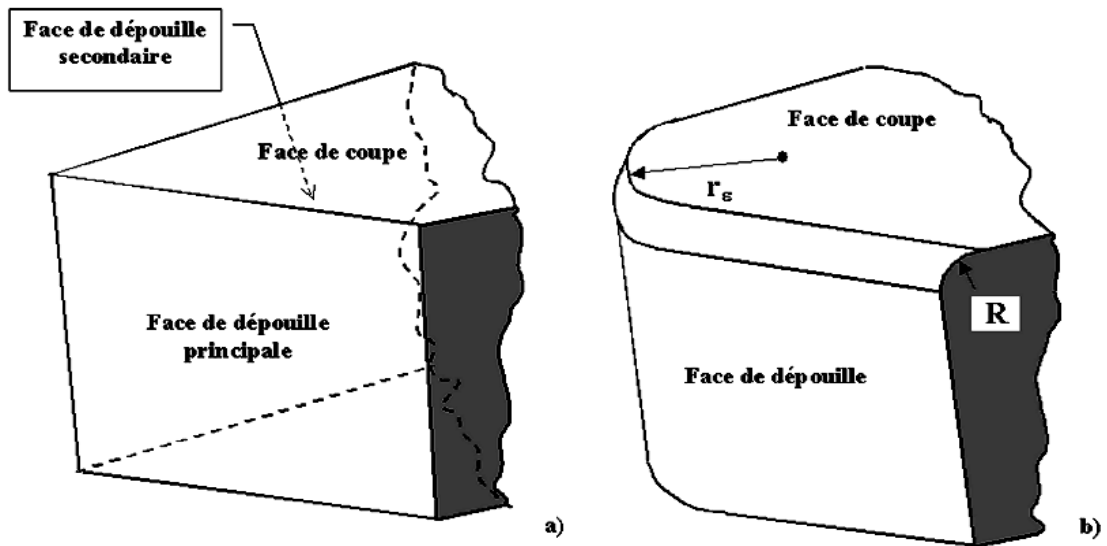


Figure II.9 : Géométrie de l'arête de coupe

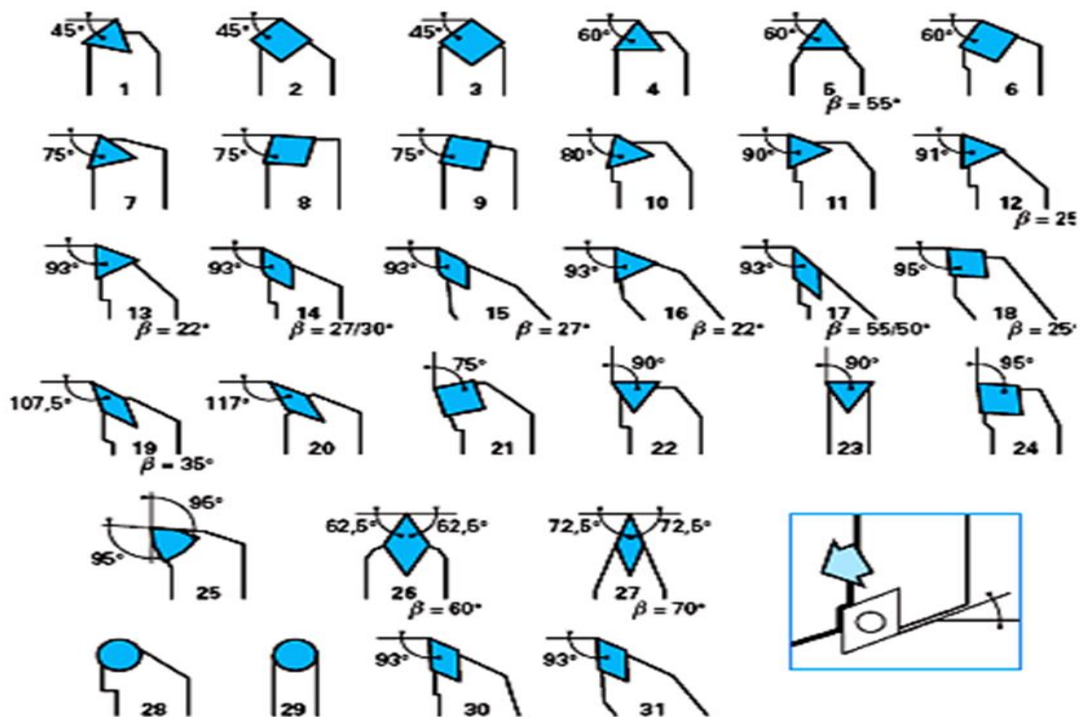


Figure II.10 : Gamme des angles d'orientation d'arête

II.3/ MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE :

Pour résister aux sollicitations sévères que le tranchant de l'outil subit dans la coupe, la partie de celui-ci doit être constituée d'un matériau présentant des qualités particulières :

- Une dureté élevée pour pouvoir pénétrer dans le métal usiné.
- Une résistance mécanique élevée (particulièrement à la compression) pour résister aux efforts de coupe.
- Une résistance aux chocs pour éviter l'écaillage de l'arête de coupe (croûte de la matière usinée que se dépose sur le bec de l'outil, en formant une deuxième arête tranchante), elle détériore l'état de surface et crée un échauffement plus accentué de la partie active.
- Une résistance au frottement suffisamment élevée pour limiter les efforts d'usure sur les faces de coupe et de dépouille.
- Une conservation de la dureté à des températures élevées (500 à 4400°C).
- Un bon fini de la face d'attaque et de dépouille pour respecter l'état de surface demandé (un bon pierrage après chaque affûtage est souhaitable).

Un bon outil doit permettre un maximum de rendement pour un minimum d'usure.

II.4/ LES PARAMETRES DE COUPE :

En tournage, les paramètres de coupe sont d'une part des paramètres de coupe cinématique qui représentent les déplacements de la pièce et de l'outil de coupe, et d'autre part des paramètres de coupe géométrique qui représentent les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe.

La détermination des paramètres de coupe a une grande importance dans la production industrielle, car à titre d'exemple des régimes réduits augmentent considérablement le temps d'exécution de la pièce à usiner, et élèvent le prix de revient. Pour cela, les paramètres adoptés doivent être optimaux pour assurer un prix de revient minimum de la pièce à usiner avec une plus grande productivité.

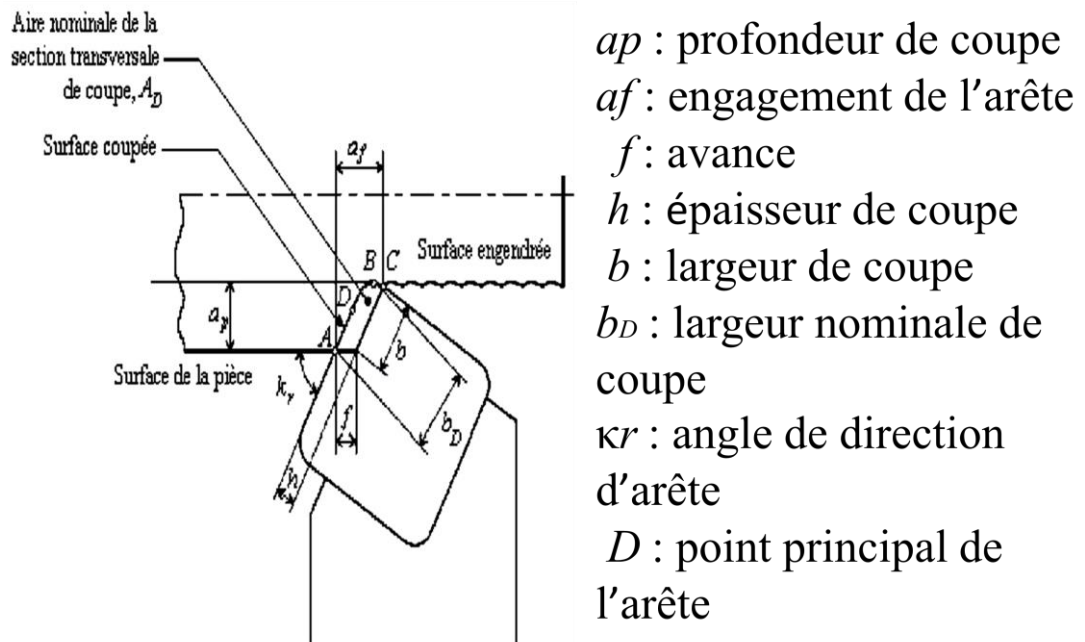


Figure II.11 : Dimensions des angles de coupe dans le de tournage

II.4.1/ VITESSE DE COUPE (VC) :

C'est le déplacement d'un point de l'arête tranchante de l'outil par rapport à la surface de coupe en une unité de temps.

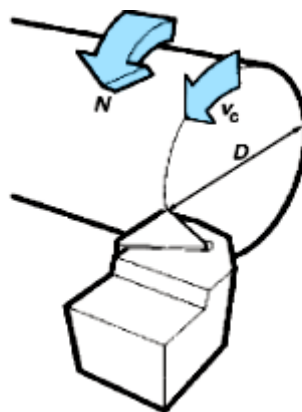


Figure II.12 : Vitesse de coupe

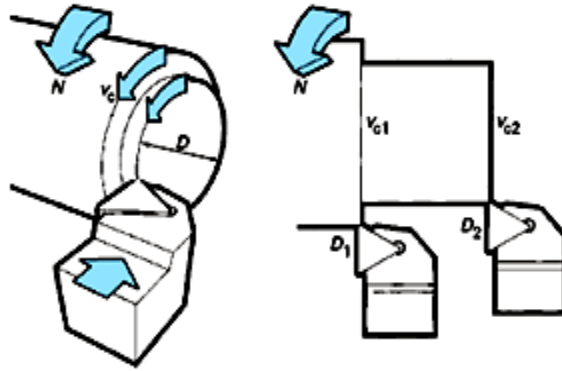


Figure II.13 : Vitesse de coupe, diamètre et vitesse de rotation

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.

Pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante. Cette vitesse est choisit en fonction, notamment des matériaux de la pièce et de l'outil, la lubrification et de la durée de vie souhaitée pour l'outil.

