

Remerciement

Premièrement je remercie mon DIEU tout puissant pour toutes les bénédictions.

Nous tenons à remercier Pr. Temmar.M notre Promoteur pour son grand soutien et ses conseils Considérables.

Et aussi je Remercie ma promotrice : M^{lle} Melzi.N Pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant d'encadrer ce travail ainsi pour sa disponibilité.

Je tiens à faire un remercie pour une personne qu'elle est la plus chère au monde ma mère

Je remercie aussi mon père

Et mon adorables sœur « Nassima »

mon cher frère : Amine ET SA Femme : Roumaïssa

Et ma future femme « Manel »

A mes très chers grands -mères

A mes tantes et mes oncles

A toute la famille « NADJI et GUEBLI »

je remercie mes chères amies pour les encouragements et leur soutien et ses messages de relances motivants .

NADJI AYOUB

Sommaire

Remerciement.	
Résumé.	
Listes des Figures.	
Listes des Tableaux.	
Introduction général.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur L'usinage et Le Procédé de Tournage.	
I.1 Evolution du matériel d'usinage.....	3
I.1.1 Grandes étapes du progrès technique dans le domaine D'usinage.....	3
I.1.2 Les différents types d'opérations.....	4
a. Tournage extérieur	4
b. Tournage intérieur	4
c. Tournage des pièces métalliques	5
I.2 Différents procédés.....	6
I.3 Etude de l'ordre logique d'usinage.....	7
a. Le dessin de définition	7
b. Les diverses raisons technologiques et économiques.....	7
c. Les machines et outillages disponibles.....	7
d. Les déformations de la pièce	7
e. Les finitions spéciales	8
I.3.1 Etude de fabrication	8
I.3.2 Préparation d'une production.....	9
I.4 Temps d'usinage	10
I.5 Procèdes de tournage.....	12
I.5.1 Principe du tournage	12
I.5.2 Le tour	13
I.5.3 Les différents montages	14

I.5.4 L'outil.....	15
I.5.5 Exemple de choix d'un outil de coupe à plaquette	
Rapportée	17
I.6 Formation du copeau	19

CHAPITRE II : Coupe Des Métaux.

II.1 Introduction.....	22
II.1.1 Importance de l'outil de coupe dans la construction des	
Machines	22
II.1.2 Principe de la coupe des métaux	23
II.2 Généralités sur la formation du copeau	26
II.2.1 Formes des copeaux	27
II.2.2 Outil de coupe	28
II.2.3 Principes physiques de la coupe des métaux	30
II.2.4 Copeaux	30
II.2.5 Lois de coupe des métaux	30
II.3 La géométrie de l'arête	31
II.4 Matériaux des outils de coupe	32
II.5 Les paramètres de coupe	34
II.5.1 Vitesse de coupe	35
II.5.2 Vitesse d'avance et avance par tour	36
II.5.3 Vitesse d'avance	37
II.5.4 Les types d'avance	37
II.5.5 Profondeur de passe	37

CHAPITRE III : Etat De Surface.

III.1 Introduction	39
III.2 Rôle et fonction de surface	39
III.2.1 Différents types de surface	40
III.3 La rugosité	40
III.3.1 Principaux paramètres de la rugosité	41
III.4 Système pièce / outil de coupe / machine outil (P.O.M).....	42
III.4.1 Description du système P.O.M	42
III.4.1.1 Eléments indépendants de l'opération d'usinage	43
III.4.1.2 Eléments dépendants de l'opération d'usinage.....	44
III.5 Sources de vibrations du système P.O.M	44
III.6 Définition des forces de coupe	45
III.7 Vibrations en usinage	45
III.8 Types de vibrations	46
III.8.1 Vibrations forcées	46
III.8.2 Vibrations auto-entretenues	46

CHAPITRE IV : Application de La Méthode des Plans

D'expériences

IV.1 Introduction	49
IV.2 Définition des plans d'expériences	50
IV.2.1 Principaux avantages des plans d'expériences	51
IV.3 Eléments de méthodologie et de terminologie	51
IV.3.1 Notion d'espace expérimental	51
IV.3.2 Notion de surface de réponse	54
IV.3.3 Notion de modélisation mathématique	54
IV.4 Présentation du problème	55
IV.5 Mesure de la rugosité	57

IV.6 Interprétation des résultats	63
IV.7 Régime de coupe	65
IV.8 Effet des paramètres d'usinage sur la surface de réponse	66
IV.9 Interprétation des résultats	68
IV.10 Conclusion	69
Conclusion Générale	70

Chapitre 1

Figure I.1 : Tournage extérieure.....	4
Figure I.2 : Tournage intérieur.....	5
Figure I.3 : Les différents procédés	6
Figure I.4 : Procédé de tournage.....	12
Figure I.5 : Constitution d'un tour parallèle.....	13
Figure I.6: Montage en lunette.....	15
Figure I.7 : Angles de coupe.....	16
Figure I.8 : Influence du rayon du bec de l'outil sur la surface à usinée.....	17
Figure I.9 : Formes variées de plaquettes.....	18
Figure I.10 : Différentes porte-plaquettes pour une même plaquette.....	19
Figure I.11 : Copeau continu	20
Figure I.12 : Copeau cisailé	20
Figure I.13 : Copeau discontinu.....	20

Chapitre 2

Figure II.1 : Usinage par enlèvement de matières.....	23
Figure II.2 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage.....	24
Figure II.3 : Critères permettant de définir les paramètres de coupe.....	25
Figure II.4 : Surfaces de la pièce.....	26
Figure II.5 : Phénomènes relatifs à la coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique (arête/matière.....	27
Figure II.6 : Eléments de l'outil.....	28
Figure II.7 : Angles du taillant (outil en travail).....	30
Figure II.8 : Géométrie de l'arête de coupe.....	31
Figure II.9 : Gamme des angles d'orientation d'arête.....	32
Figure II.10 : Dimensions des angles de coupe dans le tournage.....	34
Figure II.11 : Vitesse de coupe.....	35
Figure II.12 : Vitesse de coupe, diamètre et vitesse de rotation.....	35
Figure II.13 : Vitesse d'avance.....	36
Figure II.14 : Avance f dans le cas de tournage.....	36
Figure II.15 : Types d'avance.....	37

Chapitre 3

Figure Fehler! Kein Text mit angegebener Formatvorlage im Dokument.II.1: Profil anamorphosé.....	39
Figure III.2 : La rugosité.....	40
Figure III.3: Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface.....	41.
Figure Fehler! Kein Text mit angegebener Formatvorlage im Dokument.II.4:Causes principales des vibrations en usinage.....	45
Figure Fehler! Kein Text mit angegebener Formatvorlage im Dokument.II.5: Détail d'une surface usinée.....	47

Chapitre 4

Figure IV.1:Mise en œuvre des plans d'expériences.....	49
Figure IV.2:Schématisation du système.....	50
Figure IV.3 : Présentation du domaine de variation d'un seul facteur.....	51
Figure IV.4: Schéma d'un espace expérimental.....	52
Figure IV.5: Positionnement d'un point expérimental.....	52
FigureIV.6 : Exemple de disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude.....	53
Figure IV.7 : Représentation d'une surface de réponse.	54
Figure IV.8 : Tour utilisé.....	55
Figure IV.9 : Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai.....	56
Figure IV.10:RugosimètreTR100 Surface Roughness Tester.....	57
Figure IV.11 : Etas de surface des pièces usinées (sans vibration.....	58
Figure IV.12 : Influence des paramètres de coupe sur la rugosité.....	59
FigureIV.13: Domaine d'étude des différents paramètres de coupe	59
Figure IV.14: Interaction de l'avance et de la vitesse de coupe en fonction de la rugosité(Ra)	60
Figure IV.15 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et de la vitesse de coupe « Vc ».....	61
Figure IV.16 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et de la profondeur de passe « a _p ».....	62
Figure IV.17 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de la profondeur de passe « a _p »et de la vitesse de coupe « Vc ».....	62

Figure IV.18 : Probabilité normale des résiduelles.....	63
Figure IV.19 : Influence des paramètres de coupe sur la rugosité (avec vibration).....	64
Figure IV.20 : Etats de surface des pièces usinées (avec vibration).....	65
Figure IV.21 : Domaine d'étude des différents paramètres de	66
Figure IV.22: Interaction de l'avance et de la vitesse de coupe en fonction de la rugosité Ra	66
Figure IV.23 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de rayon de bec "re" et de la vitesse de coupe « Vc ».....	67
Figure IV.24: Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et de la vitesse de coupe « Vc ».....	67
Figure IV.25: Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de la profondeur de passe "ap" et de la vitesse de coupe « Vc ».....	68

Liste des tableaux

Tableau I.1 : symbole et désignation des formes du bac d'un outil de tournage.....	17
Tableau IV.1 : les 4 factures , leurs unités , leurs maximums et leurs minimums	56
Tableau IV.2 : les valeurs de Ra correspondantes aux régimes	58
Tableau IV.3 : les valeurs de Ra correspondantes aux régimes.....	64

_ Notre travail a porté sur l'Application de la méthode des plans d'expériences pour optimiser les conditions de coupe : cas de la rugosité. En effet, ce travail s'est présenté sous quatre chapitres principaux dans lesquelles les différentes étapes d'études ainsi que les résultats et leurs interprétations ont été exposées.

_ Le système pièce-outil-machine présente plusieurs problèmes qui doivent être optimisés afin d'améliorer la qualité des pièces usinées. Concernant notre cas (la Rugosité), on a procédé à la mesure de la rugosité de nos échantillons étudiés (le même matériau) dans les deux cas (avec et sans vibrations), dans un deuxième temps, on a fait varier les facteurs de coupes à savoir, la vitesse de coupe et la profondeur de passe ainsi que le rayons de bec ; pour chaque cas on a pris les min et le max de ces derniers.

_ Les résultats de tous ces essais ont été présentés dans le dernier chapitre ainsi que leurs interprétations.

Enfin, on a conclu ce mémoire par une conclusion générale qui englobe le fruit de nos résultats.

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. L'apparition de vibrations pendant le fonctionnement de la machine-outil ne peut être évitée car ces vibrations représentent généralement des déplacements périodiques du système élastique autour de sa position d'équilibre.

Notre travail consiste à étudier L'Application De La Méthode d'expériences pour optimiser les conditions de coupe : Cas de la rugosité.

Notre travail se divise en quatre chapitres :

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

Le chapitre II sera consacré aux paramètres de coupe et à l'opération de dressage lors du procédé de tournage.

Dans le chapitre III, une recherche bibliographique introduira les vibrations en usinage car les paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage influent d'une manière importante sur l'état de surface.

Dans le chapitre IV, et ayant pris connaissance au travers des chapitres précédents des différents phénomènes liés au procédé de tournage, nous nous intéresserons à appliquer la méthode des plans d'expériences afin d'estimer et optimiser les conditions de coupe en usinage.

.

.



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 électromécaniques, hydromécaniques, puis électroniques nous amènent dans la période actuelle.

L'intervention de l'opérateur se réduit à un rôle de surveillance dans le cas de certaines machines actuelles capables de mesurer la qualité des pièces produites et s'autoréguler.

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]

I.1.2/ LES DIFFERENTS TYPES D'OPERATIONS :

a/Tournage extérieur (Fig I.1)

- Tournage longitudinal (chariotage, axes), réalisation d'un diamètre .
- tournage transversal (dressage, axes),réalisation d'une face, d'un épaulement.
- Tournage par profilage ou contournage,Usinage externe sur tourréalisé par copiage ou utilisation d'unecommande numérique .
- tournage de gorges, dégagements.
- filetage, réalisation d'un pas de vis.
- tronçonnage

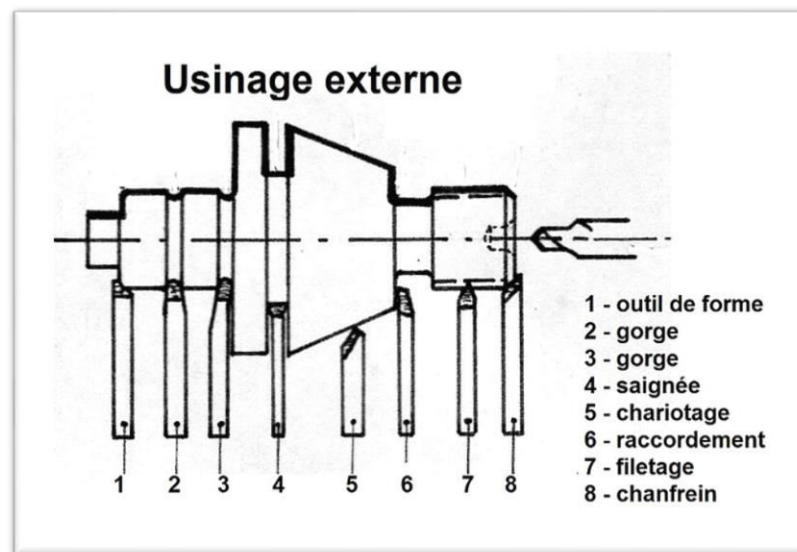


Figure I-1 : Tournage extérieure

b/Tournage intérieur :

- Alésage.
- dressage.
- tournage intérieur par contournage .
- tournage de dégagement, gorges.
- taraudage, réalisation d'un filetageintérieur.
- cambrage.

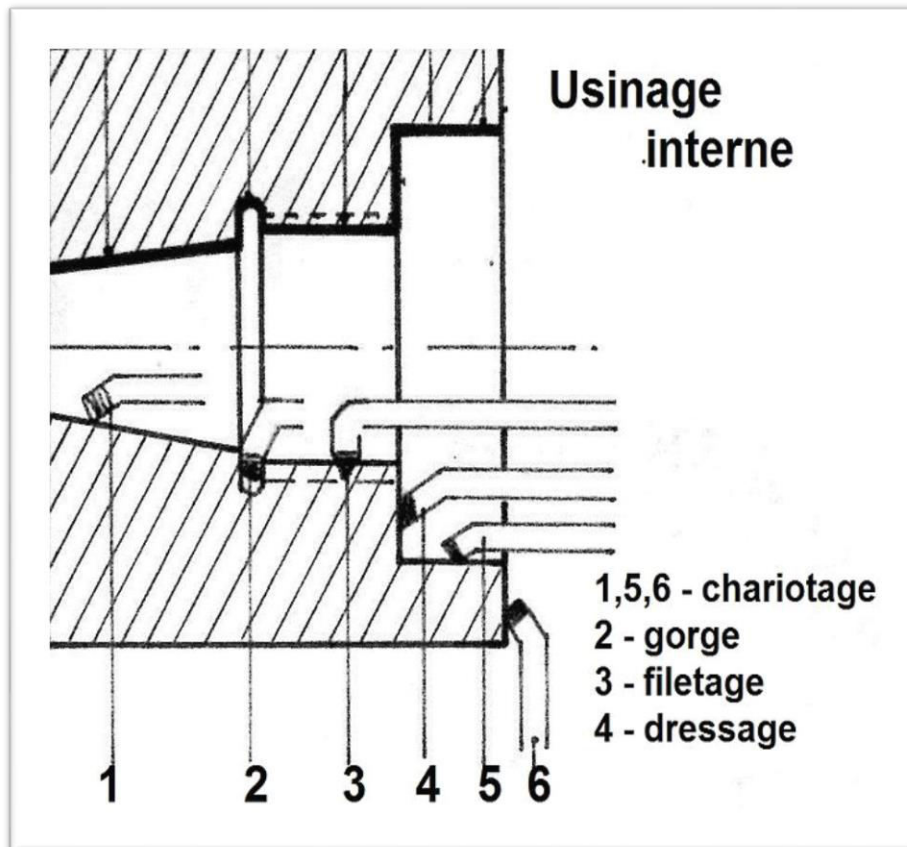


Figure I-2 : Tournage intérieur

c/Tournage des pièces métalliques :

Le chariotage d'une pièce métallique brute en tournage conventionnel se fait typiquement en cinq opérations:

1. Écroûtage du brut : on enlève la couche extérieure, qui a un mauvais état de surface et contient de nombreux défauts

(Calamine, corrosion, fissures, inclusions, écrouissage important, ...) ; il s'agit d'une passe d'environ 0.5 à 1 mm.

2. Contrôle du diamètre obtenu (au pied à coulisse voire au micromètre), ce qui permet de déterminer combien il faut enlever de matière pour arriver à la cote visée.

3. Passes d'ébauche d'une profondeur de plusieurs mm, pour enlever la matière.

4. Contrôle du diamètre avant finition.

5. Passe de finition, d'une profondeur inférieure à 0.5 mm mais supérieure au copeau minimum, afin d'avoir une bonne tolérance dimensionnelle et un bon état de surface.[2]

I.2/DIFFERENTS PROCEDES :

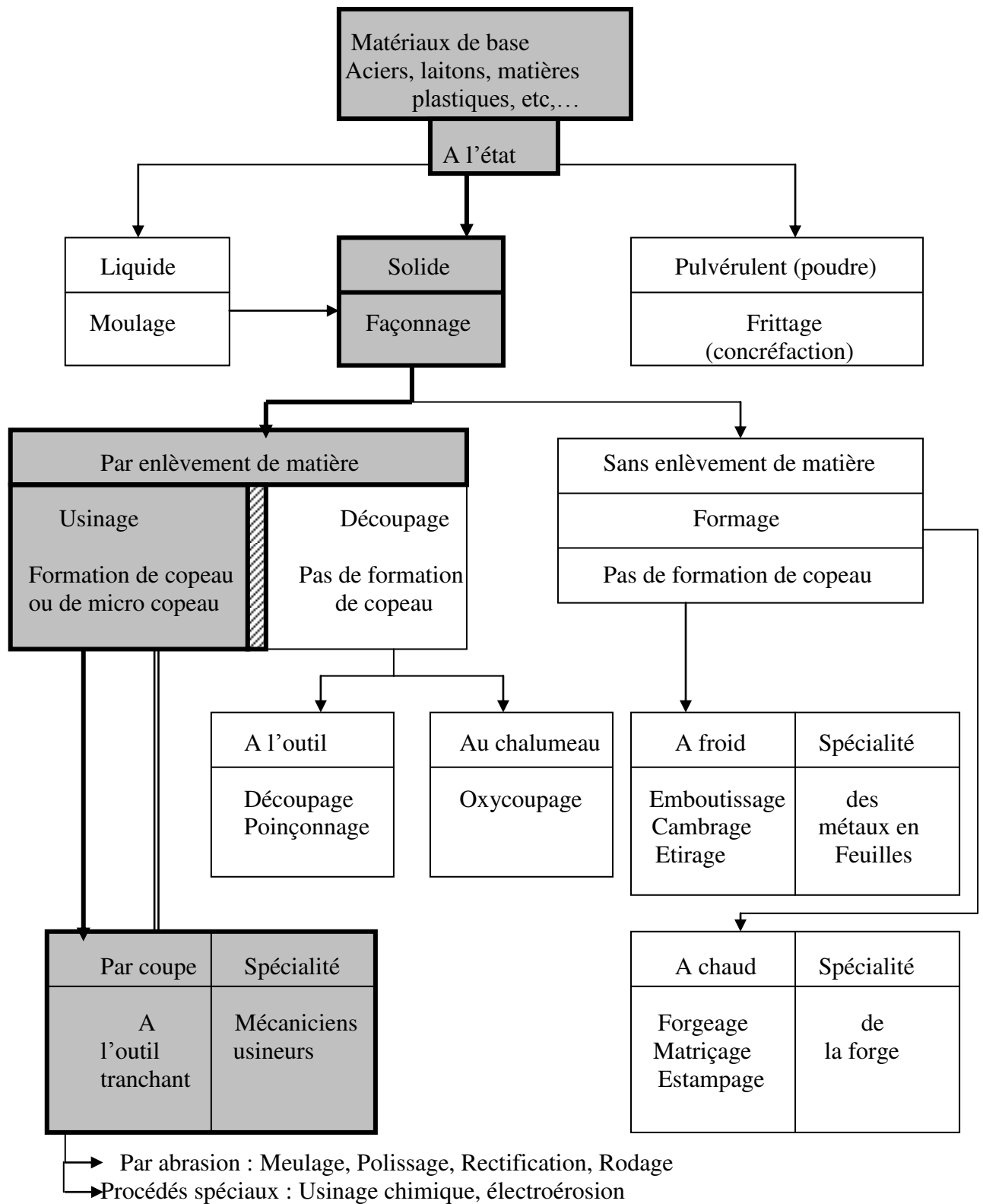


Figure I.3 : Les différents procédés

I.3/ ETUDE DE L'ORDRE LOGIQUE D'USINAGE :

Ce problème est important car une suite d'usinage mal choisie peut conduire à de graves inconvénients tels que :

- Impossibilités d'usiner certaines pièces,
- Difficultés diverses empêchant le respect du contrat du bureau d'études, ou encore compliquant la gamme, d'ou rebuts et prix de revient augmentés.

Les facteurs influençant l'ordre d'usinage sont :

A/ Le dessin de définition

B/ Les diverses raisons technologiques et économiques,

C/ Les machines et outillages disponibles,

D/ Les déformations de la pièce,

E/ Les finitions spéciales.

A/ LE DESSIN DE DEFINITION :

Il précise des contraintes dimensionnelles et de position, lesquelles peuvent imposer :

- Soit l'association de surfaces dans la même opération, ou la même phase,
- Soit l'usinage d'une surface avant une plusieurs autres : on dit qu'une surface usinée plutôt qu'une surface brute,...

B/ LES DIVERSES RAISONS TECHNOLOGIQUES ET ECONOMIQUES :

Elles imposent assez souvent un ordre logique préférentiel : élimination de bavures, dégagements d'outils, réduction d'usure d'un outil quand il aborde une surface usinée plutôt qu'une surface brute,...

C/ LES MACHINES ET OUTILLAGES DISPONIBLES :

Ils permettent certaines associations de surfaces économiques, que d'autres ne permettent pas.

D/ LES DEFORMATIONS DE LA PIECE :

Elles se produisent souvent, pour diverses causes :

- Actions de coupe et de serrage,
- Echauffement lors de l'enlèvement de fortes épaisseurs de matière, ou pendant des traitements thermiques.

E/ LES FINITIONS SPECIALES :

Elles sont quelquefois nécessaires comme par exemple lors de la rectification, le rodage, et la super finition.

Il faut bien sur appliquer ces procédés lorsque les risques de déformations sont maîtrisés.

L'étude des antériorités est nécessaire pour établir la chronologie de l'usinage.

I.3.1/ ETUDE DE FABRICATION :

Une étude de fabrication a pour objet d'établir une suite logique des différentes étapes de réalisation d'une pièce.

Elle doit, compte tenu des moyens disponibles :

- Respecter la qualité imposée par les dessins de définition du produit,
- Rendre les coûts de fabrication minimaux.

On trouve dans cette étude de fabrication une phase et une opération.

Une phase est l'ensemble des opérations élémentaires effectuées en un même poste de travail pour (ou sur) une même unité de production.

Une opération est tout ensemble de travail, mettant en œuvre un seul des moyens dont est doté le poste de travail, qui a pour but de rapprocher le produit de son état final.

Les principaux éléments de base à posséder pour établir une étude de fabrication sont :

- Le dessin de définition du produit,
- Le nombre de pièces à fabriquer,
- La cadence demandée,
- La main d'œuvre disponible,
- La disposition des machines,
- Le standard des machines,
- Le standard des outillages,
- La charge des machines.

L'étude de phase est une étude détaillée qui consiste à définir avec précision les moyens techniques et économiques à mettre en œuvre en fonction des résultats à obtenir (gamme d'usinage ou carte technologique).

Le document comporte essentiellement :

- La désignation des sous phases,
- Les opérations et les éléments de travail successifs,
- La désignation des outillages et des montages employés,
- Les vérificateurs à utiliser,
- Les éléments de coupe et les éléments de passe,
- Le temps de fabrication,
- Les croquis de phase.

I.3.2/ PREPARATION D'UNE PRODUCTION :

Les services de préparation assurent les liaisons nécessaires entre les services de conception et les services de fabrication. Ils ont pour rôle essentiel d'établir un processus de fabrication en utilisant les moyens de l'entreprise.

Le processus de fabrication doit respecter notamment :

- La qualité prescrite pour les produits,
- Un prix de revient minimal,
- Le délai demandé,
- Les conditions de travail aussi bonnes que possible.

On cherche en fonction du délai demandé ou de cadence de production, à obtenir un coût minimal pour la fabrication. Les méthodes générales de fabrication sont fonction du nombre de pièces à réaliser c'est à dire pour un type de fabrication défini, on a une organisation, des machines et de l'outillage propre à cette opération.

Le préparateur doit avoir à sa disposition la liste des machines-outils disponibles dans l'atelier avec leurs capacités dimensionnelles, de précision et de production. La gamme d'usinage doit autant que possible être adaptée à ce parc de machines-outils existant. Dans le cas où les machines n'existent pas dans l'atelier, le bureau d'études peut envisager deux alternatives :

- Acquérir une ou de nouvelles machines
- Ou sous-traiter l'usinage en question à l'extérieur.

Les pièces mécaniques peuvent être appelées à être produites selon un seuil de rentabilité d'une machine-outil en :

- Production unitaire (pièce complexe, grosse pièce, pièce de rechange, pièce dégradée d'une machine ou d'un mécanisme, prototypes, montages spéciaux) ou quelques pièces (pièces complexes, grosse pièce, prototypes, montages spéciaux),
- Production de série comprenant :
 - Petite série : 5 à 200 pièces
 - Moyenne série : 200 à 1000 pièces
 - Grande série : 1000 à 5000 pièces
 - Très grande série : plus de 5000 pièces
- Production par lots : cadence ou programme (Par exemple : 50 pièces tous les deux mois)
- Production continue en chaîne : (production automobile)

I.4/ TEMPS D'USINAGE :

La détermination des temps de production est nécessaire pour : [3]

- établir des devis,
- déterminer des coûts de revient des produits
- définir un coût de revient objectif (VAD/H),
- effectuer des études de rentabilité d'équipements,
- rechercher les goulets de charge,
- ordonnancer une production,
- calculer un délai de fabrication,
- contrôler l'activité d'un poste, d'une unité de production...

Généralement, on trouve les temps suivants :

Temps manuels T_m : c'est la durée d'un travail physique ou mental dépendant uniquement de l'opérateur.

Exemple : en tournage, serrer manuellement ou desserrer, changer les mouvements d'avance, bloquer le chariot,....

Ils sont préalablement déterminés par le constructeur au début puis par le bureau d'études par la suite (machine neuve puis utilisée).

Temps technico-manuels T_{tm} : c'est la durée pendant laquelle le travail dépend des actions composantes et simultanées de l'opérateur et de la machine.

Temps masqué T_z : c'est la durée d'un travail ou machine accompli pendant l'exécution d'un travail prédominant.

Temps série T_s : c'est la durée des opérations nécessaires pour équiper le poste (mise en place du montage porte-pièce, montage et réglage des outils), ainsi que celles intervenant lors du démontage du poste. Ce temps n'intervient qu'une seule fois pour l'exécution de la série.

Temps technologique T_t : c'est la durée pendant laquelle le travail effectué dépend uniquement des moyens matériels (temps d'usinage).

$$T_t = L / a.n \dots \dots \dots (I.1)$$

Avec :

L = longueur à usiner (mm),

A = avance (mm/tr)

N = nombre de tours par minute

Les différentes méthodes de détermination des temps utilisés en production sont :

Les calculs : calculs exacts de cinématique pour les opérations d'usinage, calculs approchés pour les opérations de montage tels que loi de Wright et les calculs statistiques avec le test de Spearman et les corrélations multiples telle que la condensation pivotale de Ait Ken.

L'utilisation de tables de temps prédéterminés tels que : MTM et Work factor.

Le mesurage des temps par chronométrage simple et chrono analyse avec jugement d'allure.

Les Observations Instantanées (OI) de Tippett;

L'utilisation de logiciels spécialisés à l'image de CETIM TEMPS 3.

I.5/ 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.5.1/ PRINCIPE DU TOURNAGE :

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme (M_c) et est généralement tenue par le mandrin. [4]

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.

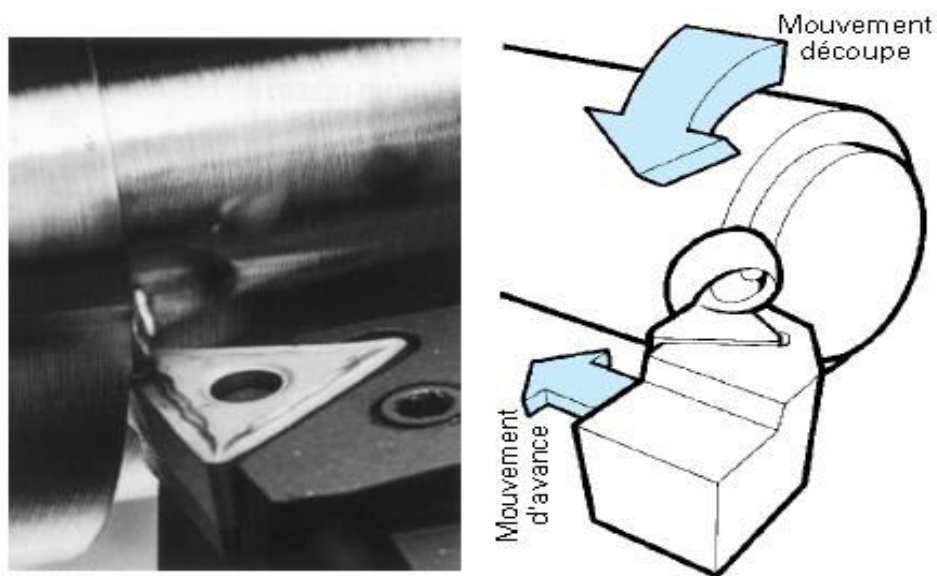


Figure I.4 : Procédé de tournage

I.5.2/ LE TOUR :

Le type de machine utilisé en tournage est le tour. [5]

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 mono broches 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.,...

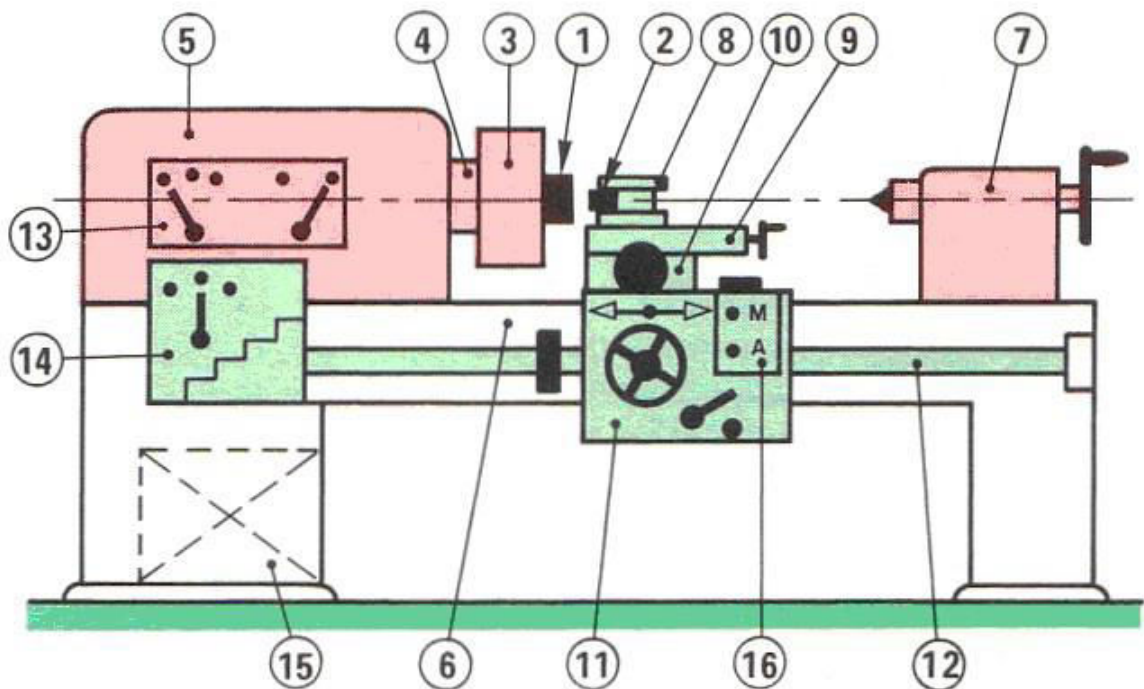


Figure I.5 : Constitution d'un tour parallèle

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 = Boîte des vitesses

14 = Boîte des avances

15 = Moteur

16 = Contacteur

I.5.3/ 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.6 illustre un des différents montages à savoir le montage en lunette.