En désignant par D le diamètre du cercle décrit en millimètres (mm), par N la vitesse de rotation en tour par minutes (tr/min) et par Vc la vitesse linéaire en mètre par minute (m/min), on a :

$$Vc = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \left(\frac{m}{min} \right) \quad \text{II.1}$$

Le mouvement de coupe anime principalement la pièce (pièce tournante). On en déduit la vitesse de coupe Vc , qui déterminera la vitesse de rotation de la pièce que l'on doit régler sur la machine. $N = \frac{1000 \times Vc}{\pi \times D} \left(\frac{tr}{min} \right)$ II.2

II.4.2/ VITESSE D'AVANCE (V_f) ET AVANCE/TOUR (F) :

La vitesse d'avance V_f , est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en [mm/min] soit en [mm/tour]. [11]

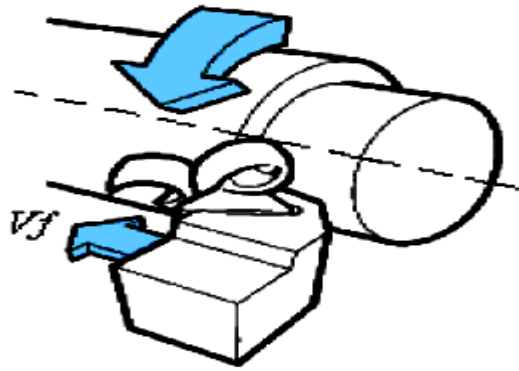


Figure II.14 : Vitesse d'avance

L'avance notée f correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage).

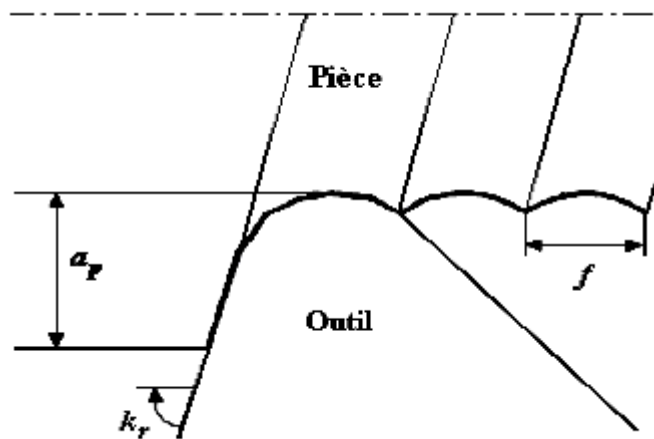


Figure II.15 : Avance f dans le cas de tournage

II.4.3/ PROFONDEUR DE PASSE :

La profondeur de passe notée a (mm) correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage.

La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

Chapitre III

Effets des paramètres de coupe

III.1/ Introduction :

Le processus d'usinage a un caractère subjectif du fait qu'il est très délicat en pratique d'évaluer l'ensemble des conséquences des choix technologiques lors des différentes opérations d'usinage des différents procédés d'usinage : Tournage, fraisage, rabotage, perçage, ...

Aussi, le processus d'usinage a un caractère relatif du fait qu'il faut prendre plusieurs paramètres en considération comme la qualité de la pièce à usiner, la qualité de l'outil, ...

Pour obtenir les meilleures conditions d'usinage, il faut prendre en considération 3 paramètres importants :

- La machine-outil,
- L'outil de coupe,
- La pièce.

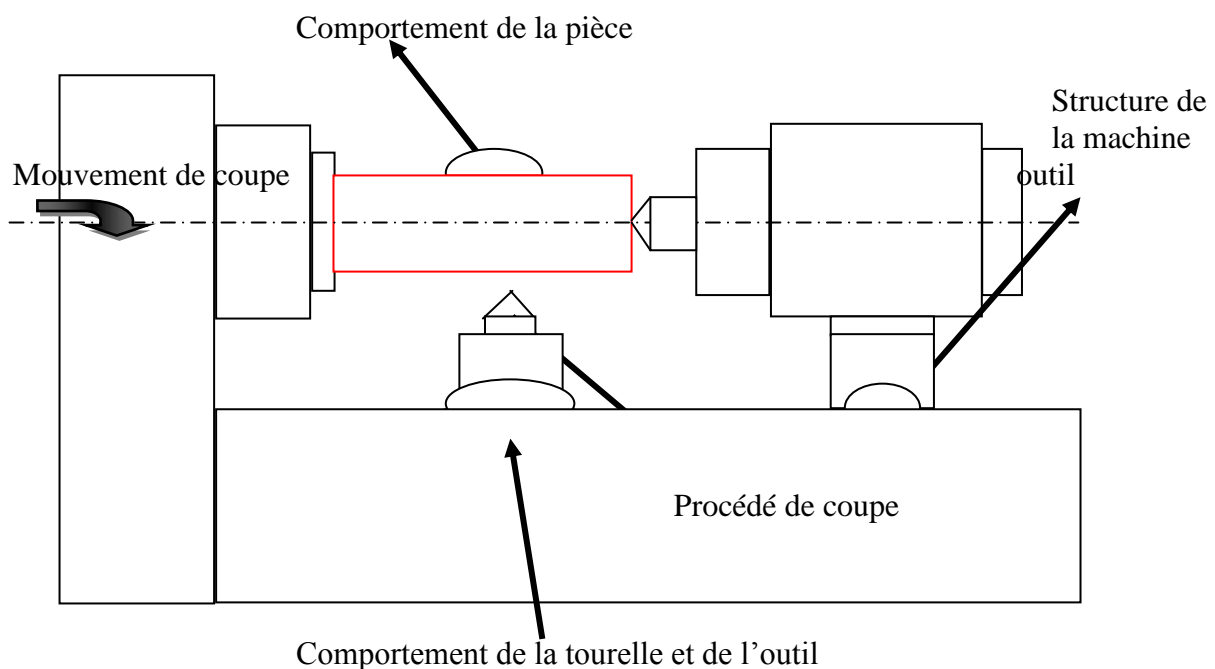


Figure III.1 : Définition de système Pièce/Outil de coupe/Machine-outil

Lors de ce processus, des sollicitations différentes sont induites à l'outil de coupe. De ces sollicitations, est déduite une formation de copeaux.

III.2/ SYSTEME PIECE/OUTIL DE COUPE/MACHINE-OUTIL (POM) :

Lors de l'usinage, la machine-outil est nécessaire. Celle-ci est un ensemble complexe mettant en œuvre :

- Un ou plusieurs procédés,
- Des éléments de sa partie fixe comme le bâti et la glissière,
- Des éléments de sa partie mobile comme la broche et les arbres tournants dans les paliers.

La machine-outil, étant un véritable système, doit être étudiée comme tel et a un comportement dynamique dont ne saurait rendre compte l'étude séparée de chacun de ses éléments.

Tous les éléments constituant cette machine-outil, qu'ils soient actifs ou passifs, interagissent..

III.2.1/ DESCRIPTION DU SYSTEME PIECE/OUTIL DE COUPE/MACHINE-OUTIL (POM) :

Plusieurs auteurs se sont intéressés sur la description de ce système pièce/outil de coupe/machine-outil (POM) et plusieurs recherches ont été faites. L'ensemble s'est accordé à ce que la machine-outil possède une partie indépendante et une partie dépendante de l'opération d'usinage.

Aussi, tous les travaux peuvent être classés en 2 types :

- Descriptives,
- Applications expérimentales.

III.2.1.1/ ELEMENTS INDEPENDANTS DE L'OPERATION D'USINAGE :

On peut citer les éléments suivants :

- Bâti,
- Ensemble chariot-glissière,
- Broche,
- Commande d'avance,
- Commande de puissance,
- Directeur de commande.

Bâti : Son rôle est multiple. D'une part, il sert d'intermédiaire entre le sol et les éléments actifs de la machine, et d'autre part, il réalise la liaison entre la pièce à usiner et les outils de coupe.

Ensemble chariot-glissière : Il confère au chariot un seul degré de liberté correspondant à une translation. Il est communément convenu que la liaison idéale chariot-glissière doit être sans jeu et ne fait intervenir qu'un frottement de type hydrodynamique.

Broche : C'est un corps tournant qui possède un seul degré de liberté par rapport à la structure de la machine. La machine comporte les paliers qui retirent à la broche cinq degrés de liberté. Ces paliers ont une grande importance pour la qualité de la machine. Ils doivent être rigides et ne doivent présenter que de très faibles jeux, afin d'éviter des mouvements relatifs non souhaités entre la broche et le bâti (donc entre la broche et la pièce).

Commande d'avance : Elle comporte en général un moteur et une transmission mécanique de mouvement entre un élément de structure (fixe ou mobile) et le chariot. C'est donc la commande d'avance qui retire au chariot son sixième degré de liberté.

Commande de puissance : Elle pose des problèmes qui ont pour origine la liaison entre le moteur et la broche. Essentiellement deux techniques sont utilisées. La courroie qui paraît être arrivée au bout de son potentiel tant en vitesse qu'en puissance transmise et la transmission directe qui présente des problèmes sérieux dus à l'encombrement qu'elle impose à la broche ou à l'ensemble moteur-broche quand ils sont montés en ligne.

Directeur de commande : Il a pour rôle d'animation de l'ensemble de la machine. En particulier, c'est lui qui assure le déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce selon la trajectoire prévue. Il est responsable aussi du maintien des conditions de coupe à leurs valeurs programmées.

III.2.1.2/ ELEMENTS DEPENDANTS DE L'OPERATION D'USINAGE :

On peut citer les éléments suivants :

- Pièce,
- Outil de coupe,
- Porte-outils de coupe,
- Porte-pièces.

Pièce : Elle est considérée comme une partie intégrante du système d'usinage car en effet, il ne sert à rien d'avoir une machine de très grande rigidité et de très haute qualité si la pièce à usiner se déforme sous l'effet des efforts de coupe ou de bridage.

Les pièces peuvent être considérées en 3 catégories :

- Pièces massives,
- Pièces flexibles,
- Autres.

Outil de coupe : Il peut être unique ou multiple. Il constitue une partie essentielle dans l'étude du comportement statique et dynamique d'une machine-outil.