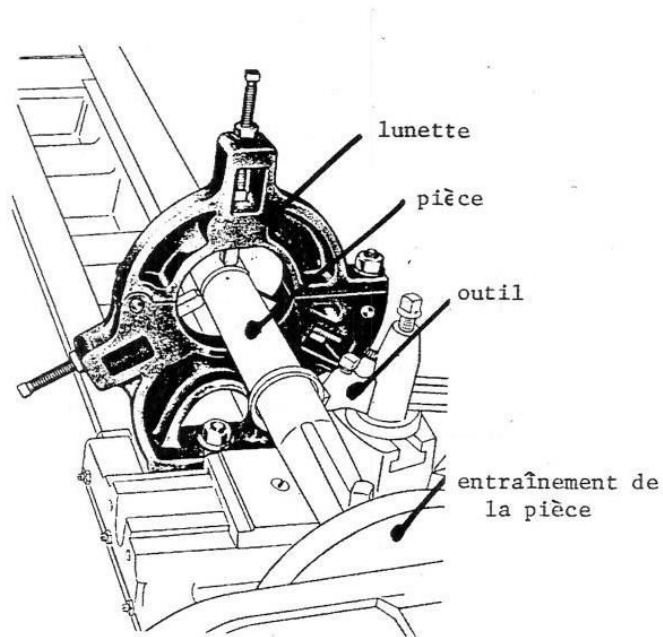


Figure I.6: Montage en lunette

I.5.4/ 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. [6].

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 .

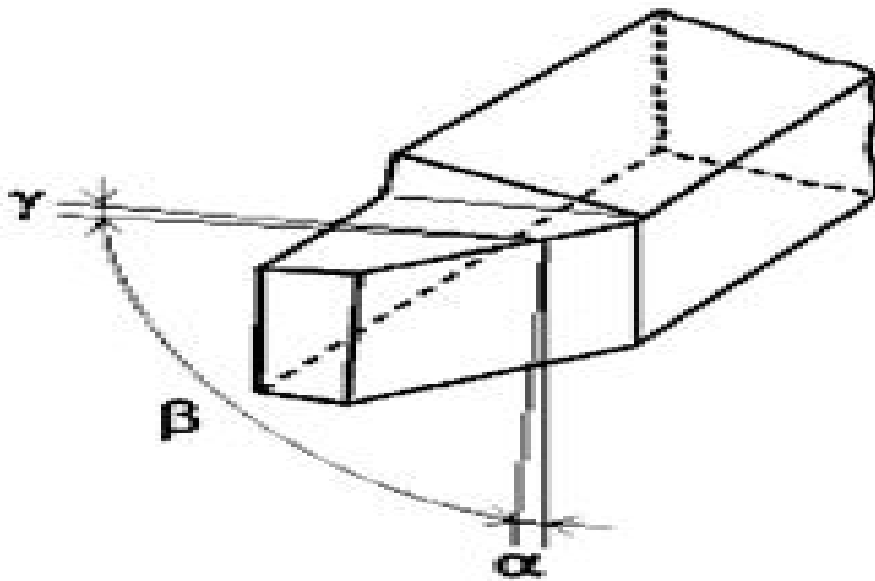


Figure I.7 : Angles de coupe

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_ϵ 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,
- Plat.

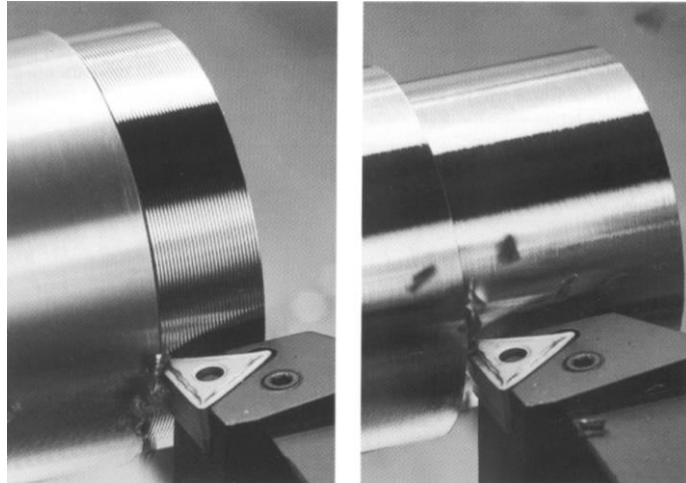


Figure I.8 : Influence du rayon du bec de l'outil sur la surface à usinée

Les symboles utilisés sont représentés dans le tableau suivant :

Symbole	Désignation
r_ϵ	Rayon nominal de l'arrondi du bec
b_ϵ	Largeur nominale du chanfrein du bec

Tableau I.1 : Symbole et désignation des formes du bec d'un outil de tournage

I.5.5/EXEMPLE DE CHOIX D'UN OUTIL DE COUPE A PLAQUETTE RAPPORTEE :

Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe. [7]

La figure I.10 représente les formes variées de plaquettes.



Figure I.9: Formes variées de plaquettes.

Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance.

Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- Matière de la pièce, usinabilité,
- Configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage,
- Limitations : tolérances, état de surface,
- Machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques,
- Stabilité, rigidité de la prise de pièce et de la pièce.

Lors de l'application, l'approche suivante permet de choisir « pas à pas » les caractéristiques de l'outil de tournage convenant pour une application déterminée :

- Système de fixation de la plaquette,
- Dimension et type de porte-plaquette,
- Forme de plaquette,
- Taille de plaquette,
- Rayon de bec,
- Type de plaquette,
- Matière de l'outil.

Les plaquettes sont fixées sur des portes-plaquettes. Celles-ci sont représentées dans la figure I.10

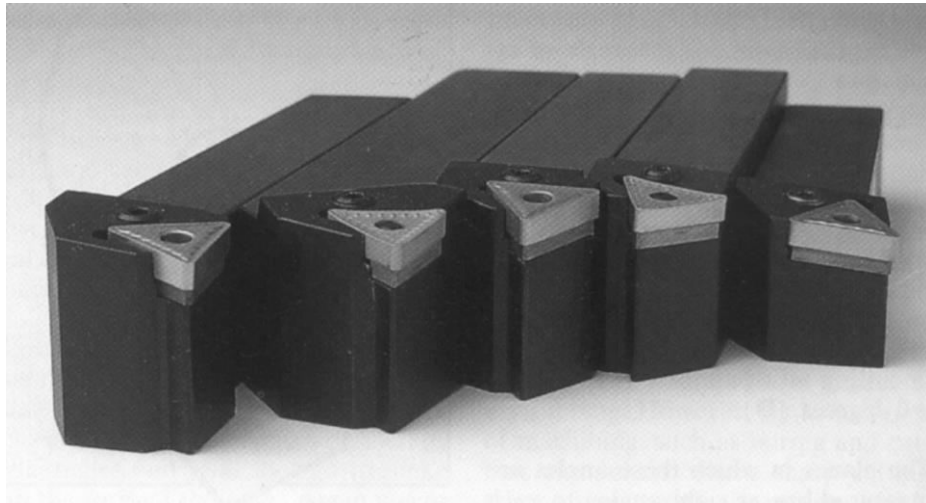


Figure I.10 : Différentes porte-plaquettes pour une même plaquette.

I.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.

L'objectif de la théorie de la formation du copeau est d'étudier les principes physiques qui régissent le processus de coupe et d'établir les causes des phénomènes dont ils s'accompagnent et d'y remédier de manière à rendre l'usinage plus productif et plus économique.

La formation du copeau est un phénomène de déformation élastique et plastique (compression) de la couche cisailée.

La déformation plastique consiste dans le glissement de certaines couches par rapport à d'autres suivant des plans de glissement qui se confondent en général avec la direction des contraintes de cisaillement maximales. Les glissements des couches du métal provoquent la modification de la forme des grains, de leurs dimensions et positions relatives.

La déformation plastique s'accompagne d'un échauffement important et d'une modification des propriétés du métal. Cette modification rend le métal plus dur, on dit que le métal est écrou.

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.
-

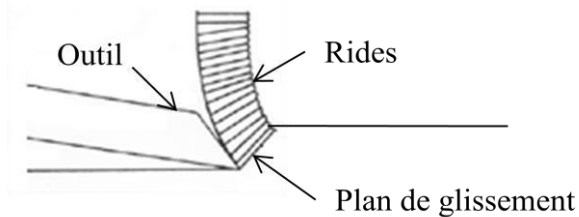


Figure I.11 : Copeau continu

- **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.

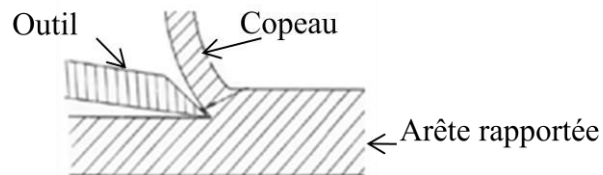


Figure I.12 : Copeau cisailé

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.

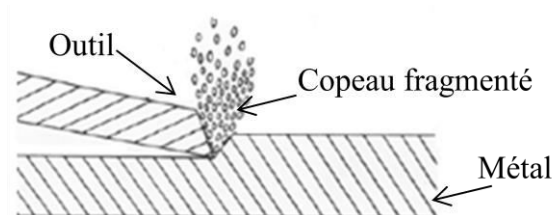


Figure I.13 : Copeau discontinu



CHAPITRE II
COUPE DES MÉTAUX

II.1 INTRODUCTION :

L'industrie mécanique s'est développée grâce aux technologies diversifiées de fabrication de pièces et composants qui constituent les ensembles et sous-ensembles mécaniques. Cependant les techniques de moulage et d'estampage n'arrivent pas à satisfaire les besoins mécaniques en pièces et composants spécifiques. Parmi les principaux procédés de fabrication mécanique, il est indispensable d'en citer l'usinage des métaux qui a contribué le plus dans la fabrication et la finition des pièces de précision. L'usinage des métaux consiste à façonner et finir une surface de pièce de configuration donnée par un ensemble d'opérations à effectuer à l'aide de machines outils. Nous allons voir comment intervient la raison humaine pour l'obtention d'une géométrie déterminée de la pièce grâce à l'harmonisation de l'interaction de plusieurs mouvements imposés tant à la machine, qu'à l'outil de coupe qui fait partie de cette machine-outil, qu'à la surface de la pièce à usiner.[8]

II.1.1 Importance de l'outil de coupe dans la construction des machines :

Généralement la mise en forme de la matière pour produire des pièces de différents types de machines et d'appareils fait appel à des techniques très diverses et suivant l'état de la matière (liquide, solide ou pulvérulent).

Donc deux types de solutions se présentent:[9]

a) La mise en forme par enlèvement de la matière qui est l'usinage ou coupe de matière et qui occupe une place de première importance en construction mécanique et dont les moyens sont sans cesse perfectionnés pour diminuer le coût de fabrication et améliorer la qualité du travail réalisé.

b) La mise en forme sans enlèvement de la matière et parmi lesquelles on peut citer:

- Le Formage à chaud et à froid
- La Fonderie
- Et le Frittage

II .1.2/ 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. [10].

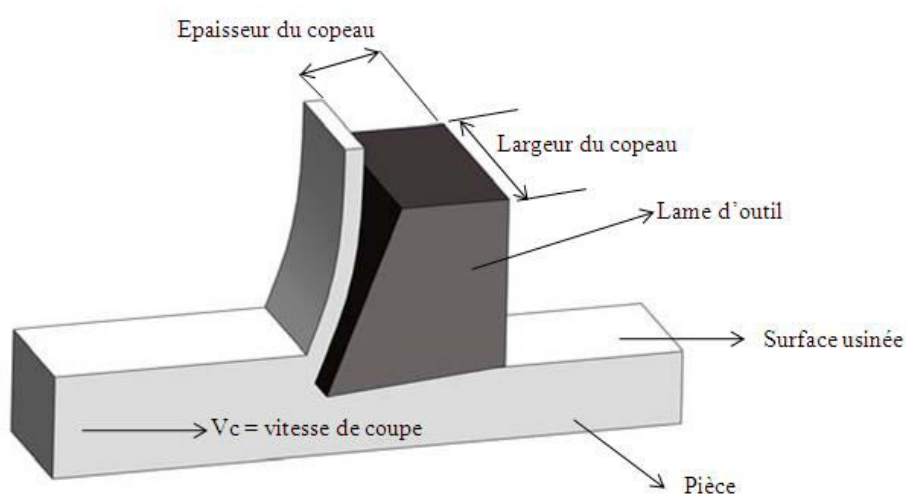


Figure II.1 : Usinage par enlèvement de matières

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.

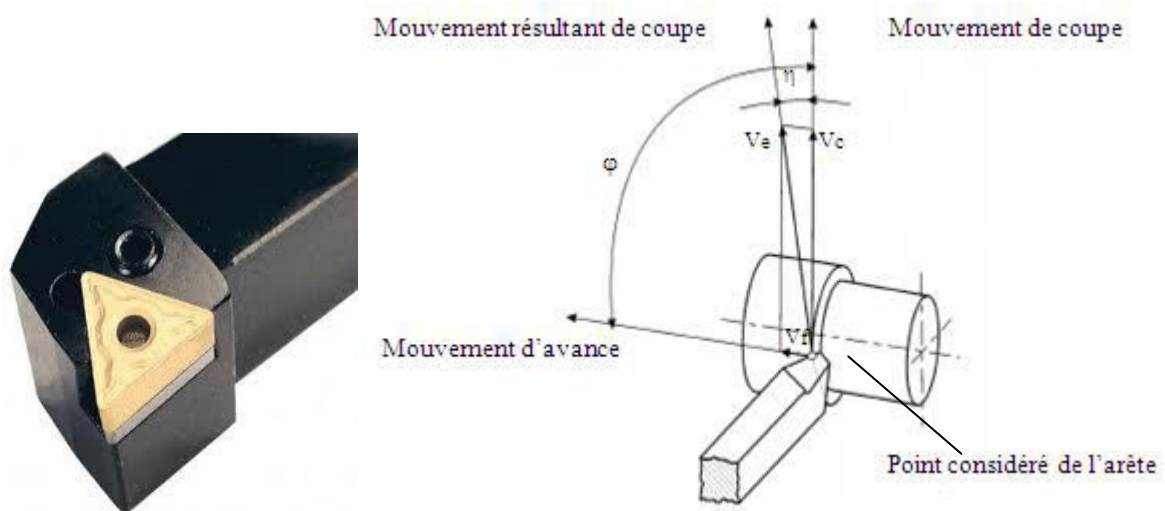


Figure II.2 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage

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 :

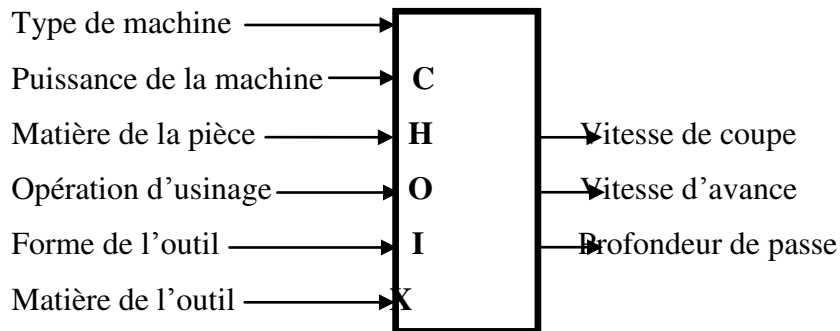


Figure II.3 : Critères permettant de définir les paramètres de coupe

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 :

a/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).

b/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).

c/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).

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

e/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**. [11][12].