Les outils de coupe sont repartis en trois catégories :

- Indéformables,
- Souples,
- Intermédiaires.

Porte-outil de coupe : Il assure la liaison entre l'outil de coupe et la machine-outil. La notion de l'interface confère aux porte-outils des caractéristiques particulières de raideur et d'amortissement qui sont très dépendantes de la qualité et de l'état d'usure de l'interface.

Porte-pièces : Il assure le maintien en position de la pièce par rapport à l'élément auquel elle est rattachée. Les actions qu'ils exercent sur la pièce contribuent à la fois à la déformer et à la renforcer. Sur le plan dynamique, la prise en compte globale de l'ensemble est nécessaire sauf dans le cas des pièces particulièrement déformables ne pouvant pas être soutenues.

III.3/ MECANISME DE FORMATION DU PROFIL MICROGEOMETRIQUE DES SURFACES USINEES :

Lors de l'usinage, et lors du contact de la pièce avec l'outil de coupe, la génération d'une surface usinée fait intervenir autant la forme que les traces laissées par le tranchant (de l'outil de coupe) au contact de la pièce lors du mouvement relatif.

De ce contact et de cette coupe, sont déduits un nombre important de phénomènes. De ces derniers, on peut citer :

- Déformations élastiques et plastiques du matériau utilisé,
- Apparition dans certaines conditions, d'une arête rapportée et de dépôts naissant sur l'arête tranchante de l'outil,
- Effets dynamiques qui se manifestent par les vibrations du système mécanique (POM),
- Frottements entre le copeau et la face de dégagement d'une part et du contact entre facette d'usure sur le plan en dépouille et la pièce usinée d'autre part.

L'existence de ces phénomènes justifie l'affirmation que les traces, (défauts microgéométriques) laissées par l'outil de coupe lors de son passage sur la surface qu'il engendre, différeront du tout au tout de celles que l'on aurait pu attendre en limitant l'analyse à la seule action des parties tranchantes de l'outil.

En conclusion, les propriétés physicomécaniques de la couche superficielle ainsi que son aspect microgéométrique (rugosité) mettent en jeu l'action concomitante de tous les facteurs évoqués précédemment.

III.4/ DETERMINATION THEORIQUE DE LA RUGOSITE :

Cas de tournage :

Dans le cas de tournage, la profondeur totale de la rugosité théorique peut être calculée de la manière suivante :

Pour le tournage de surfaces sphériques et toriques à l'aide d'un outil à pointe vive, $r_{\epsilon}=0$ La hauteur et la profondeur totale de la rugosité théorique R_t répond à la relation suivante :

$$R_t = R \left[\sqrt{1 + 4 \sin^2 \frac{\theta}{2} \left(\frac{\sin^2(\frac{\theta}{2} + k_{r1})}{\sin^2(\theta + k_r + k_{r1})} \right) + 4 \sin \frac{\theta}{2} \sin \chi \frac{\sin(\frac{\theta}{2} + k_{r1})}{\sin(\theta + k_r + k_{r1})} - 1} \right] \quad (\text{III.1})$$

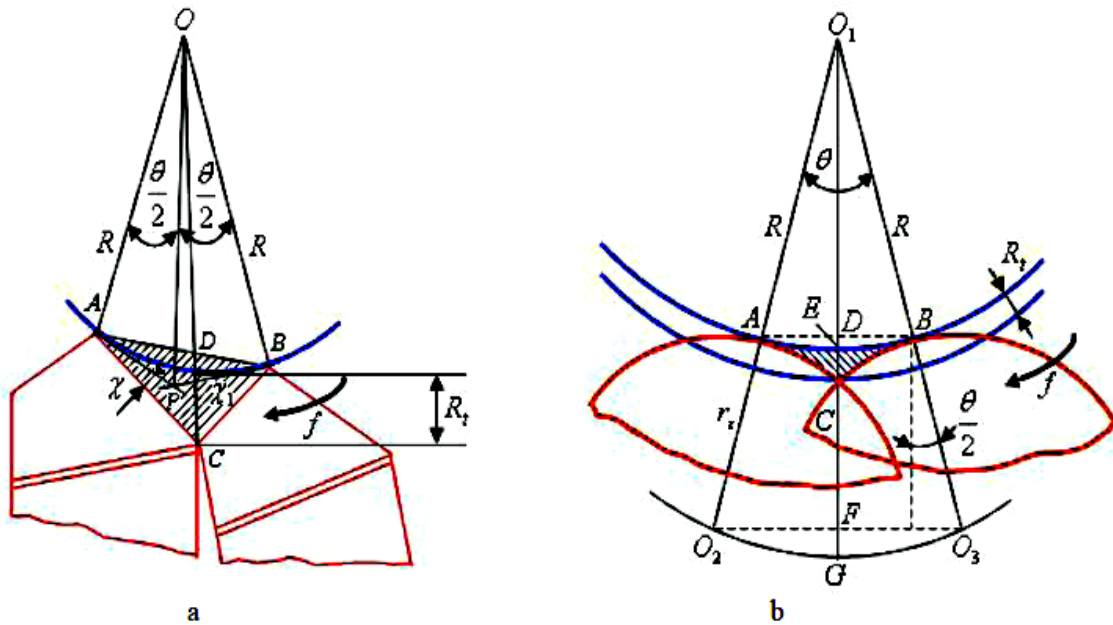


Figure III.2 : Hauteur théoriques des aspérités sur pièces sphérique ou toriques
a. Outil à pointe vive ($r_c=0$) ; **b.** Outil à pointe arrondie ($r_c>0$)

Avec :

R : Rayon de la pièce usinée (mm)

θ : Déplacement angulaire de l'outil pour une rotation de la pièce (rd)

La **figure III-11**, a montre deux positions successives de l'outil distantes de l'avance (f).

L'angle θ s'écrit alors :

$$\theta = f / R \quad (\text{III.2})$$

Avec : f (mm/tr) ; Avance de l'outil.

On remarquera à partir de la relation III-39) que pour une valeur constante de l'angle θ , la profondeur totale de la rugosité augmente avec le diamètre de la pièce usinée. Parallèlement, pour un même θ , plus le diamètre tourné sera grande et plus l'avance de l'outil devra l'être.

b) Dans le cas où l'outil aurait sa pointe arrondie, la hauteur théorique de la rugosité sur pièces sphériques ou toriques devient :

$$R_t = r_c \cos \frac{\theta}{2} - R \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) - \sqrt{r_c^2 - (r_c + R)^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} \quad (\text{III.3})$$

III.5/ Expérience :

Pour notre expérience qui s'est déroulée dans l'atelier d'usinage de notre département, on a utilisé :

- Machine outil : Tour
- Procédé : Chariotage
- Matière de la pièce : Acier doux
- Dimension de la pièce : $\varnothing 30 \times 55$
- 3 outils avec des becs différents

On a utilisé plusieurs expériences en faisant varier :

- Vitesse de rotation
- Avance (par tour)
- Profondeur

Après plusieurs essais, on a opté pour :

- Des vitesses de rotations variant entre 420 tr/min et 530 tr/min
- Des avances de 0.04 à 0.25 mm/tr
- Des profondeurs de 0.25 à 0.40 mm

Pour le bec d'outil, partie où se rejoignent l'arrête principale et l'arrête secondaire de la partie active de l'outil (chapitre II), la forme peut être :

- Droite,
- Arrondie,
- Vive.

Le tableau suivant résume les données utilisées :

| Vitesse de rotation (tr/min) | Avance (mm/tr) | Profondeur (mm) | Rayon du bec (mm) |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| 420 | 0.04 | 0.25 | 0.40 |
| 450 | 0.10 | 0.30 | 0.60 |
| 480 | 0.15 | 0.35 | 0.80 |
| 500 | 0.20 | 0.38 | 1.00 |
| 530 | 0.25 | 0.40 | 1.20 |

Tableau III.1 : Paramètres d'usinage

Les résultats nous donnent les courbes suivantes :