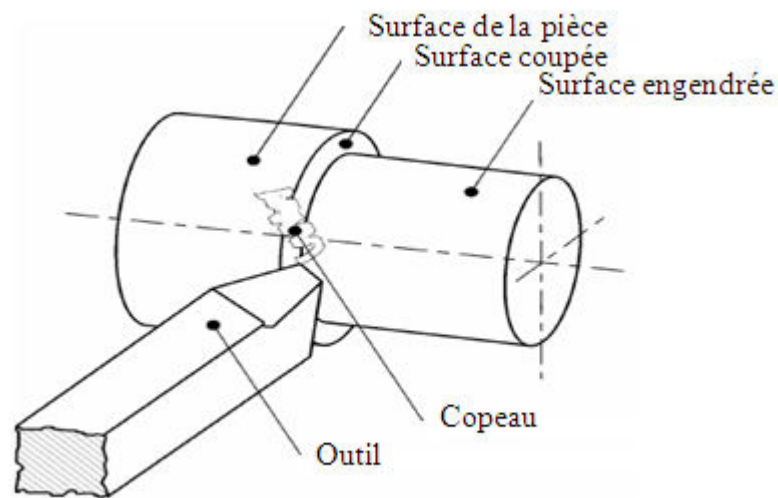


Figure II.4 : Surfaces de la pièce

II.2 Généralités sur la formation du copeau :

L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant. Dans le cas de la coupe orthogonale en régime stationnaire, la force exercée par l'outil lors de son engagement dans la matière provoque, à l'échelle mésoscopique, une forte compression de la

matière (une déformation plastique et un échauffement considérable). Elle engendre des zones

de cisaillement entre les faces de l'outil et la matière.

La compréhension de ces phénomènes n'est pas aisée. Il s'agit d'un problème faisant intervenir de nombreuses disciplines telles que [13] :

- La métallurgie (transformations structurales, dislocations, fissuration) ;
- La thermodynamique (l'échauffement, écoulement) ;

- La tribologie (frottement, contact, usure) ;
- La métrologie (dimensionnelle, macro et micro géométrique, intégrité des surfaces)
- La mécanique des matériaux (loi de comportements de type viscoplastique à des températures et des vitesses de déformation importantes) ;
- La mécanique des milieux continus (contraintes résiduelles, déformations, vitesse de déformation.) ;
- La mécanique des solides (efforts, dynamique, vibrations. . .).

La Figure II.1 illustre les différents phénomènes relatifs à la coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique.

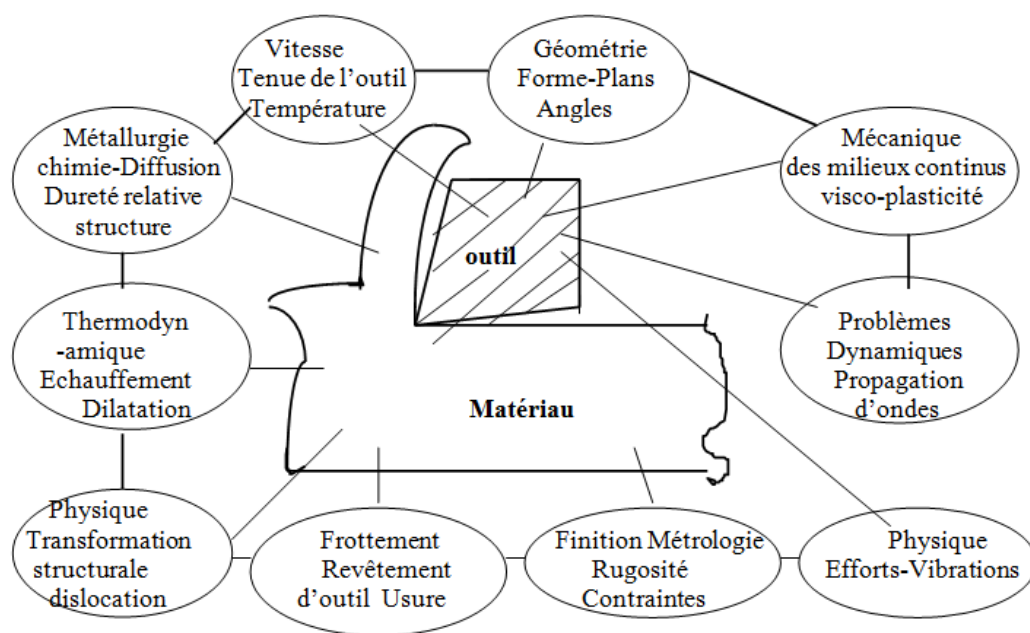


Figure II.5 : Phénomènes relatifs à la coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique (arête/matière)

II.2.1 Formes des copeaux :

On constate pour les outils sans brise copeau : 3 familles de copeaux

- les copeaux discontinus, fragmentés, brisés, cisailés, surtout rencontrés sur l'usinage des fontes ou avec d'autres matériaux à vitesse faible, c'est-à-dire avec un frottement intense sur la face d'attaque de l'outil
- les copeaux continus, écoulement sans cisaillement se rencontre dans les matériaux ductiles ou avec d'autres matériaux, mais à grande vitesse avec lubrifiant
- le copeau dit avec arrête rapporté, lorsque la surface de coupe est obtenue par ce copeau adhérent, c'est-à-dire sans contact avec l'arête de l'outil. on obtient souvent dans ce cas une surface usinée rugueuse. [14]

II.2.2 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). [15].

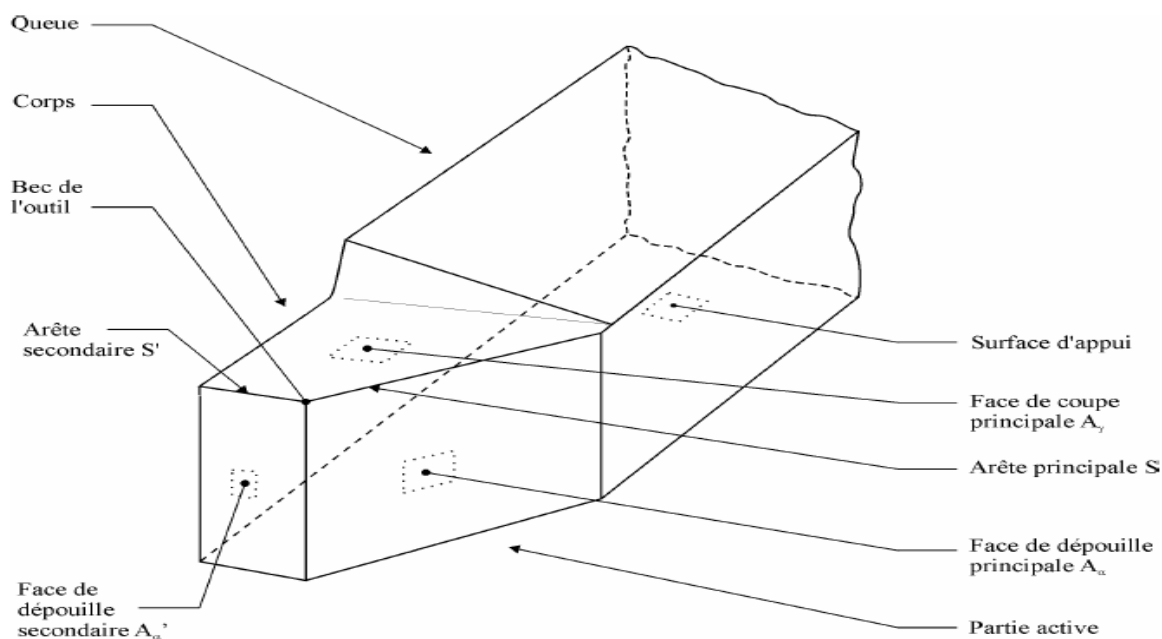


Figure II.6 : Eléments de l'outil

Avec :

Le Corps d'outil : Partie de l'outil qui porte les éléments composants l'outil (éléments coupants ou 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 arrêtes 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 $A\gamma$ et de la face en dépouille principale $A\alpha$.

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 $A\gamma$ et de la face en dépouille secondaire $A\alpha'$.

Le Bec d'outil : Partie où se rejoignent l'arrête principale et l'arrête secondaire. Cette partie peut être droite, arrondie, ou 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.[16]

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).

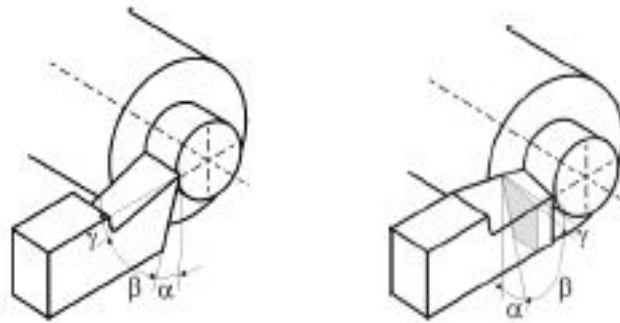


Figure II.7 : Angles du taillant (outil en travail)

II.2.3 Principes physiques de la coupe des métaux :

Le métal enlevé de l'ébauche par un outil de coupe s'appelle copeau, le but de ce chapitre est d'étudier la formation du copeau, processus physique complexe, qui s'accompagne de modifications cristallines, de déformations élastiques et plastiques, de rupture. Il donne par ailleurs lieu à un frottement important, à un dégagement de chaleur, à des microsoudures, à la formation d'une arête rapportée, à l'usure de l'outil [17].

II.2.4 Copeaux :

Les copeaux sont continus (forme de ruban) dans le cas des métaux malléables (acier) et fragmentés dans le cas des métaux non malléables (bronze et fonte). Les copeaux doivent être évacués, sinon ils tracent des sillons sur la surface usinée. Lors du perçage avec un forêt trop court, dès que la queue cylindrique se trouve engagée, les copeaux ne peuvent plus s'évacuer, l'effort de rotation augmente et la machine ralentit jusqu'à l'arrêt ou la rupture du forêt. [18]

II.2.5 Lois de coupe de métaux :

Une étude expérimentale systématique a permis d'établir le comportement des divers matériaux à outils pour des valeurs diverses des angles γ et α en fonction des matières à façonner.

1. Le copeau se détache d'autant plus aisément qu'il se présente tangentiellement à la face d'attaque c'est-à-dire lorsque γ est plus grand.

2. L'arête coupante se détériore d'autant plus rapidement que l'angle de coupe γ est plus grand ceci en raison du mauvais dégagement de la chaleur et à se disperser dans le corps de l'outil. Cette chaleur se concentre dans les parages immédiats de l'arête de coupe au point de provoquer une diminution sensible de sa dureté.

3. Plus le matériau à outil est dur et tenace, plus l'angle γ peut être augmenté. 4. Plus la matière à travailler est dure, plus l'angle γ doit être réduit.

II.3 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. [19]

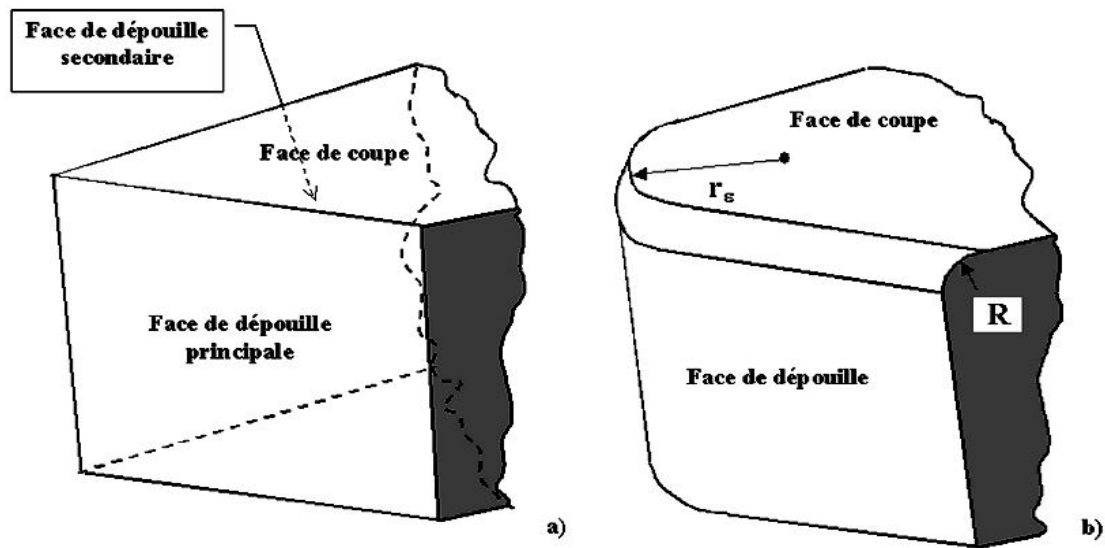


Figure II.8 : Géométrie de l'arête de coupe

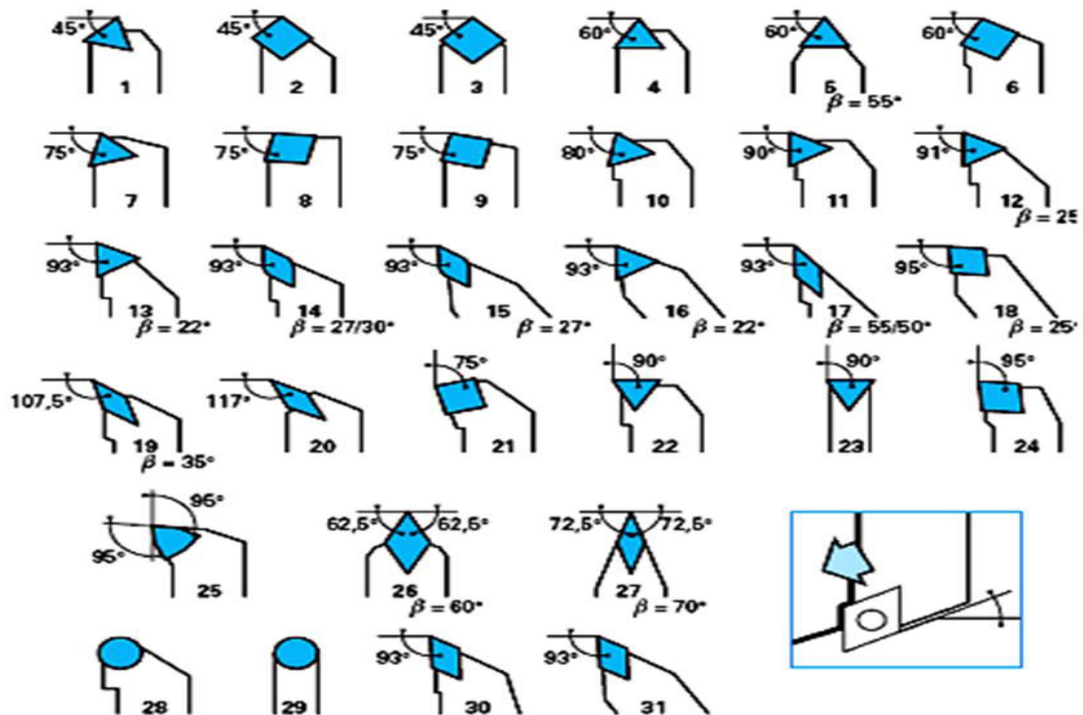


Figure II.9 : Gamme des angles d'orientation d'arête

II.4 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.

Remarque : Tous ces matériaux d'outils contiennent tous des éléments durs qui conservent leur dureté à des températures plus ou moins élevées pour résister aux efforts thermiques de la coupe.

Toutes ces caractéristiques nous amènent à employer les matériaux suivants, classés par ordre de dureté croissante:

- **Les aciers au carbone trempés ou aciers fondus :** Ils contiennent entre 0.8 à 1.2% de carbone. Leur dureté à froid atteint 65 HRC (essai Rockwell ou cône de diamant d'angle 120° C).
- **Les aciers au carbone alliés (aciers rapides) :** Ils sont des aciers avec des pourcentages importants d'éléments d'alliages, tel que le Tungstène (W) ou molybdène (D), Le Chrome (C), Le vanadium (V), le cobalt (K),...
- **Les aciers au tungstène (W) trempés (aciers rapides supérieurs) :**
- **Les alliages durs ou alliages coulés :** Ils sont obtenus par fusion de métaux purs avec du carbone (C) au four électrique. Leur composition est la suivante :

Carbone (C) : 2.5 à 4%.

Cobalt (Co) : 40 à 50 %, Tungstène (W) : 25 à 80 %, Chrome (Cr) : 25 à 82 %, Fer (Fe) : environ 4%, Manganèse (Mn) : un peu. Ils conservent leur dureté à une température assez élevée (700 ° C).

- **Les carbures métalliques frittés :** Ces matériaux, dits « carbures », connaissent un développement de plus en plus grand, dus à leurs performances de coupe. Leur très grande variété de leurs caractéristiques et leurs conditions d'élaboration par la technique du frittage font de ces matériaux une utilisation très fréquente dans le domaine de la coupe.
- **Les céramiques**
- **Les corps super abrasifs**
- **Les diamants**

II.5 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 à 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 optimums pour assurer un prix de revient minimum de la pièce à usiner avec une plus grande productivité.

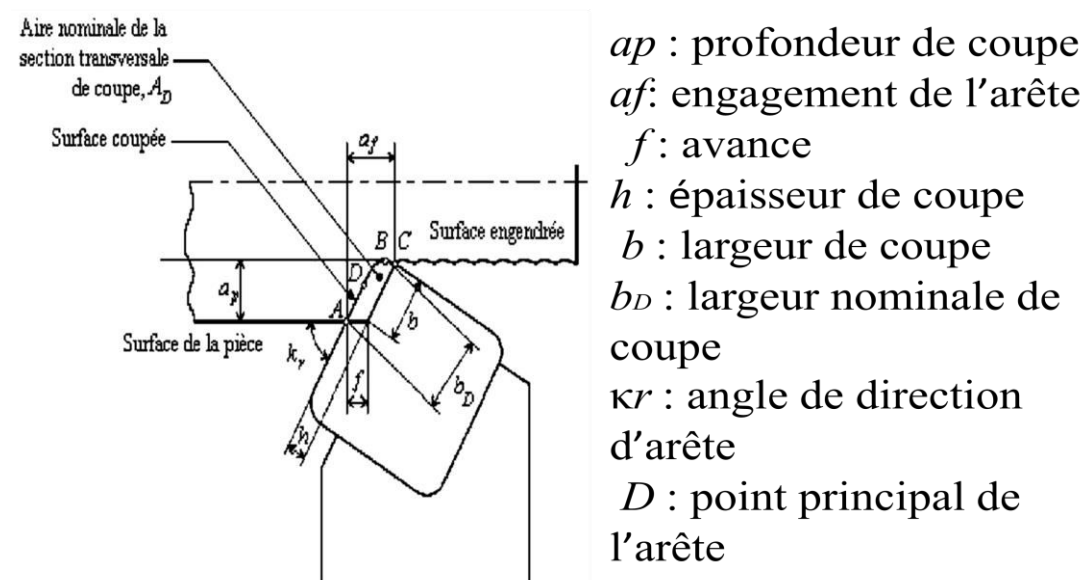


Figure II.10 : Dimensions des angles de coupe dans le tournage.

II.5.1 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.

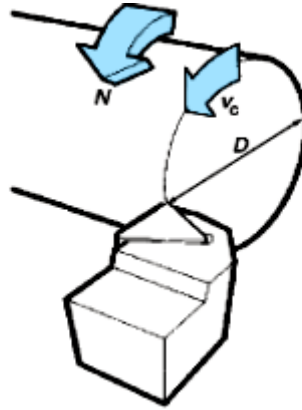


Figure II.11 : Vitesse de coupe

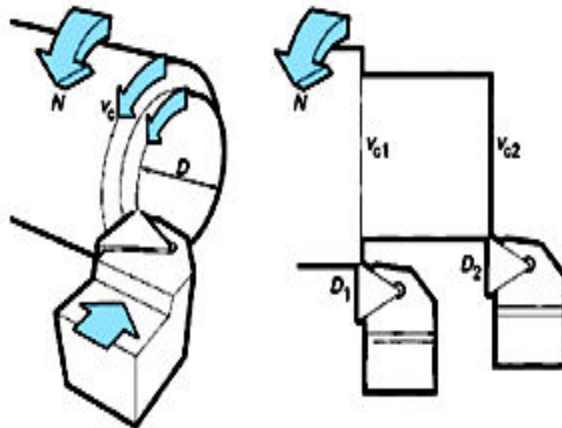


Figure II.12 : Vitesse de coupe, diamètre et vitesse de rotation

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 :

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

Le mouvement de coupe anime principalement la pièce (pièce tournante). On en déduit la vitesse de coupe V_c , qui déterminera la vitesse de rotation de la pièce quel on doit régler sur la machine.

$$N = \frac{100 \times V_c N}{\pi \times D} \left(\frac{tr}{min} \right) \dots \dots \dots (II.2)$$

II.5.2 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].

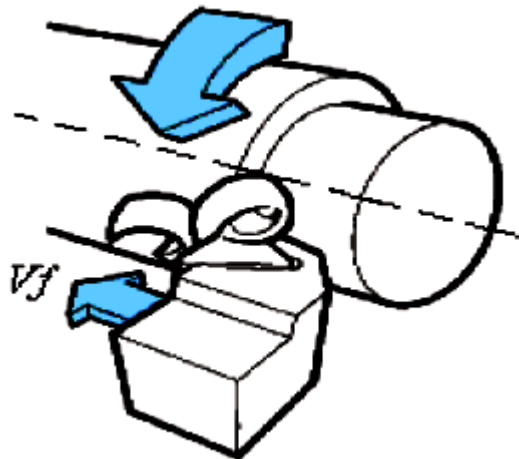


Figure II.13 : Vitesse d’avance

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).

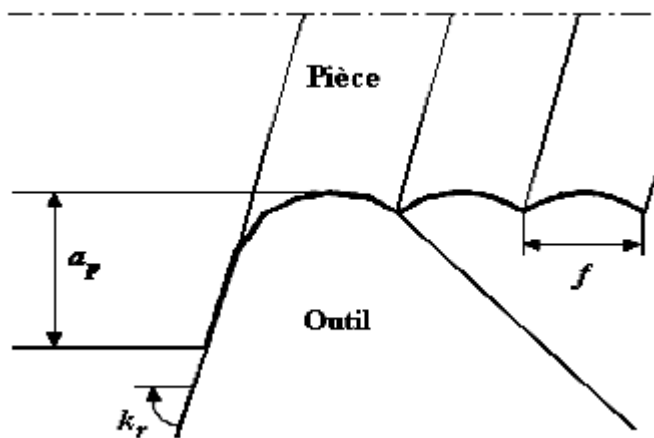


Figure II.14 : Avance f dans le cas de tournage

II.5.3 LA VITESSE D'AVANCE V_F :

En tournage, la vitesse d'avance V_f est :

$$V_f = f_z \times N \text{ (mm/min)} \dots\dots\dots (\text{ II.3})$$

Avec :

f_z = capacité de coupe de l'arête coupante pour une rotation d'un tour de la pièce. En d'autre terme, c'est la distance que l'arête de coupe va parcourir à chaque tour de la pièce.

II.5.4 LES TYPES D'AVANCES :

On distingue trois types d'avance :

- **Avance longitudinale** : l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche,
- **Avance transversale** : l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche,
- **Avance oblique** : l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche.

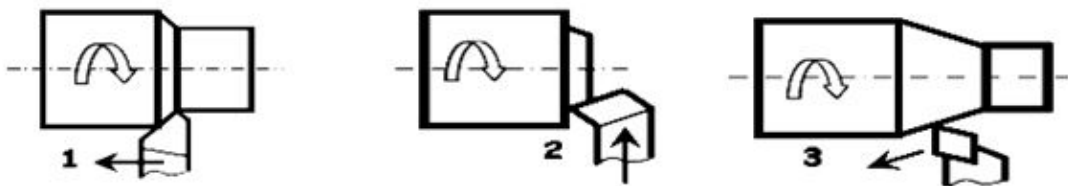


Figure II.15 : Types d'avance

Avec :

1 = avance longitudinale

2 = avance transversale

3 = avance oblique

II.5.5 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
ETAT DE SURFACE

III.1/ INTRODUCTION :

Ce chapitre sera consacré à l'étude de l'état de surface et de la rugosité. Ayant pris connaissance au travers des chapitres précédents des différents phénomènes liés au procédé de tournage.

On appelle états de surface les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profilomètres ou bien rugosimètres, qui relèvent le profil de la surface (Figure III.1). Ces appareils impriment un graphique anamorphosé du profil réel palpé (c'est-à-dire que l'agrandissement vertical est plus important que l'agrandissement horizontal). Ce graphique permet de visualiser la forme des irrégularités et d'estimer leur profondeur et leur espacement [20].

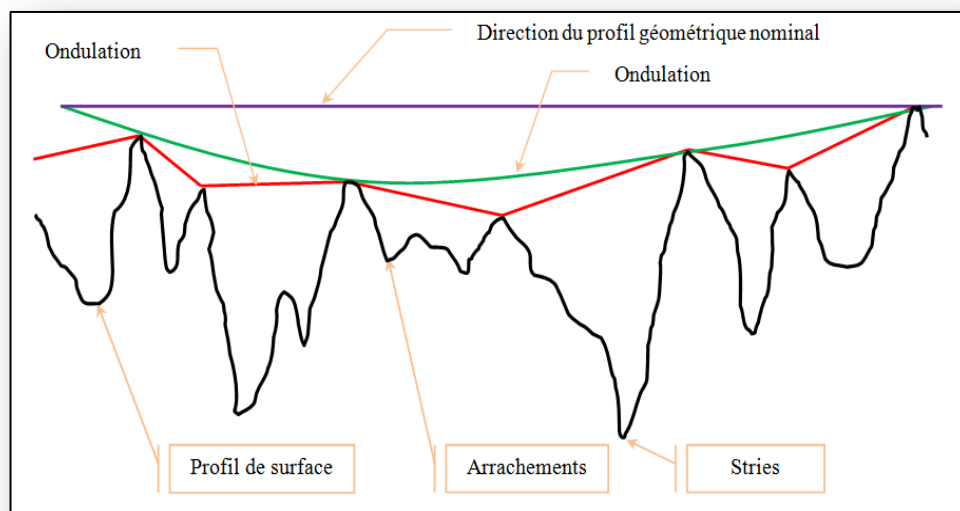


Figure Fehler! Kein Text mit angegebener Formatvorlage im Dokument.II.1: Profil anamorphosé

III.2 Rôle et fonctions de surface :

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [21].

III.2.1 Différents types de surfaces :

a/ Surface de référence :

C'est une surface particulière qui permet de définir ou de contrôler d'autres surfaces [22].

b/ Surface spécifiée:

Surface parfaite sur le dessin de définition, elle est définie géométriquement par le bureau d'études à l'aide de cotes nominales.

c/ Surface associée :

C'est la surface théorique représentant au mieux la surface réellement fabriquée. Elle est de même nature que la surface nominale ou spécifiée.

d/ Surface mesurée :

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée.

e/ Surface réelle :

Surface obtenu au cours de la fabrication.

III.3 LA RUGOSITE :

La rugosité comprend les irrégularités le plus souvent sensibles à l'angle comme par exemple, les traces d'outil d'une pièce usinée ou le «grain »d'une surface sablée où revêtue.

Concernant les pièces mécaniques, elles sont généralement des irrégularités de pas inférieur à 500 μm , avec un ratio largeur/profondeur dans la plage 100/1 à 5/1.

La rugosité influe sur l'aptitude au frottement (particulièrement pendant la période de rodage), l'usure, l'adhésivité des revêtements, la résistance à la flexion et aux efforts alternés, à la corrosion, etc.

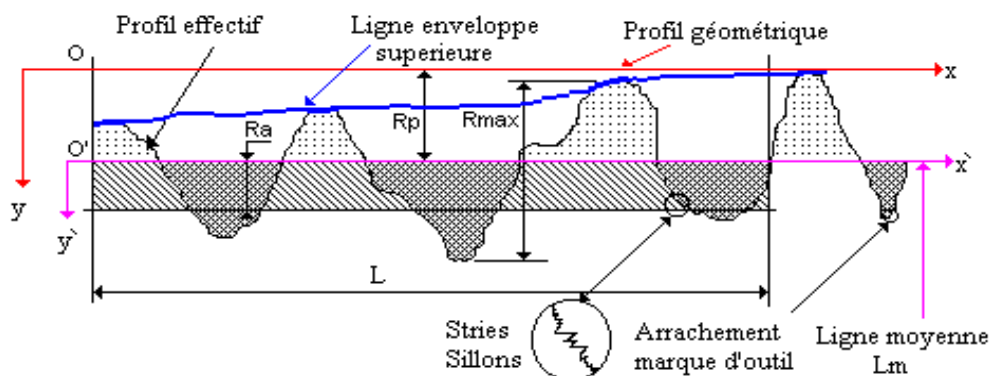


Figure III.2 : La rugosité

Lors de l'usinage, les facteurs influant sur la rugosité sont l'avance de l'outil, son affûtage, les ondulations de sa face de coupe, le brise-copeaux, le rayon de pointe, la qualité et le filtrage du lubrifiant, le démontage de la meule en rectification, les vibrations de haute fréquence, etc.

Les Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface sont représentés dans la figure suivante :

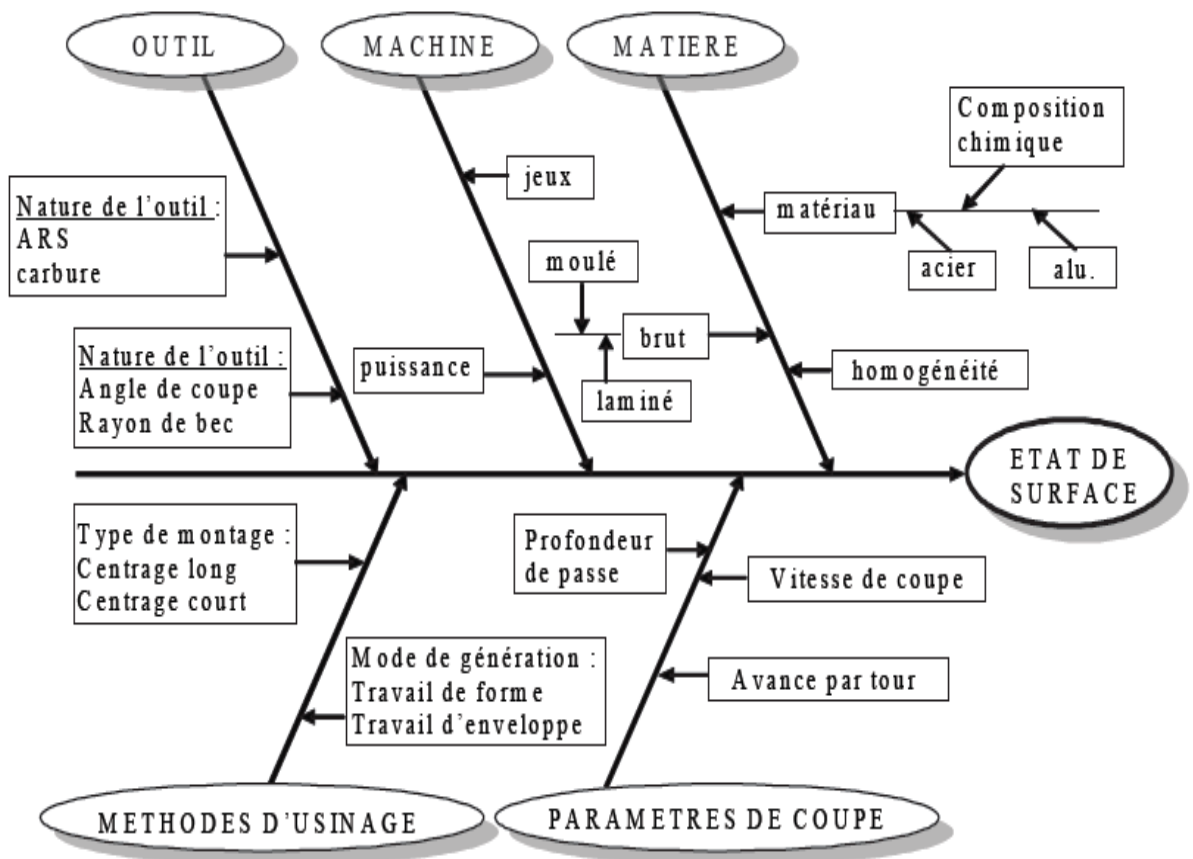


Figure III.3: Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface

III.3.1 Principaux paramètres de la rugosité :

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité.