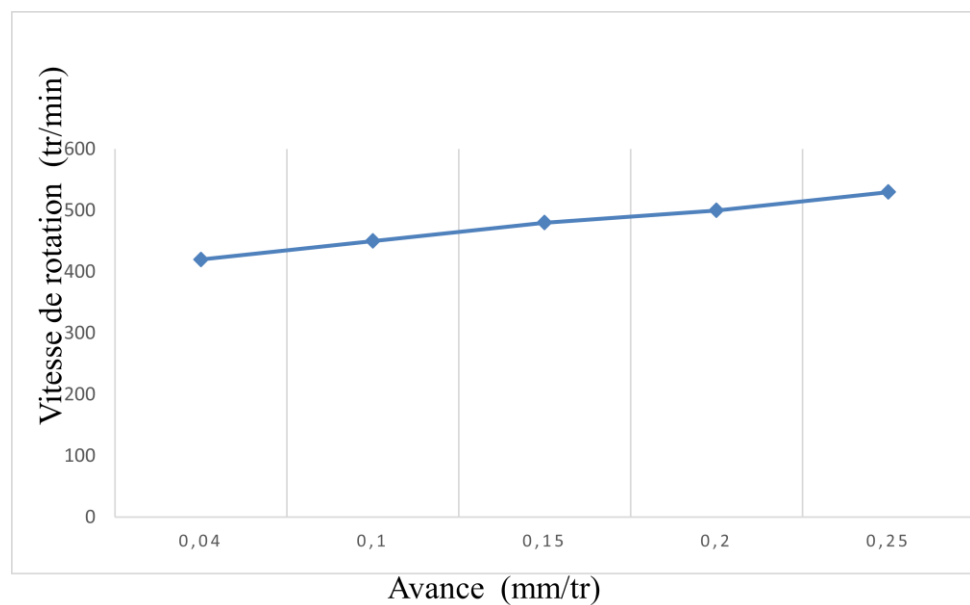


Figure III.3 : Effet de la vitesse de rotation sur l'avance

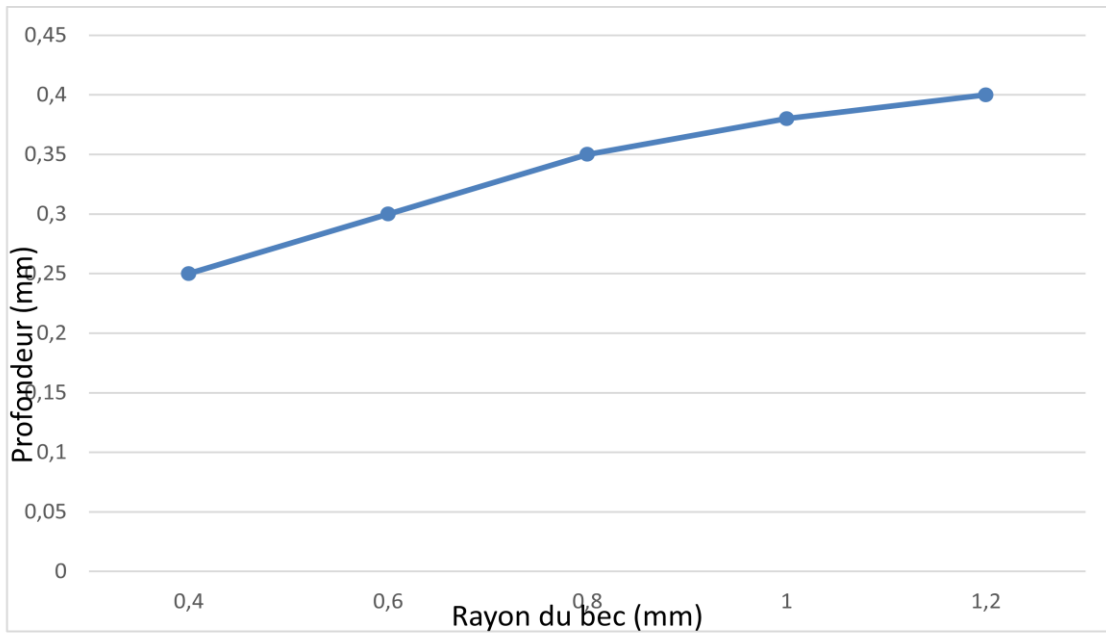


Figure III.4 : Effet de la profondeur sur le rayon du bec

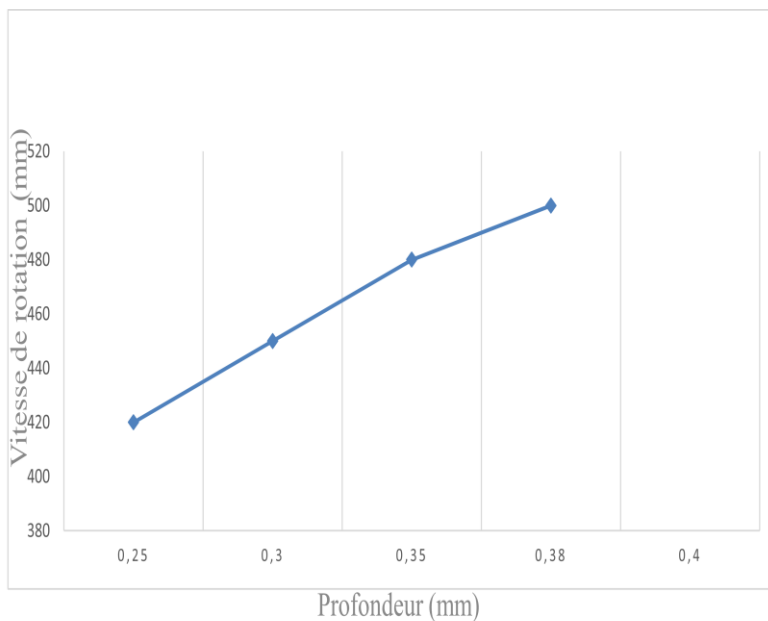


Figure III.5 : Effet de la vitesse de rotation sur la profondeur

De ces résultats, on peut déduire qu'afin que le principe du mécanisme de l'apparition des vibrations de broutage soit clair, il faut analyser l'effet et le rôle que jouent dans ce phénomène les propriétés dynamiques de la structure vibrante de la machine-outil d'une part et le processus de coupe d'autre part. Les paramètres de coupe doivent être bien sélectionnés et étudiés.

Le processus de coupe est caractérisé par la présence d'une variation de l'effort de coupe sous l'effet de divers paramètres tels que la largeur de coupe, l'épaisseur du copeau, la vitesse de coupe et les matériaux usinant et usinés.

Ce phénomène permet la transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique capable de compenser les pertes par dissipation. L'énergie apportée au système vibrant sera d'autant plus grande que la variation de l'effort de coupe est plus grande.

Le comportement dynamique du système usinant est caractérisé par le déplacement élastique de la pointe de fraise sous l'effet de la variation de l'effort de coupe engendrée par la coupe.

Le bon fonctionnement d'une machine-outil repose donc essentiellement sur ces deux aspects. L'action sur le comportement dynamique de l'une des deux fonctions de transferts peut décider de l'état du système considéré. Il y a donc lieu de s'intéresser aux facteurs susceptibles de faire varier ces deux fonctions de transferts.

D'après la littérature, on déduit qu'il ya 3 zones de régime de coupe. [12].

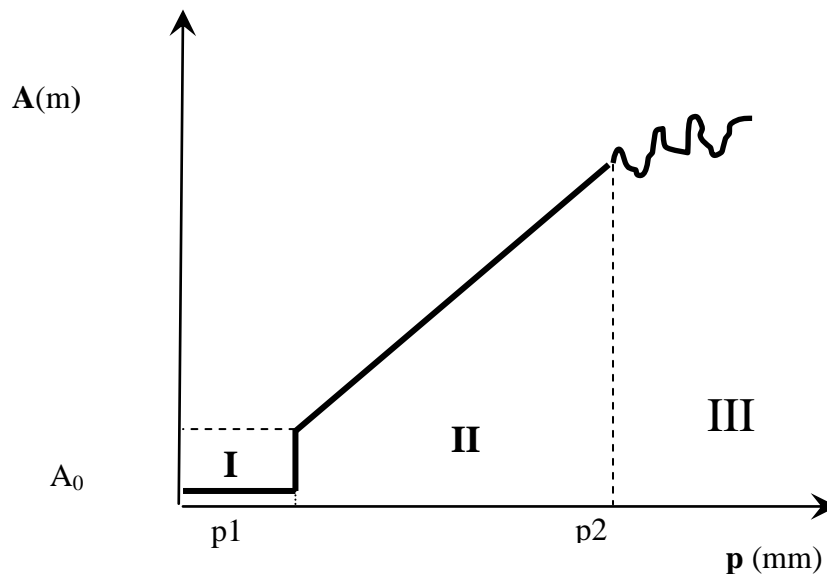


Figure III.6 : Amplitude en fonction de la profondeur

- * La zone I correspond à une coupe stable.
- * La zone II correspond à un broutage linéaire.
- * La zone III correspond à un broutage non linéaire.

III.6/ Travaux comparatifs :

A travers cette partie, nous avons essayé de comparer nos travaux avec les travaux de Dr Melzi Nesrine. Celle a soutenu sa thèse de doctorat sous le titre : Simulations numériques de la coupe des pièces mécaniques et impact des paramètres de coupe sur la géométrie de ces pièces à l'Université Saad Dahlab de Blida 1. [13] .[14]

On déduit de son travail que l'apparition des vibrations pendant l'usinage par enlèvement de matière est l'un des problèmes importants dans l'industrie, du fait qu'il a des effets néfastes sur l'état de la surface de la pièce à usiner, sur la productivité et sur la rentabilité :

- Baisse de la durée de vie de l'outil,
- Usure prématurée de certains éléments de la broche comme les roulements et les paliers,
- Etc.,

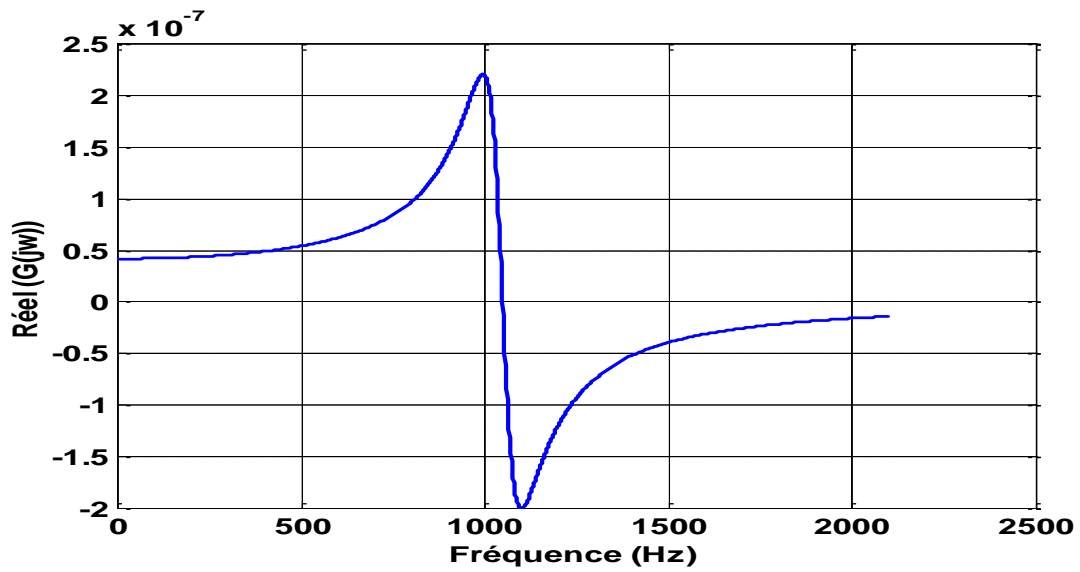
De même, le broutement de la machine-outil provoque un bruit. Ce dernier entraîne des dommages sur l'outil et sur la stabilité du système POM.

Lors de l'usinage, le rôle de la stabilité d'une machine-outil est important du fait que la possibilité d'accomplir l'enlèvement de matière dépend des domaines favorables :

- des conditions opératoires : vitesses de rotation de la pièce et de déplacement de l'outil, profondeur de passe,
- de puissance,
- de précision,
- d'état de surface pour la pièce usinée.