En pratique, dans un profil et sur une longueur considérée, seuls trois d'entre eux sont retenus:

a/ "Ra": écart moyen, c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les Pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale. On admet Couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres Intéressés dans la rugosité.

b/ "Rt": écart total, c'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic Et le fond le plus bas d'un creux.

c/ "Rz": régularité, c'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 Longueurs [23].

III.4 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 : [24]

- 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.4.1 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, [25].[26].[27].[28]
- Applications expérimentales. [29].[30].[31]

III.4.1.1 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.

a/ 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.

b/ 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.

c/ 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).

d/ 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.

e/ 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.

f/ 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.4.1.2 ELEMENTS DEPENDANTS DE L'OPERATION D'USINAGE :

On peut citer les éléments suivants :

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

a/ 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.

b/ 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.

c/ Porte-outil de coupe : Il assure la liaison entre l'outil de coupe et la machine-outil. La notion de l'interface confère au 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.

d/ 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 contribue 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.5 SOURCES DE VIBRATIONS DU SYSTEME POM

Les causes des excitations du système POM peuvent être directement liées à l'usinage ou provenir d'autres sources.

Ces dernières sont principalement les défauts d'équilibrage, les défauts des chaînes cinématiques et les oscillations provenant des asservissements de pilotage.

III.6 DEFINITION DES FORCES DE COUPE :

Parmi les grandeurs physiques caractéristiques de la coupe qui sont accessibles expérimentalement, on a :

- Efforts de coupe,
- Température,
- Contraintes résiduelles.

Les efforts résultants de l'interaction de l'outil de coupe et de la pièce proviennent de contraintes, qui apparaissent dans les zones de cisaillement primaire et secondaire.

III.7 VIBRATIONS EN USINAGE :

Les vibrations du système POM peuvent se produire sous certaines conditions (Figure III.4), qui dégradent la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Ces dernières diminuent la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil. Il en existe deux types, les vibrations forcées et les vibrations auto excitées (générées par le processus de la formation du copeau) [32].

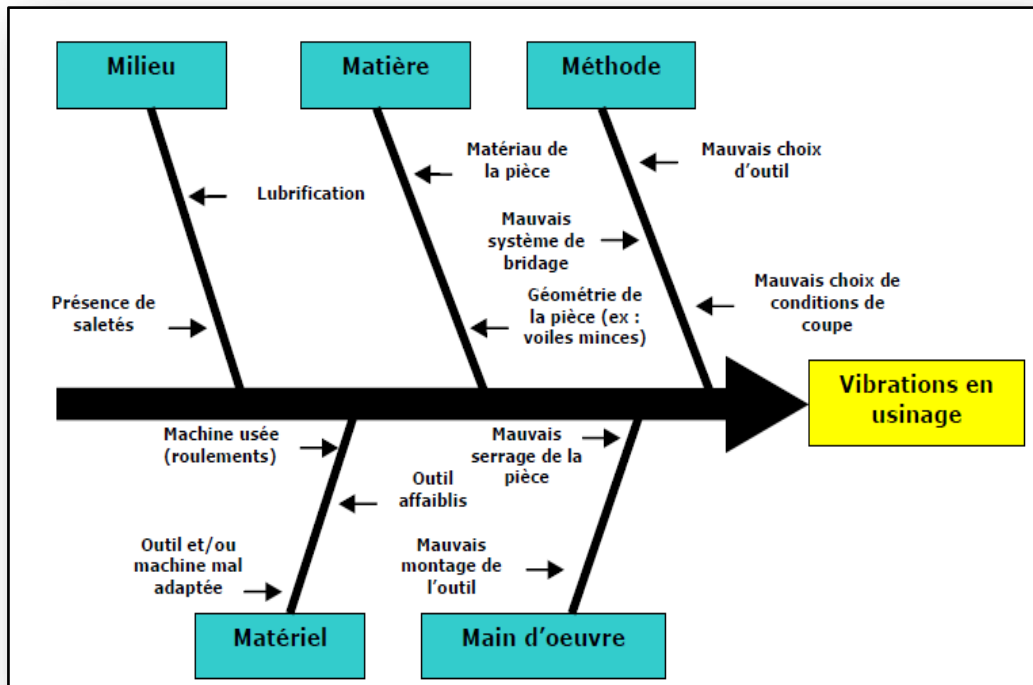


Figure **Fehler! Kein Text mit angegebener Formatvorlage im Dokument.**II.4: Causes principales des vibrations en usinage.

III.8 TYPES DE VIBRATIONS :

III.8.1 VIBRATIONS FORCEES :

En général, les vibrations forcées dégradent peu l'état de surface de la pièce. Par contre, elles se caractérisent par un défaut de position de la surface usinée, pouvant entraîner des imprécisions dimensionnelles. Ce genre apparaît sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

- La variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe intermittente (tournage d'un arbre à rainure longitudinale par exemple) ou à une surépaisseur variable;
- Les chocs dus aux vibrations ou à la précision insuffisante des surfaces actives des pièces des organes de transmission (usure des pièces d'un mécanisme, manque de précision des engrenages), aux engagements et aux changements de régime brusque ;
- Les forces centrifuges d'inertie due au manque d'équilibre des masses en rotation (ébauche, mandrin, poulies, rotors des moteurs électriques...).

III.8.2 VIBRATIONS AUTO-ENTRETENUES :

Contrairement aux vibrations forcées, les vibrations auto-entretenues sont propres aux opérations d'usinage par enlèvement de matière. Ces vibrations entre l'outil et la pièce sont la cause du broutement (**chatter**). Ce phénomène est très néfaste pour l'usinage, car il dégrade fortement à l'état surface, en générant des stries sur la pièce. Les conséquences des vibrations auto-entretenues, sur une surface usinée, sont illustrées sur la figure III.5. Ce phénomène augmente également la dégradation de l'outil coupant et de la broche, tout en générant parfois beaucoup de bruit.

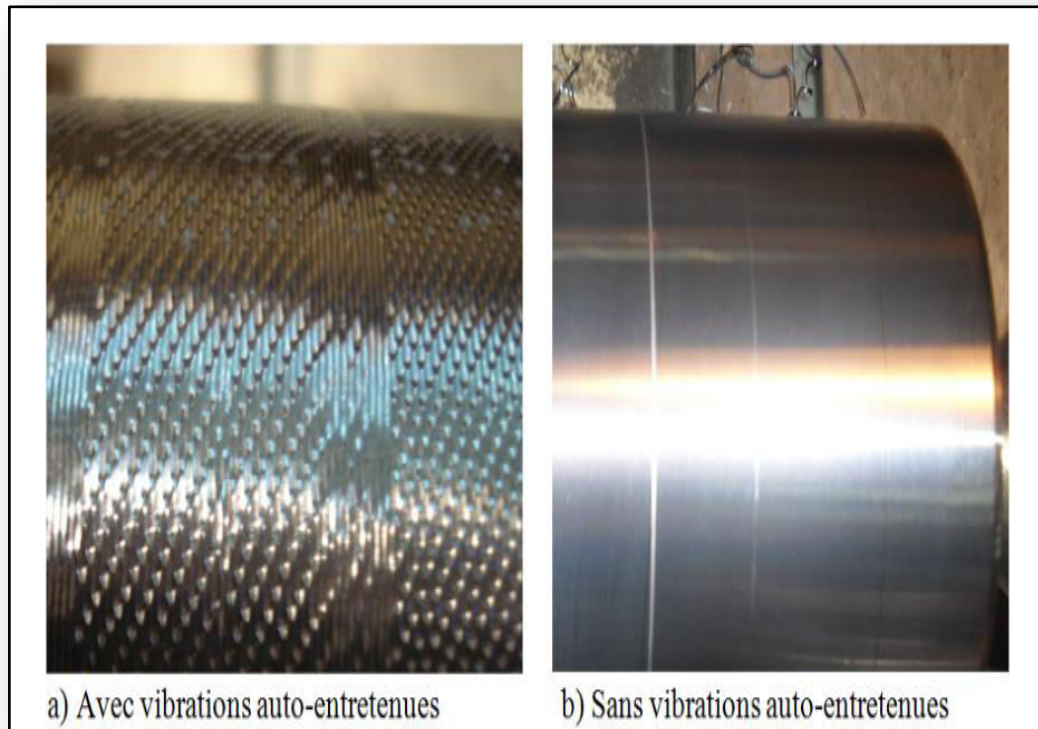
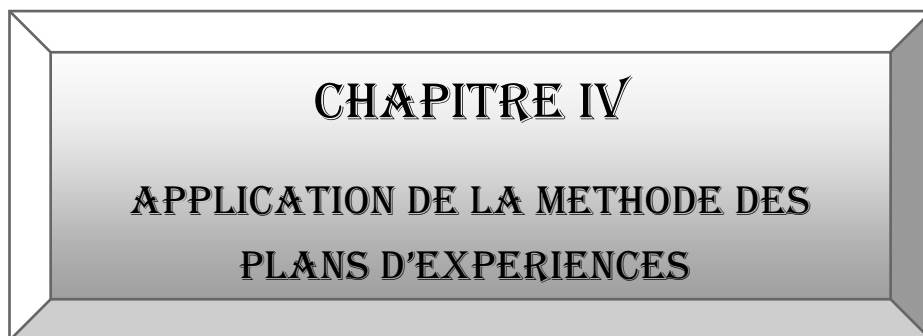


Figure **Fehler! Kein Text mit angegebener Formatvorlage im Dokument.**II.5: Détail d'une surface usinée.

Les vibrations auto-entretenues ne se limitent pas au seul fraisage. On les retrouve également en tournage, en perçage, en alésage et en rectification. Les causes du broutement sont longtemps restées incompréhensibles. Aujourd'hui, encore en pratique, il est parfois difficile d'en déterminer exactement les causes. Le paragraphe suivant présente un bref rappel historique permettant de développer ensuite l'explication la plus généralement retenue.



CHAPITRE IV
APPLICATION DE LA METHODE DES
PLANS D'EXPERIENCES

IV.1. INTRODUCTION :

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé celle des plans d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux.[33]

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.[34]

La méthodologie des plans d'expériences s'articule selon les trois étapes suivantes :

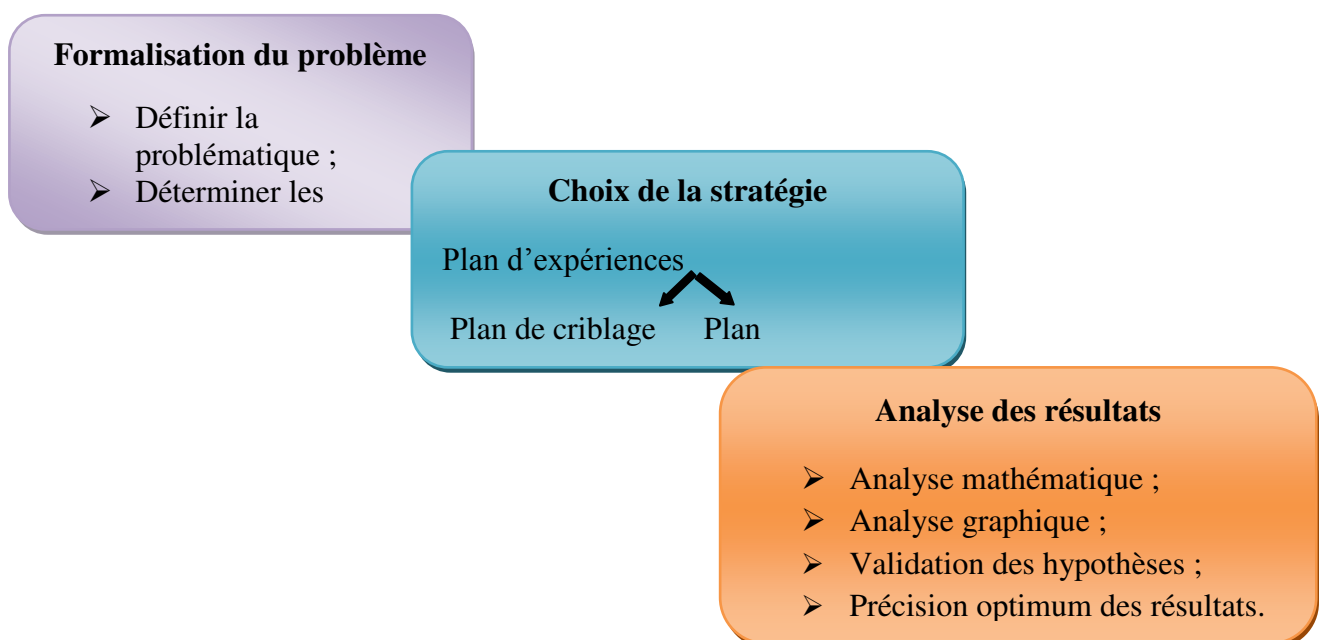


Figure IV.1: Mise en œuvre des plans d'expériences.

IV-2 Définition des plans d'expérience :

Les plans d'expériences permettent d'obtenir un maximum d'informations en réduisant à un minimum le nombre d'expériences à réaliser[35].

Les avantages bien connus des plans d'expériences sont l'efficacité, l'exactitude et l'analyse des interactions. Par efficacité, on sous-entend que seules les expériences indispensables sont effectuées. Au moyen de plans d'expériences, la plus grande exactitude possible est atteinte pour un effet expérimental donné.

Ces applications font partie intégrante de la méthodologie moderne d'optimisation des procédés et des produits. Elles ont fait leur preuve dans plusieurs secteurs industriels comme la chimie, l'agroalimentaire, l'automobile, l'électronique et la mécanique. Il suffit de rechercher le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt ou bien la réponse (Y) et les différentes variables, ou facteurs (x_i) (Figure IV.2). Donc la méthode consiste à établir la relation entre une réponse (résultats) et les différents facteurs sous forme d'une fonction du type :

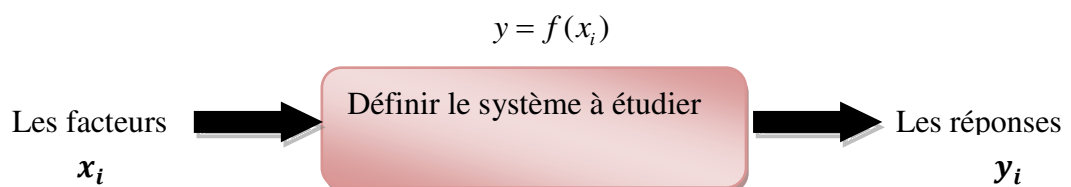


Figure IV.2:Schématisation du système

IV.2.1 Principaux avantages des plans d'expériences :

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais.
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection des interactions entre facteurs.
- Modélisation des réponses étudiées.
- Précision optimum des résultats.

IV.3. Eléments de méthodologie et de terminologie :

Avant d'aller plus loin, il est important de bien définir les principales notions dans la méthodologie des plans d'expériences.

IV.3.1 Notion d'espace expérimental :

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure IV.3). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut [36].