La théorie des lobes de stabilité est basée sur un modèle de coupe avec des vibrations régénératives. Elle permet en usinage de déterminer une profondeur pour une vitesse de rotation désignée. Le but est d'éviter l'instabilité. Celle-ci apparaît après quelques opérations d'usinage. Dans ces hypothèses, la pièce est considérée flexible et l'outil suffisamment rigide en utilisant le critère de Nyquist pour prédire la stabilité et étudier l'influence des paramètres de coupe sur l'apparition du broutement. Les résultats des simulations des lobes de stabilité sont représentées dans les figures suivantes :

a)



b)

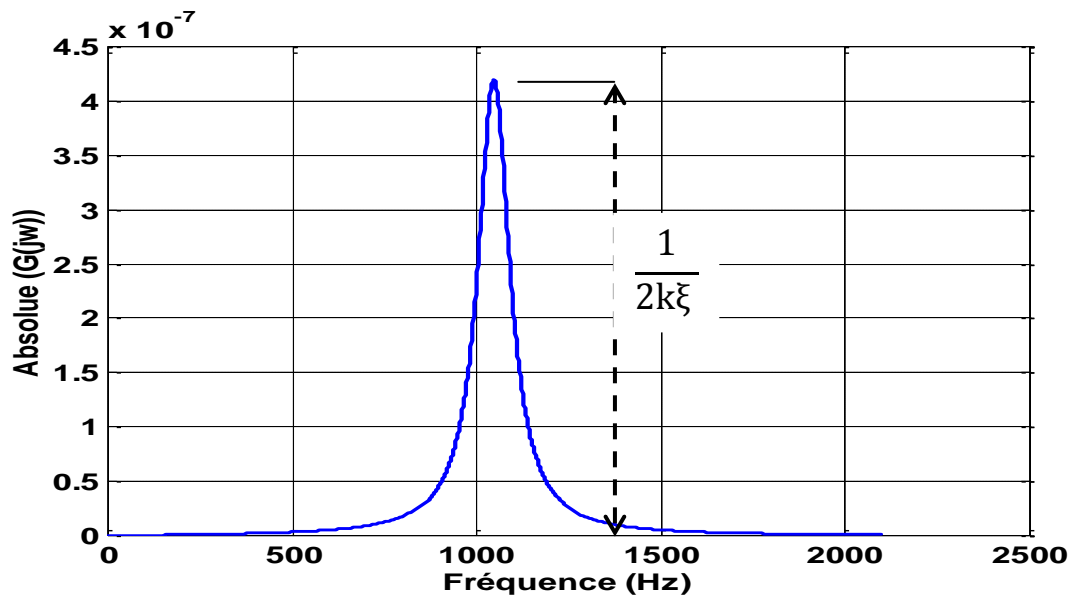


Figure III.7 : a)La partie réelle de la fonction de transfert pour un système vibrant à un seul degré de liberté.

b) magnitude

La figure III.7 présente la partie réelle de la fonction de réponse en fonction de la fréquence de l'outil de coupe.

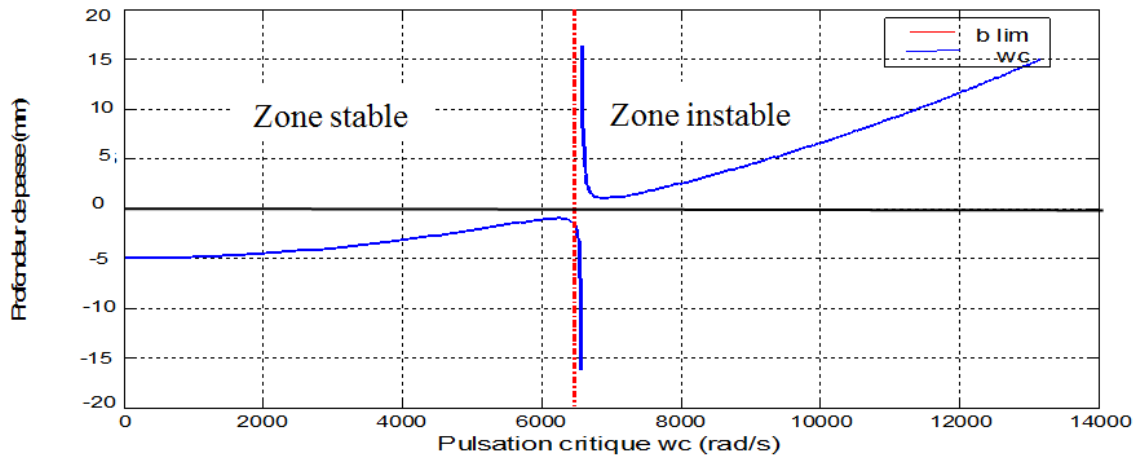


Figure III.8 : Evolution du processus d'usinage

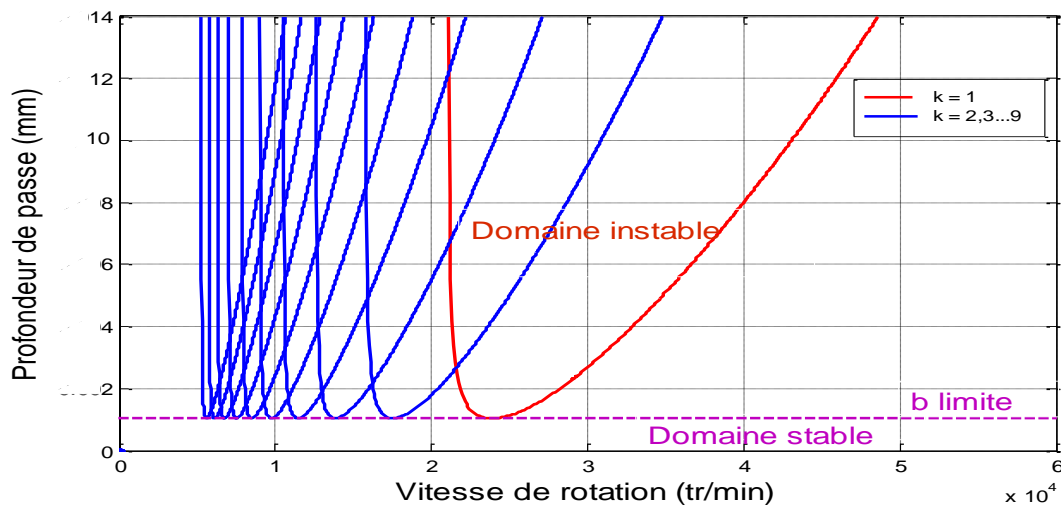


Figure III.9 : Tracé des lobes de stabilité

De la **figure III.9**, la largeur des lobes augmente en parallèle avec les vitesses de rotation et c'est l'une des principaux critères de la théorie des lobes de stabilité. Les courbes montrent l'évolution de l'influence des différents paramètres retenus à savoir la masse (m), la raideur dynamique (k) et l'amortissement (c) sur la stabilité du système Machine-outil/Outil de coupe/Pièce (POM). De là, le comportement vibratoire a été identifié de notre processus de coupe ainsi que le comportement dynamique du système Machine-outil/Outil de coupe/Pièce (POM).

Par ailleurs, il convient de considérer que sur les lobes de stabilités obtenues, la limite de stabilité comporte en réalité une enveloppe d'incertitude non négligeable. Cette imprécision provient essentiellement de l'approximation de la loi de coupe et dans une

moindre mesure, des incertitudes sur les caractéristiques dynamiques de la structure (fréquences propres, amortissements modaux) obtenues.

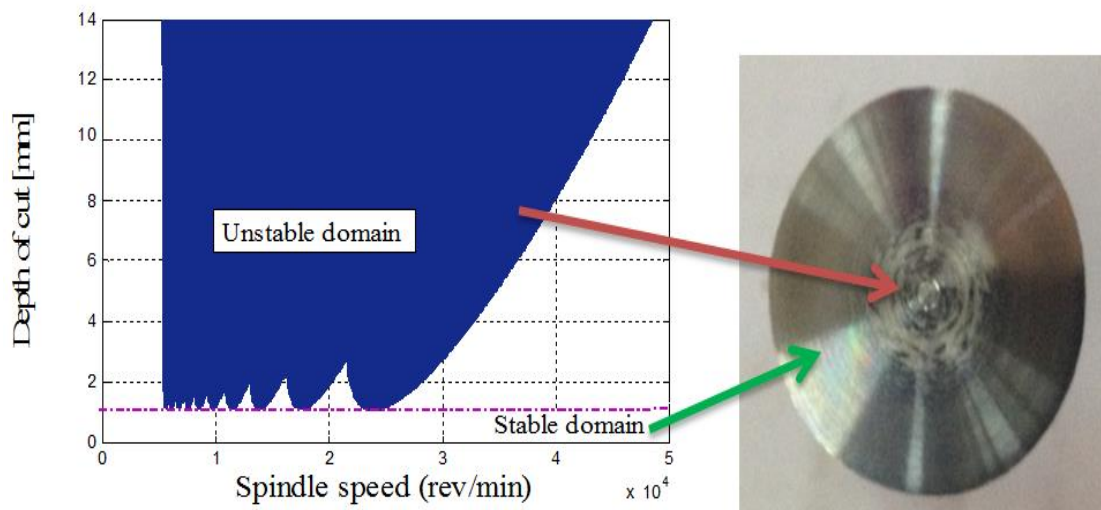


Figure III.10 : Tracé des lobes de stabilité

III.7/ Application des plan d'expériences :

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé celle des plans d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux. [15].

Dans les différentes recherches, les essais sont obligatoires. Or ces essais sont trop souvent conduits sans méthodologie et les résultats obtenus sont le plus souvent mal exploités.

La méthode des plans d'expériences permet une meilleure organisation des essais accompagnant des résultats expérimentaux et ces essais seront applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries.

Les plans d'expérience servent à optimiser l'organisation des essais afin d'obtenir le plus de renseignements possibles avec le minimum d'expériences. Elle permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats. [16].

III.7.1/ Définition :

Les plans d'expériences sont une méthode de calcul d'une fonction décrivant un phénomène à n variables indépendantes basé sur les statistiques.

Sir Ronald Fisher (1890-1962), l'un des fondateurs de la statistique inductive moderne, introduit la notion de plan d'expérience. Durant les années 20, son travail se fera dans une station

expérimentale agricole où il sera amené à réaliser un nombre important d'expériences. Son intérêt était de trouver une méthode réduisant le nombre d'expériences réalisées et augmentant la précision des expériences.

Cependant, c'est Genichi Taguchi, ingénieur et statisticien Japonais qui va démocratiser cette méthode afin que les techniciens puissent en bénéficier.

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais,
- Etude d'un grand nombre de facteurs,
- Détection des interactions entre facteurs,
- Modélisation des réponses étudiées,
- Précision optimale des résultats.

Cette méthode permettra une interprétation rapide et infaillible des résultats en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié, et donnera le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. On devra suivre alors des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de cette méthode est basée sur deux notions essentielles : la notion d'espace expérimental et la notion de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

✓ **Notion d'espace expérimental et terminologie :**

Ce paragraphe rappelle les principaux termes utilisés dans la méthode des plans d'expériences qui sont :

- Le facteur,
- La réponse,
- La surface de réponse.

✓ Le facteur :

Lors de l'étude, les variables à étudier sont appelées facteurs. Ces derniers varient généralement entre deux bornes :

- La borne inférieure,
- La borne supérieure.

Lors de l'application des plans d'expérience, le facteur varie entre le niveau bas et le niveau haut qui sont représentés respectivement par -1 et + 1. L'ensemble de toutes les valeurs prises par le facteur entre le niveau bas et le niveau haut est dénommé le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

La figure suivante représente le domaine de variation d'un seul facteur :

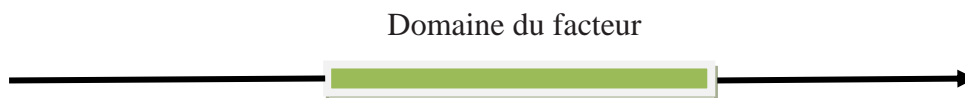


Figure III.11 : Domaine de variation d'un seul facteur

Avec :

-1 : niveau bas

+1 : niveau haut

Les facteurs étudiés peuvent être des variables continues que l'on ne peut pas ordonner ou des variables discontinues que l'on peut ordonner. On parlera alors de facteurs continus, de facteurs discrets et de facteurs ordonnables.

Un facteur est représenté par un axe orienté. Si le facteur est continu, cet axe est gradué selon une certaine échelle. Si le facteur est ordonnable, on indique l'ordre choisi sur l'axe.

S'il y a 2 facteurs, le second facteur est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur : son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. L'espace créé est appelé espace expérimental.

La figure suivante montre le domaine de variation de deux facteurs :

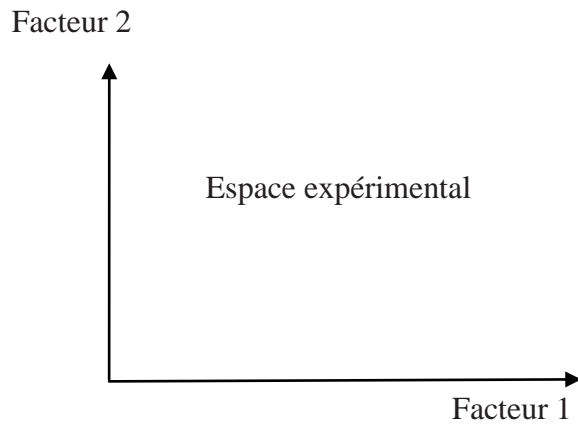


Figure III.12 : Domaine de variation de deux facteurs

Les niveaux des facteurs peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental.

Une expérience donnée est alors représentée dans ce système d'axes par un point : Ce point est appelé point expérimental ou point d'expérience.

Un plan d'expériences représente un ensemble de plusieurs points expérimentaux. Ces derniers sont illustrés dans la figure suivante :

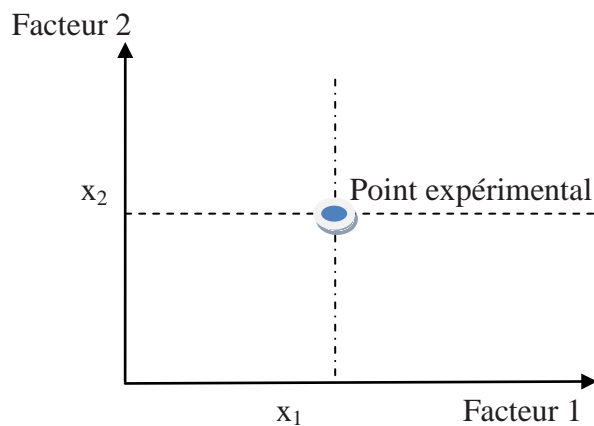


Figure III.13 : Points expérimentaux dans l'espace expérimental.

La figure suivante schématise plusieurs expériences bien définies représentées par des points répartis dans le domaine d'étude :

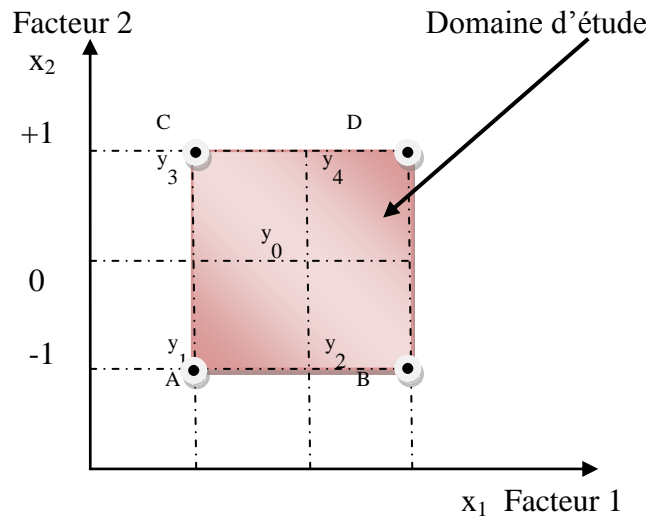


Figure III.14 : Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de plan d'expériences.

✓ La réponse :

Les grandeurs intéressent l'expérimentateur et mesurées à chaque expérience sont appelées réponses.

Le choix des réponses est un problème difficile qui ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir la ou les bonnes réponses.

En l'absence de toute indication sur la fonction liant la réponse aux facteurs, on se guide, à priori, par une loi d'évolution.

Cela définit le modèle mathématique à priori ou modèle postulé.

Quand on recherche le lien existant entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i , on se référera aux plans d'expériences si l'on étudie une fonction de type :

$$Y = f(x_i) \quad (\text{III.4})$$

On attribue un axe à une réponse et cet axe est orthogonal à l'espace expérimental.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent une surface appelée la surface de réponse.

La figure suivante représente une surface de réponse :

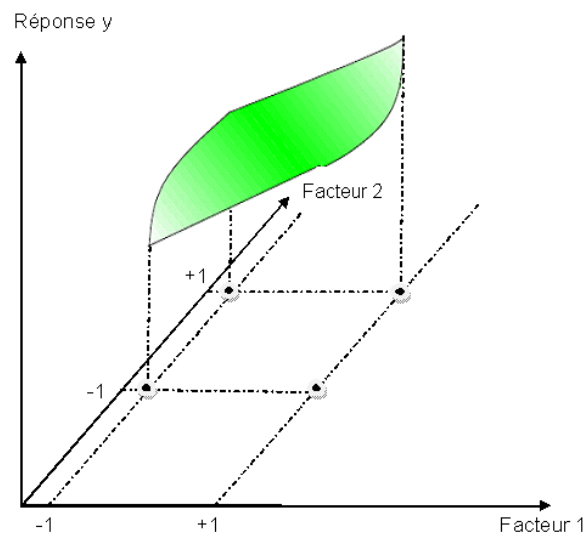


Figure III.15 : Représentation d'une surface de réponse

III.7.2/ Notion de modélisation mathématique et application :

Quand on veut connaître la dépendance d'une variable de sortie F d'un cas précis, plusieurs interrogations sont posées:

- Quels sont les facteurs les plus influents ?
- Existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ?
- Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
- Comment minimiser le nombre de points de mesure du processus pour obtenir le maximum d'informations ?
- Existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?

La méthode du plan d'expérience répond à ces questions et sera ainsi appliquée à notre cas.

Le principe consistera à planifier nos essais en utilisant des tables ayant la propriété d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. [17].

III.7.3/ Choix d'un modèle :

Les plans d'expériences dits factoriels utilisent tous le modèle mathématique suivant qui relie la réponse y aux facteurs $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$. Ce modèle théorique est postulé a priori. Il s'agit d'un modèle polynomial.

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_{i,j,k=1}^n a_{ijk} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_k + \dots \quad (\text{III.5})$$

Où $a_0, a_1 \dots$ sont les coefficients du polynôme.

Les termes produits de type par exemple $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ correspondent aux interactions.

On peut représenter le domaine d'étude comme une zone rectangulaire limitée par les bornes prises par deux facteurs, d'où s'il y a présence d'un second facteur, ce dernier est représenté par un autre axe gradué de la même façon que le premier, et orienté orthogonalement par rapport au premier facteur. On obtient donc un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental.

Cet espace est appelé domaine d'étude. On trouve également l'appellation espace de recherche, ce qui permet d'utiliser des variables quantitatives (ou réelles) aussi bien que des variables qualitatives. Donc une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes, ce qui permet de dire qu'un plan d'expériences est un ensemble de points expérimentaux.

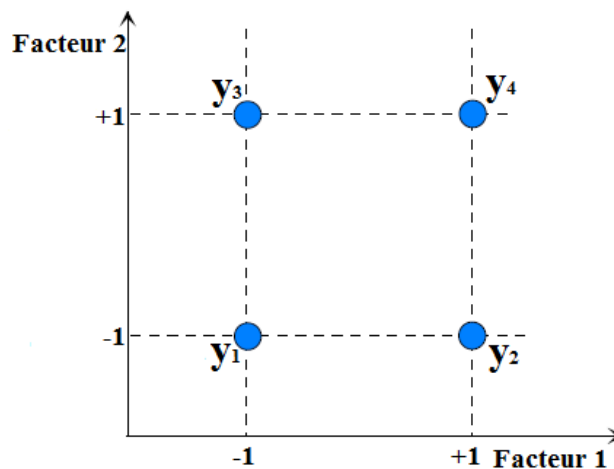


Figure III.16 : Représentation du domaine d'étude de deux facteurs

En présence de plusieurs facteurs, le domaine d'étude est obligatoirement de forme rectangulaire, ses dimensions étant imposées par les plages de variation des facteurs. Ainsi tout point de cet espace est défini par ses coordonnées, et également une réponse Y_i .