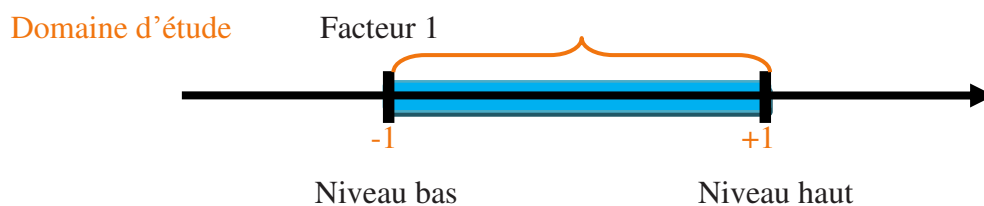


Figure IV.3 : Présentation du domaine de variation d'un seul facteur.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure IV. 4). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

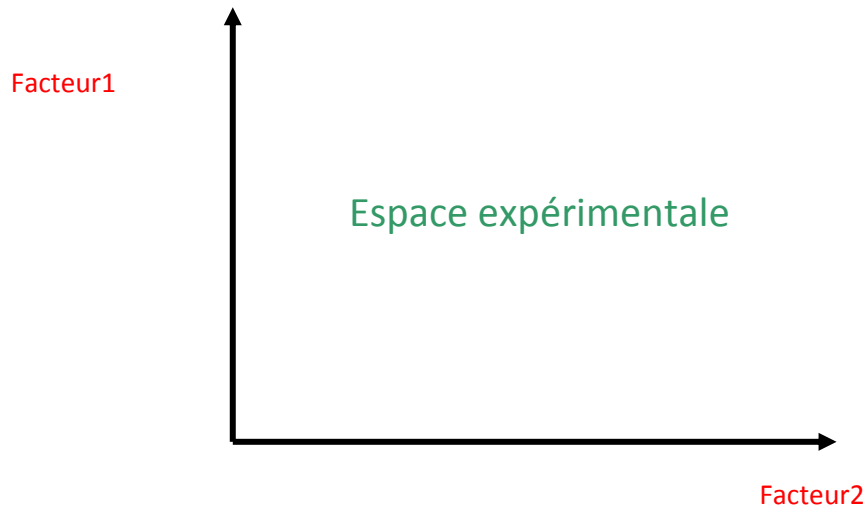


Figure IV.4: Schéma d'un espace expérimental

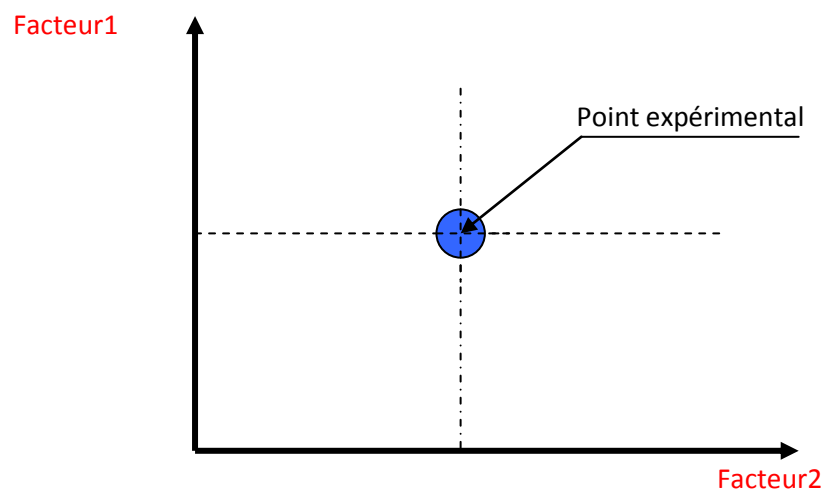


Figure IV.5: Positionnement d'un point expérimental

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le domaine d'étude (figure IV.5). Ce domaine est défini par les niveaux hauts et les niveaux bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs.

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à réaliser le minimum d'expériences tout en réduisant l'influence de l'erreur expérimentale sur les modélisations mathématiques qui serviront à prendre des décisions. On atteint ce but en considérant les propriétés mathématiques et statistiques qui relient la réponse aux facteurs. Lorsqu'il n'y a pas de contraintes sur le domaine d'étude, il existe des plans classiques qui possèdent d'excellentes qualités statistiques et qui permettent de modéliser les réponses dans les meilleures conditions (figure IV.6). Lorsqu'il existe des contraintes, il faut construire des plans sur mesure en recherchant la position des points expérimentaux qui conduisent, là aussi, à de bonnes qualités statistiques et à une bonne modélisation des réponses.

Facteur 2

Facteur 1

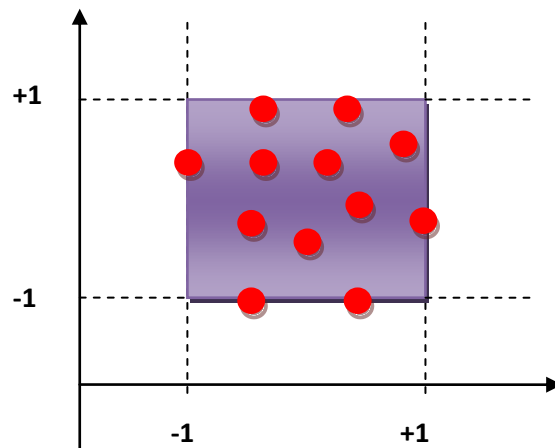


Figure IV.6 : Exemple de disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple les noms des personnes. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

VI.3.2 Notion de surface de réponse :

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

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 se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure IV.7).

Le nombre et l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences [37].

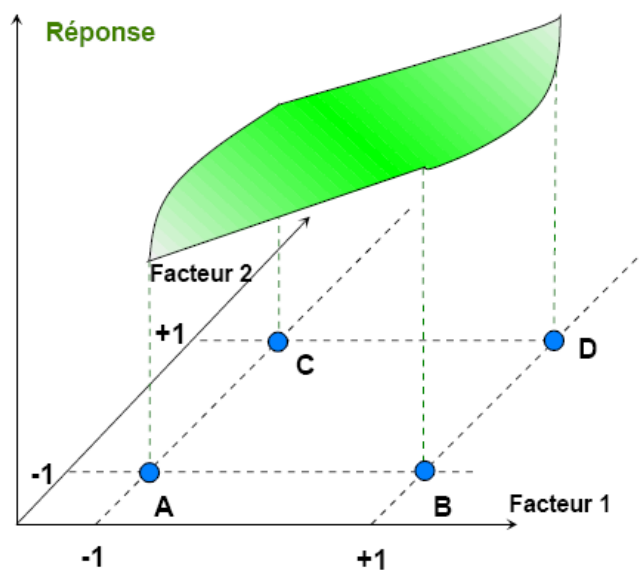


Figure IV.7 : Représentation d'une surface de réponse.

IV.3.3 Notion de modélisation mathématique :

On choisit à priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin [38].

Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y_i = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ij} X_i X_j + \dots + \sum a_{ii} X_i^2 + a_{ij\dots z} X_i X_j \dots X_z \quad (\text{VI.1})$$

Où

- y_i est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté à priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conditions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats (Norme ISO 3534-3)

IV.4 PRESENTATION DU PROBLEME :

Pendant l'usinage des pièces en tournage et sous l'effet de la vibration qui est très élevée, la surface des pièces est rugueuse, c'est ce qui influe sur le rendement de cette pièce et sur le rendement général de mécanisme.

Pour étudier le comportement du matériau en tournage (opération de dressage), on a utilisé de l'acier XC48 et un outil de type PSKNR 2020 K12 (carbure métallique).



Figure IV.8 : Tour utilisé

L'usinage des pièces s'est déroulé au niveau de notre atelier de mécanique, les mesures des critères de la rugosité ont été effectuées à l'université Houari Boumediene de Bâb Zouar (USTHB).

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

Le but de cette méthode est de voir la variation de la qualité de surface réalisée en fonction de quatre paramètres de régime de coupe (V_c, f, a, r_e). Ces derniers représentent les paramètres d'entrée selon la figure. Au moyen d'un modèle mathématique qui sera établie, la réponse du système en l'occurrence la qualité de surface est représentée par "Ra".

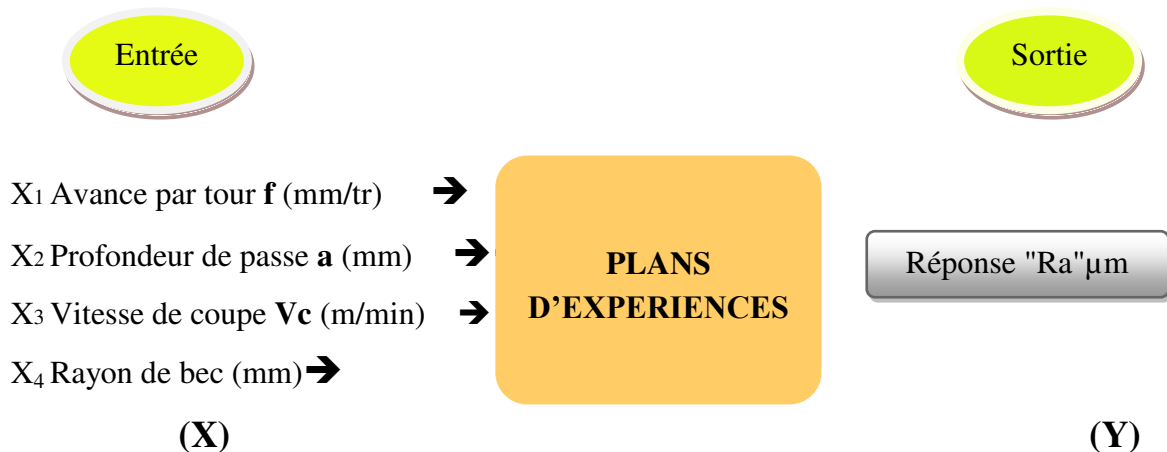


Figure IV.9 : Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai

La matrice des essais est présentée dans le tableau suivant :

Facteur	Unité	Maximum	Minimum
Vitesse de coupe (X1)	m/min	131.88	105.5
Avance par tour (X2)	mm/tr	0.2	0.05
Profondeur de passe (X3)	mm	1	0.5
Rayon de bec (X4)	mm	0.8	0.4

Tableau IV.1 : Les 4 facteurs ; leurs unités, leurs maximums et leurs minimums

IV.5/ MESURE DE LA RUGOSITE :

Les mesures des rugosités ont été effectuées par un rugosimètre TR100 Surface Roughness Tester composé d'un capteur qui sert à détecter les déplacements verticaux du palpeur, ainsi que d'un calculateur et d'une unité d'affichage.



Figure IV.10:RugosimètreTR100 Surface Roughness Tester

Caractéristiques techniques de l'appareil

- Paramètres de mesures de Ra et Rz
- Plage de mesure 0.05 :10 μ m pour Ra
0.1 :50 μ m pour Rz
- Longueur de mesure 6mm
- Calibre $\lambda_1=0.25$ mm pour Ra=0.05 0.25
 $\lambda_2=0.8$ mm pour Ra=0.32 2.5
 $\lambda_3=2.5$ mm pour Ra=2.5 10

Les valeurs moyennes des rugosités Ra mesurées pour chaque pièce correspondant à chaque régime de coupe sont présentées dans le tableau suivant :

1^{er} cas :sans vibration :

Pièces	Paramètres de coupe				Ra (µm)
	f (mm/tr)	a (mm)	Vc (m/min)	re (mm)	
1	0.2	0.5	131.88	0.4	1.88
2	0.05	0.3	105.50	0.8	3.14
3	0.05	0.3	105.50	1.2	2.19
4	0.05	0.3	105.50	0.4	3.46
5	0.2	0.5	131.88	0.8	2.01
6	0.2	0.5	131.88	1.2	1.49

Tableau IV.2:les valeurs de Ra correspondantes aux régimes

La figure IV.II représente les surfaces obtenues lors de l'opération de dressage avec des différents régimes de coupe sans prendre en compte les vibrations :

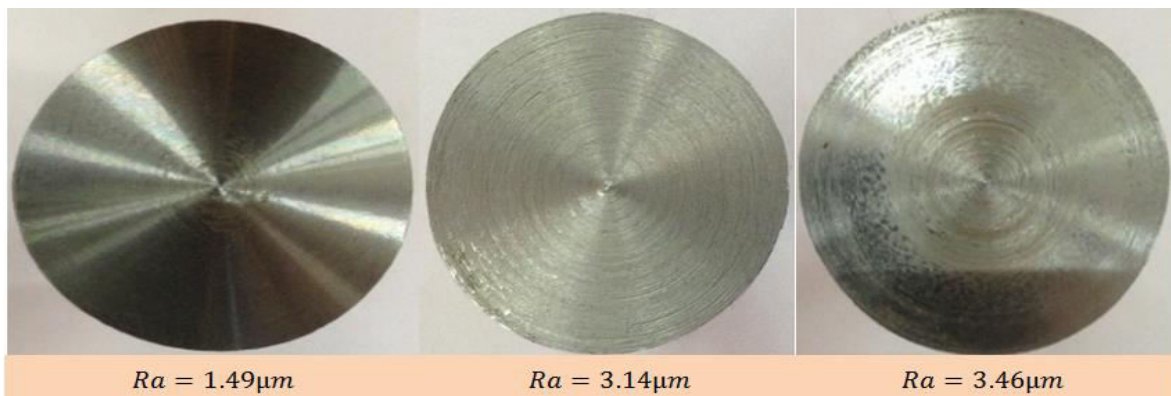
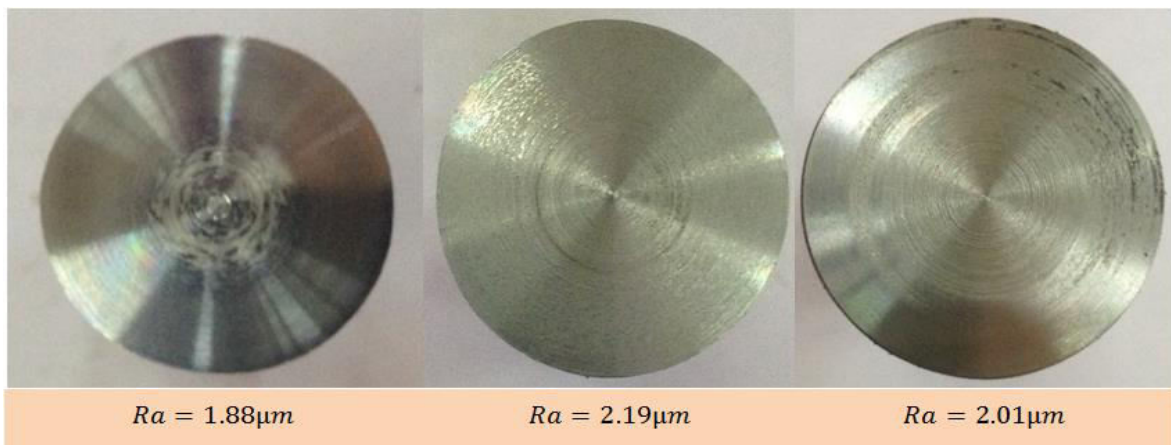


Figure IV.11 : Etas de surface des pièces usinées (sans vibration)

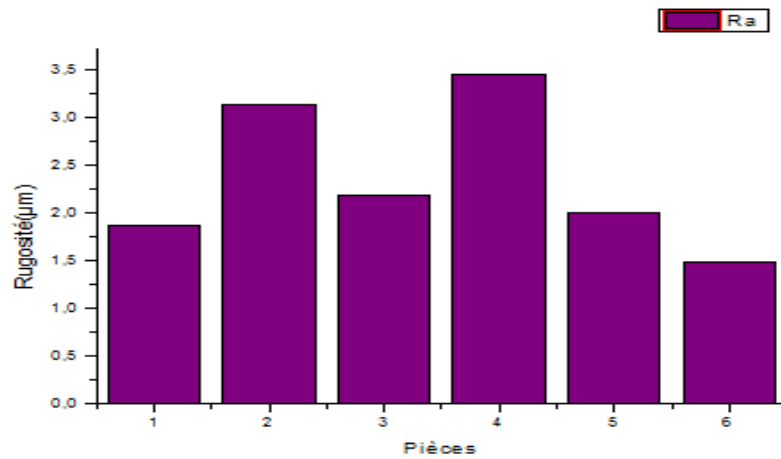


Figure IV.12 : Influence des paramètres de coupe sur la rugosité

De cette figure, on remarque que chaque paramètre de coupe influe sur la rugosité Ra. Le traitement par la méthode des plans d'expériences nous permettra une évaluation plus exhaustive de l'effet des conditions de coupe.