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective (réponse), tout en fournissant au moins un essai pour chaque combinaison de facteur. Il est donc naturel d'analyser dans les détails cette composante primordiale, tout simplement par ce qu'elle permet une interprétation rapide.

Dans cette partie, on applique la méthode des plans d'expériences pour étudier le comportement des paramètres de coupe.

Dans notre étude, on prend en considération quatre facteurs qui sont, la vitesse de rotation, l'avance par tour, la profondeur de passe et le rayon de bec.

L'ensemble des paramètres d'usinage dont la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de coupe, la largeur de coupe et les orientations de l'outil seront variées simultanément lors des essais. La méthode des plans d'expérience est choisie de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats. Une fois le modèle (polynôme) élaboré par modélisation, diverses options d'optimisation peuvent être envisagées, plusieurs applications standards de programmation linéaire et non linéaire le permettent. Les facteurs expérimentaux sont les variables indépendantes, ce sont elles qui sont reliées à la réponse par une équation de prédiction. Les facteurs maîtrisés sont à leur tour divisés en deux catégories, ceux modifiés durant les expériences et ceux maintenus constants.

Les facteurs maintenus constants constituent notre système technologique et doivent être mentionnés, car les résultats trouvés seront conditionnels aux réglages de ces facteurs.

Nous voulons tester l'influence de six facteurs (intrants) sur un certain processus dont nous avons des réponses numériques (extrants). Le diagramme expérimental ci-dessous représente cette situation.

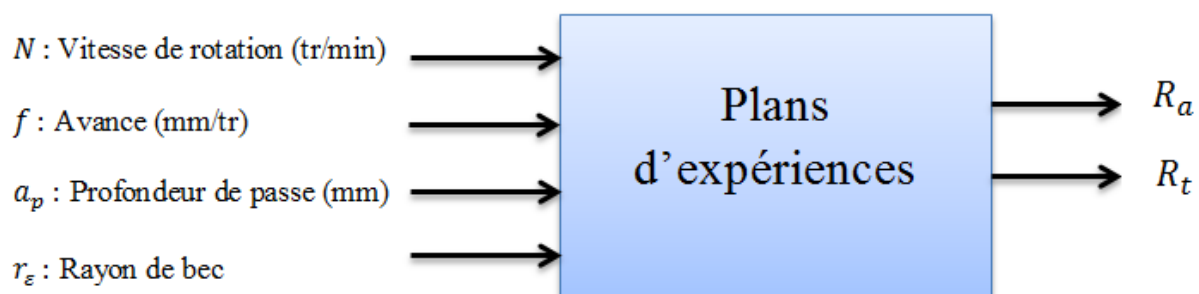


Figure III.17 : Diagramme expérimental

Pour raffiner le processus présenté dans cette figure, nous pouvons résumer les étapes proposées pour le déroulement des expériences comme suit:

- Choix des réponses,
- Choix des facteurs et de leurs niveaux,
- Choix d'un plan d'expériences,
- Exécution des expériences,
- Analyse des résultats,
- Interprétation et recommandations.

Le principe consiste à planifier nos essais en utilisant des tables ayant la propriété d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester.

La modélisation par plans d'expériences, pour le cas de l'écart arithmétique et totale de la rugosité, se fait par modèle mathématique sous forme polynomiale suivante :

$$\begin{aligned}
 y = & a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 \\
 & + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + a_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{124} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \\
 & + a_{134} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{234} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{1234} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4
 \end{aligned}
 \tag{III.6}$$

Avec :

x_1 = rayon du bec (mm)

x_2 = Vitesse de rotation (tr/min)

x_3 = Avance (mm/tr)

x_4 = Profondeur de passe (mm)

Ceux sont là les paramètres qui agissent sur la réponse 'y' c'est-à-dire sur l'écart de la rugosité arithmétique Ra et sur l'écart total Rt.

On obtient :

| Facteur | Unité | Maximum | Minimum |
|---------------------|--------|---------|---------|
| Vitesse de rotation | tr/min | 530 | 420 |
| Avance par tour | mm/tr | 0,25 | 0,04 |
| Profondeur de passe | mm | 0.25 | 0,40 |
| Rayon de bec | mm | 0,40 | 1.20 |

Tableau III.2 : Les 4 facteurs, leurs unités, leurs maximums et leurs minimums

Ce tableau peut être interprété dans la figure suivante :

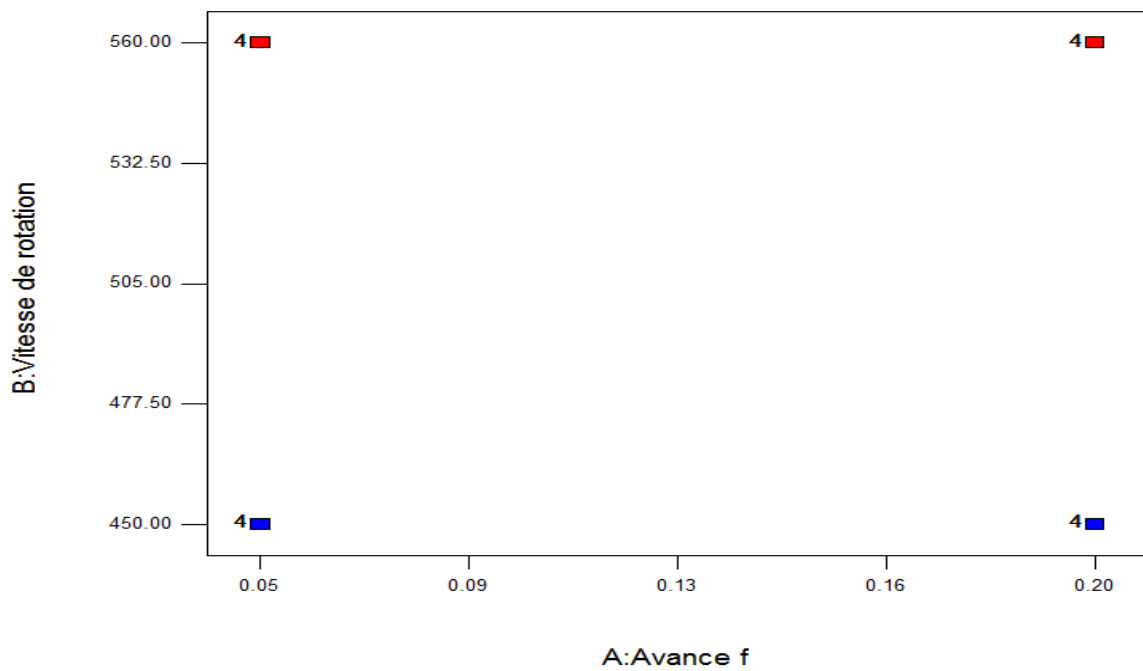


Figure III.18 : Domaine d'étude de la vitesse de rotation et de l'avance

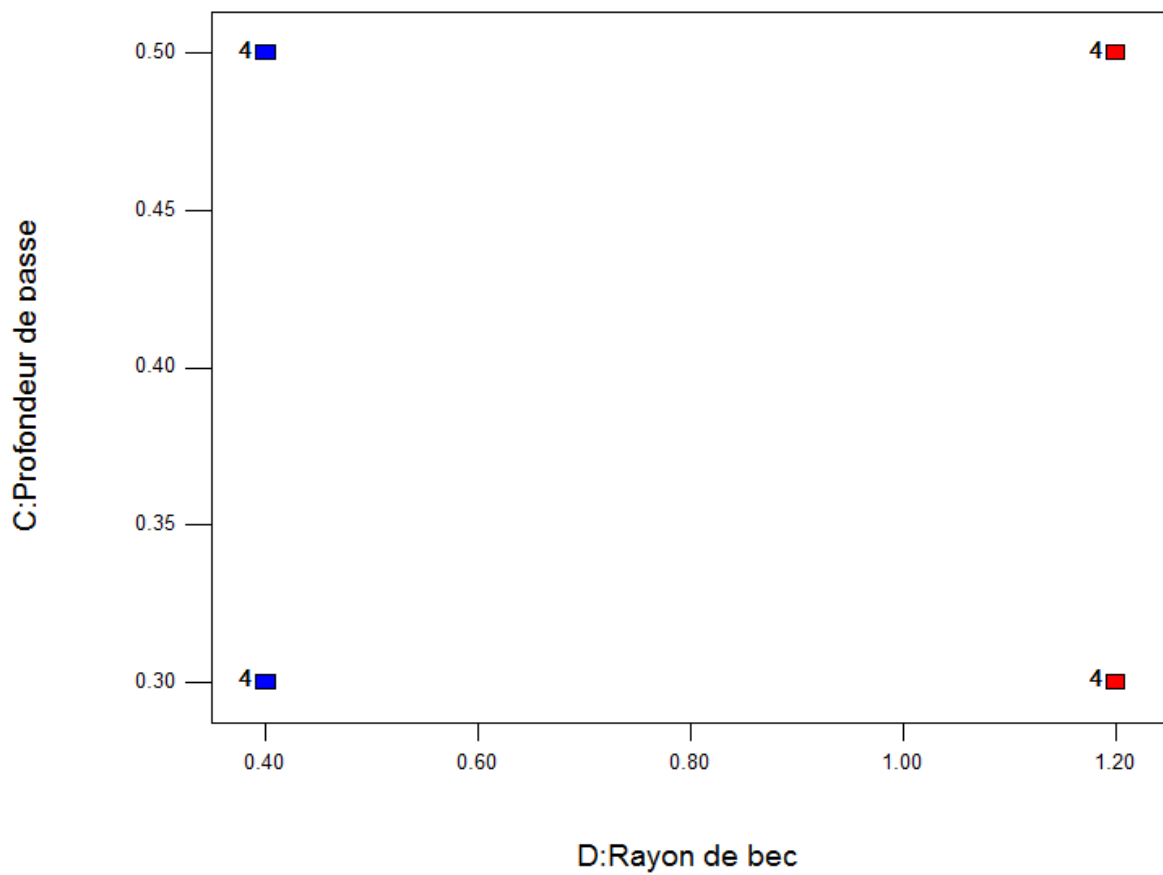


Figure III.19 : Domaine d'étude de la profondeur de passe et de rayon de bec

Dans cette figure, nous constatons l'existence des niveaux bas et des niveaux hauts.

Les valeurs doivent être comprises entre (-1) et (+1) :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left(\frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

x_i = Valeur codifiée à trouver,

u_i = Valeur réelle du paramètre,

u_{\max} = Valeur maximale du paramètre,

u_{\min} = Valeur minimale du paramètre.

Ainsi, y peut être représenté de la manière suivante :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + a_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{124} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + a_{134} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{234} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{1234} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \text{ (Pour un plan factoriel)}$$

a_0 = La valeur moyenne de l'effet des quatre facteurs

a_1 = A l'effet de l'avance par tour

a_2 = B l'effet de la vitesse de rotation

a_3 = C l'effet de la profondeur de passe

a_4 = D l'effet de rayon de bec

a_{12} = AB l'interaction entre a_1 et a_2

a_{13} = AC l'interaction entre a_1 et a_3

a_{14} = AD l'interaction entre a_1 et a_4

a_{23} = BC l'interaction entre a_2 et a_3

a_{34} = CD l'interaction entre a_3 et a_4

a_{123} = ABC l'interaction entre a_1, a_2 et a_3

a_{124} = ABD l'interaction entre a_1, a_2 et a_4

a_{134} = ACD l'interaction entre a_1, a_3 et a_4

a_{234} = BCD l'interaction entre a_2, a_3 et a_4

a_{1234} =ABCD l'interaction entre les quatre facteurs

Notre équation devient :

$$Ra = 1.13 + x_1 0.57x_4 - 0.50x_1 \cdot x_4 \quad (III.8)$$

$$Rt = 3.44 + 0.065 \cdot x_1 + 0.19 \cdot x_2 - 0.19 \cdot x_3 + 1.51x_4 + 0.19 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.19 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.31x_1 \cdot x_4 - 0.19 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.19x_2 \cdot x_4 + 0.19 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0.19 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.19 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.19 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.19 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.19 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (III.9)$$

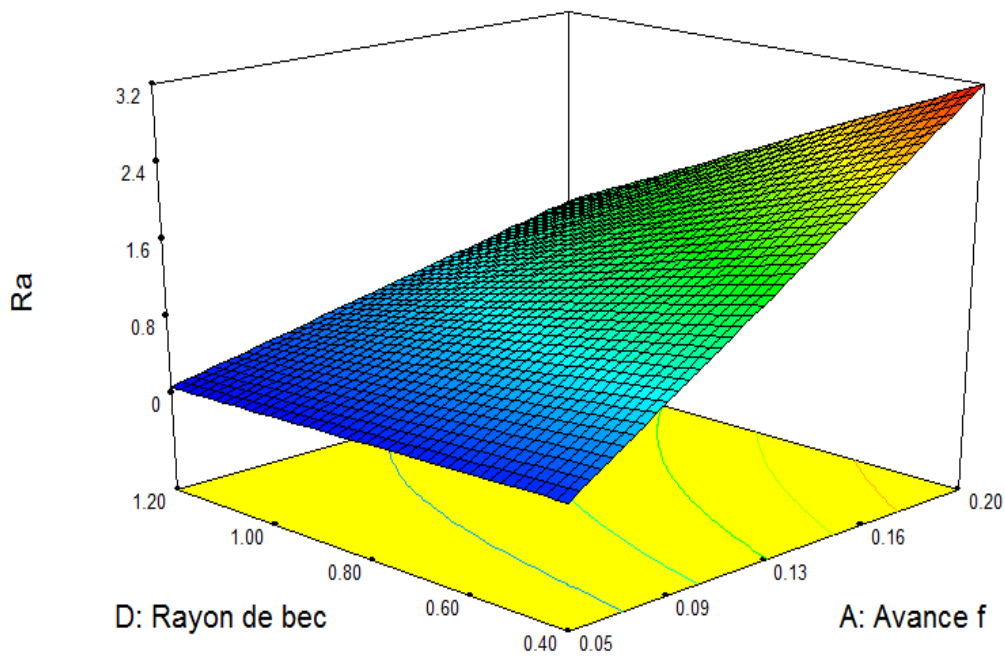


Figure III.20: surface de réponse pour R_a

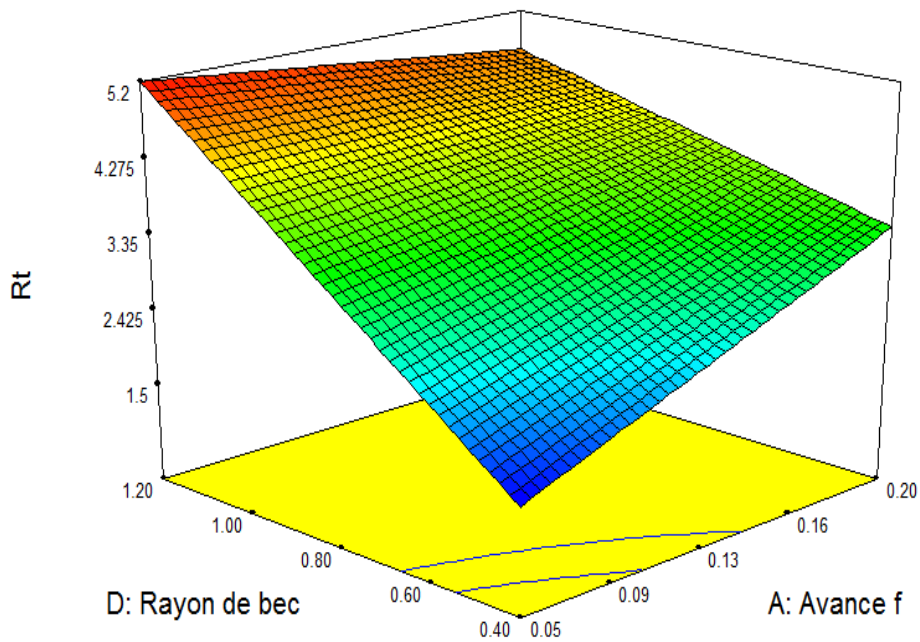


Figure III.21 : surface de réponse pour R_t

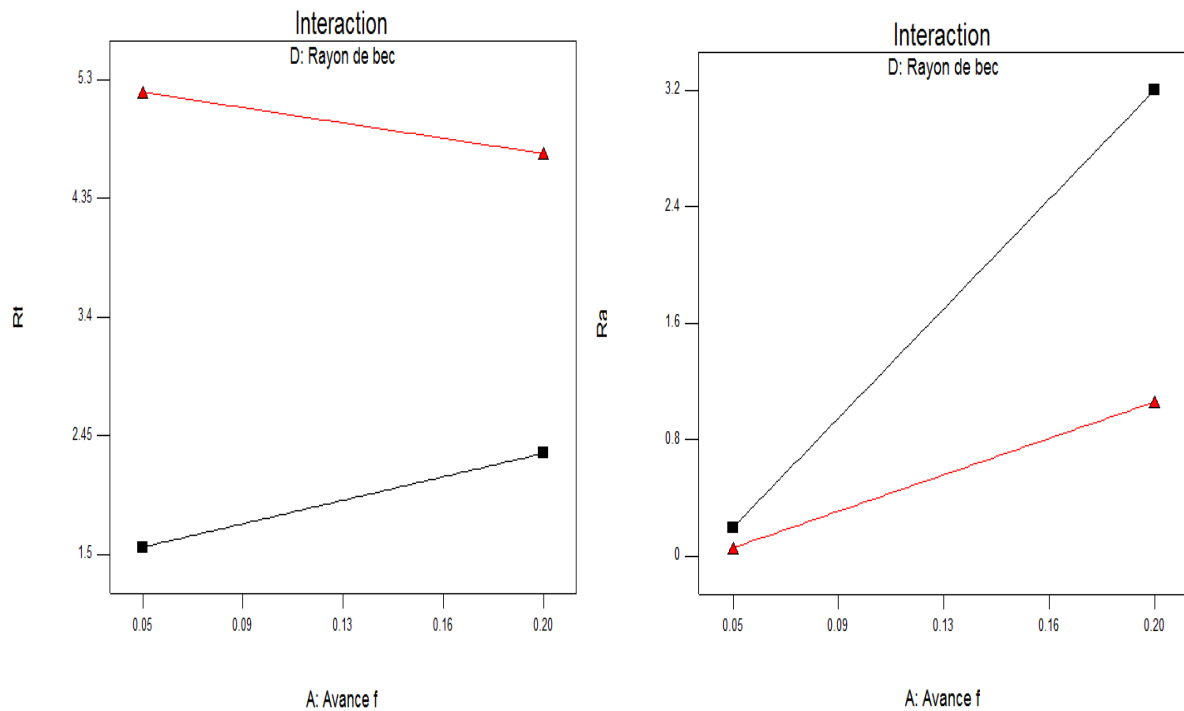


Figure III.22 : Interaction de l'avance et de rayon de bec en fonction de Ra et Rt

Les figures illustrent les effets des interactions existantes qui influent respectivement sur la rugosité arithmétique Ra et la rugosité totale Rt.

Les surfaces de réponses permettent d'apprécier l'influence de l'avance et de rayon de bec sur l'état de surface.

On conclut que :

- L'augmentation de chacun des facteurs influant la rugosité, vitesse de rotation, l'avance et le rayon de bec fait augmenter la rugosité,
- Les faibles avances permettent de diminuer la rugosité,
- Les valeurs de la rugosité totale Rt et Ra sont obtenues par la méthode des plans d'expériences. Le même principe est pris en considération à savoir trois différentes valeurs du rayon du bec de l'outil coupant et sept différentes valeurs de l'avance.