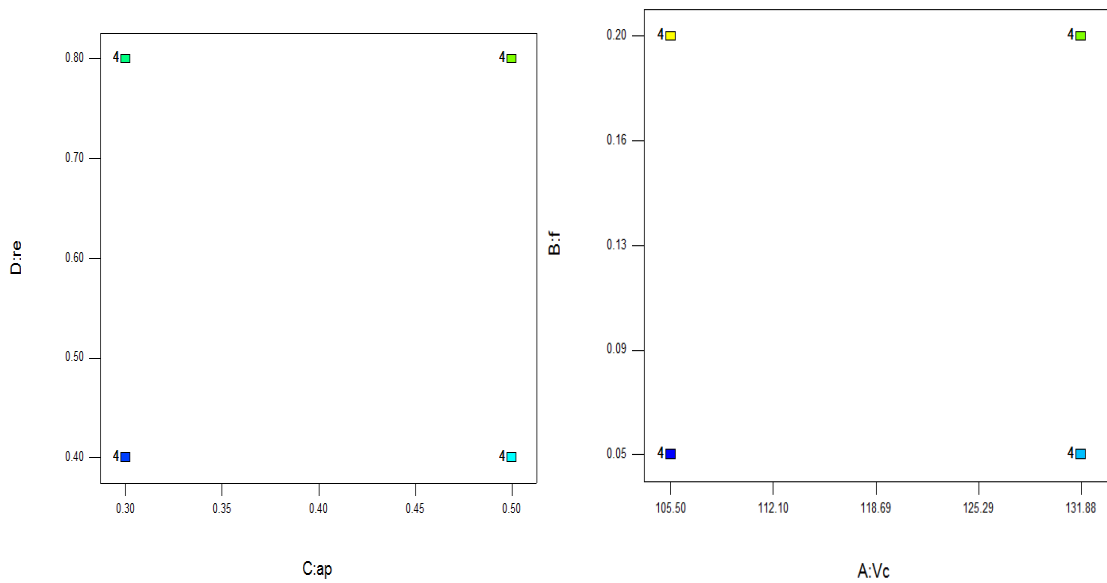


Figure IV.13: Domaine d'étude des différents paramètres de coupe

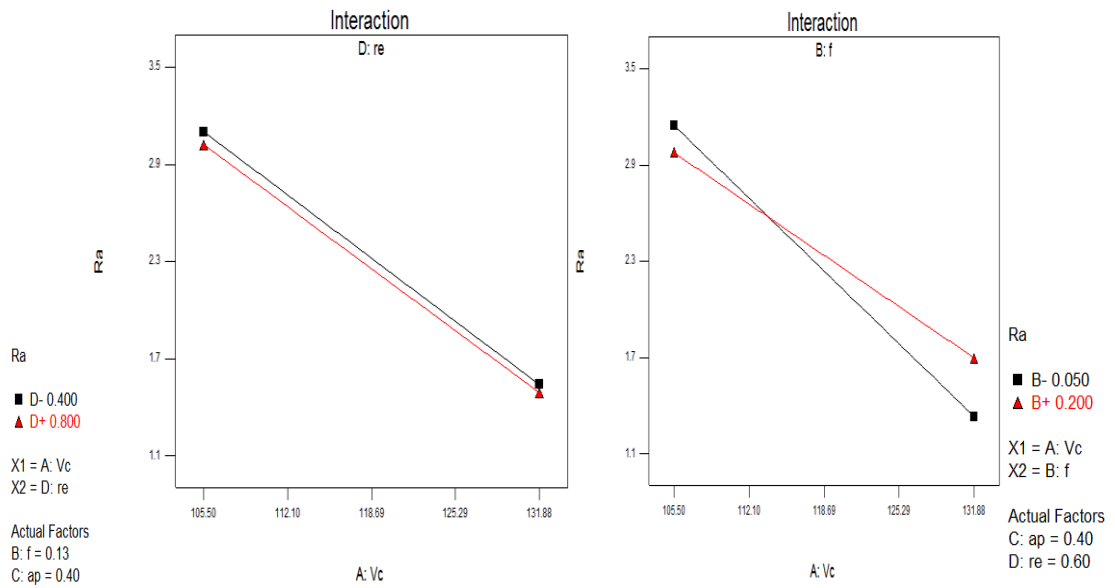


Figure IV.14: Interaction de l’avance et de la vitesse de coupe en fonction de la rugosité Ra

- Les figures illustrent les effets des interactions existantes qui influent respectivement sur la rugosité arithmétique Ra.
- L'augmentation de chacun des facteurs influant la rugosité, vitesse de rotation, l’avance fait augmenter la rugosité,

La modélisation par plans d’expériences, pour le cas de l’étude de la rugosité arithmétique Ra, se fait par modèle mathématique sous forme polynomiale suivante :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + a_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{124} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + a_{134} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{234} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + a_{1234} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \dots \dots \dots (IV.2)$$

Après traitement des données , notre équation devient :

$$Ra = 2.29 - 0.77x_1 + 0.049x_2 + 0.029x_3 - 0.033x_4 + 0.13x_1 \cdot x_2 + 0.049x_1 \cdot x_3 + 7.5 \cdot 10^{-3}x_1 \cdot x_4 + 0.15x_2 \cdot x_3 - 0.045x_2 \cdot x_4 + 0.11x_3 \cdot x_4 + 0.019x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.023x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0.048x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.055x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.040x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \dots \dots \dots (IV.3)$$

Avec :

- a_0 =La valeur moyenne de l’effet des quatre facteurs,
- a_1 = l’effet de la vitesse de coupe,
- a_2 = l’effet de l’avance par tour,
- a_3 = l’effet de la profondeur de passe,

a_4 = l'effet de rayon de bec,
 a_{12} = l'interaction entre a_1 et a_2 ,
 a_{13} = l'interaction entre a_1 et a_3 ,
 a_{14} = l'interaction entre a_1 et a_4 ,
 a_{23} = l'interaction entre a_2 et a_3 ,
 a_{24} = l'interaction entre a_2 et a_4 ,
 a_{34} = l'interaction entre a_3 et a_4 ,
 a_{123} = l'interaction entre a_1, a_2 et a_3 ,
 a_{124} = l'interaction entre a_1, a_2 et a_4 ,
 a_{134} = l'interaction entre a_1, a_3 et a_4 ,
 a_{234} = l'interaction entre a_2, a_3 et a_4 ,
 a_{1234} = l'interaction entre a_1, a_2, a_3 et a_4 ,

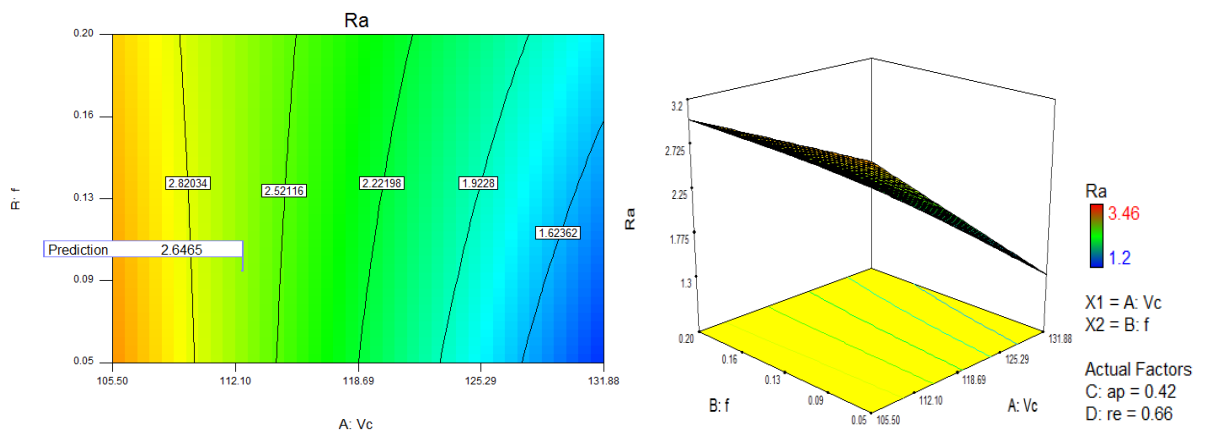


Figure IV.15 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et de la vitesse de coupe « Vc »

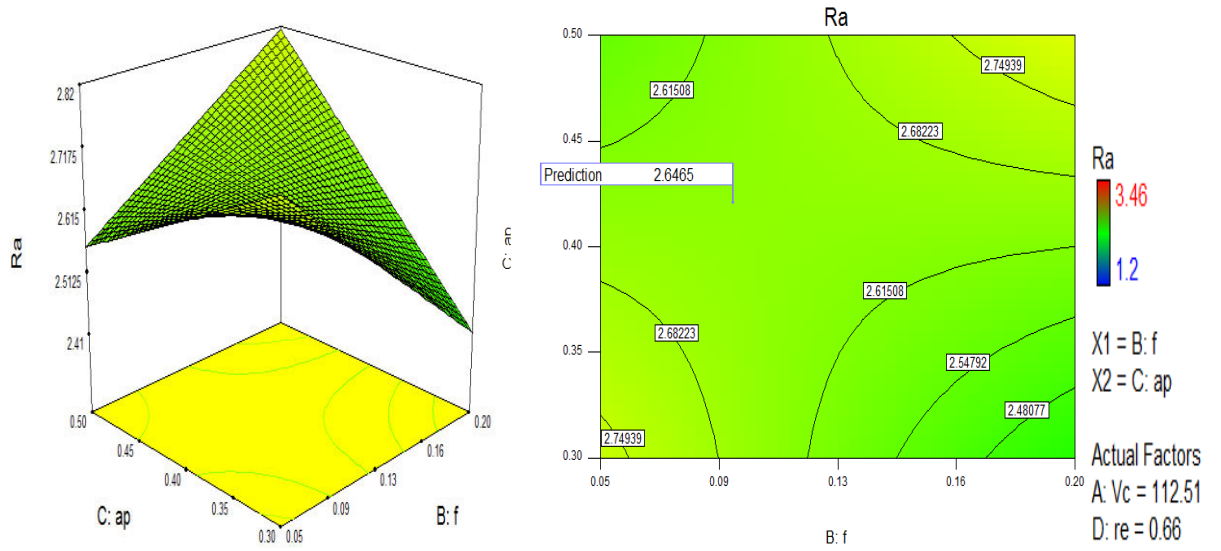


Figure IV.16 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et de la profondeur de passe « a_p »

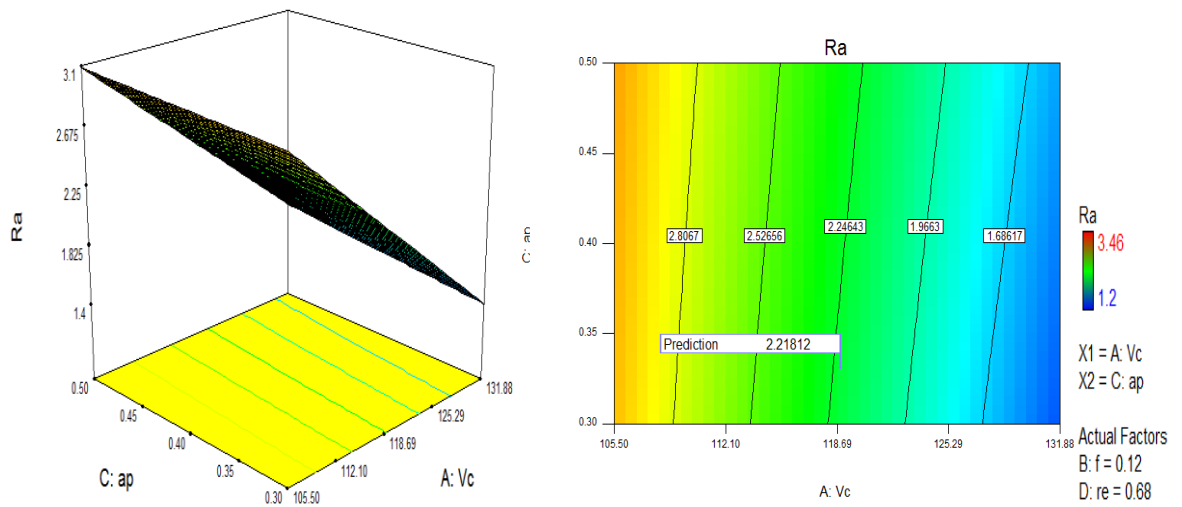


Figure IV.17 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de la profondeur de passe « a_p » et de la vitesse de coupe « V_c »

IV.6/ INTERPRETATION DES RESULTATS :

On peut conclure que :

- La rugosité tend à diminuer pour une vitesse fixée à $V_c=105.50$ m/min (niveau bas) avec une profondeur de passe "a" qui augmente, et une avance "f" qui varie autour de sa valeur moyenne.
- Lorsque la profondeur de passe "a" augmente, et pour les valeurs d'avance "f" moyennes, la rugosité est améliorée par rapport au cas précédant. Mais pour des valeurs d'avance élevées, et pour des faibles valeurs de profondeur de passe, la rugosité acquit des valeurs élevées.

Donc, l'augmentation de la vitesse, ainsi que celle de la profondeur de passe ont un effet bénéfique sur l'amélioration de la qualité de surface. A l'inverse, la forte augmentation de l'avance ainsi que sa diminution, agissent négativement.

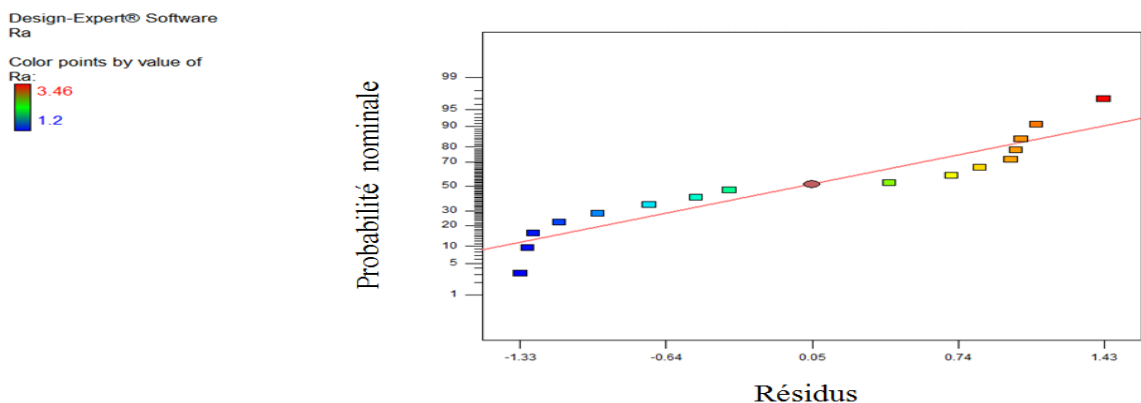


Figure IV.18 : Probabilité normale des résiduelles

La qualité de la surface des pièces usinées a une importance significative pour l'évaluation de la productivité des machines-outils (Sahin et Motorcu, 2005[39]).

Pour étudier et analyser la finition des pièces fabriquées, des modèles mathématiques sont utilisés.

Dans notre cas, la surface de réponse (RSM) est utilisée pour prédire la rugosité dans l'usinage de l'acier XC 48 par l'opération de dressage.

Le diagnostic de vérification du modèle est effectué à l'aide d'un tracé de la probabilité normale, La figure IV.18 montre ce tracé, qui est utilisé pour vérifier l'hypothèse de normalité.

Les résultats semblent suivre une ligne droite. Aucune preuve de l'anomalie où les variables non identifiées n'existe et par conséquent, on peut affirmer que les données sont normalement distribuées (Shew et Kwong, 2002) [40].

2^{ème} cas :avec vibration :

Pièces	Paramètres de coupe				Ra (µm)
	f (mm/tr)	a (mm)	Vc (m/min)	re (mm)	
1	0.05	0.3	42.39	0.4	3.78
2	0.05	0.3	42.39	0.8	6.5
3	0.05	0.5	52.75	1.2	7.88
4	0.2	0.5	52.75	0.4	4.82
5	0.2	0.5	52.75	0.8	6.87
6	0.05	0.3	42.39	1.2	5.01

Tableau IV.3:Les valeurs de Ra correspondantes aux régimes

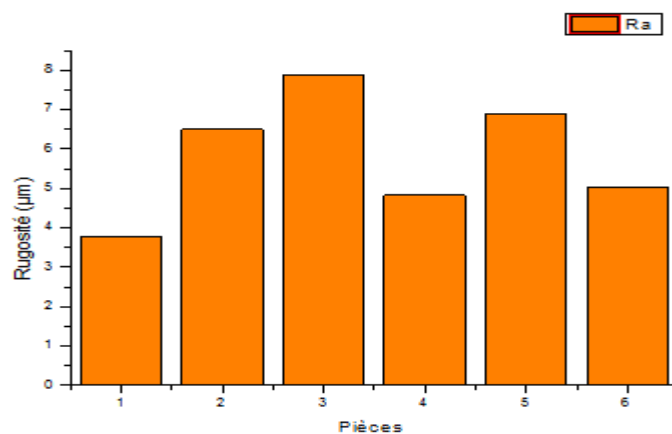


Figure IV.19 : Influence des paramètres de coupe sur la rugosité (avec vibration)

La figure IV.20 représente les surfaces obtenues lors de l'opération de dressage avec des différents régimes de coupe en prenant en considération les vibrations.

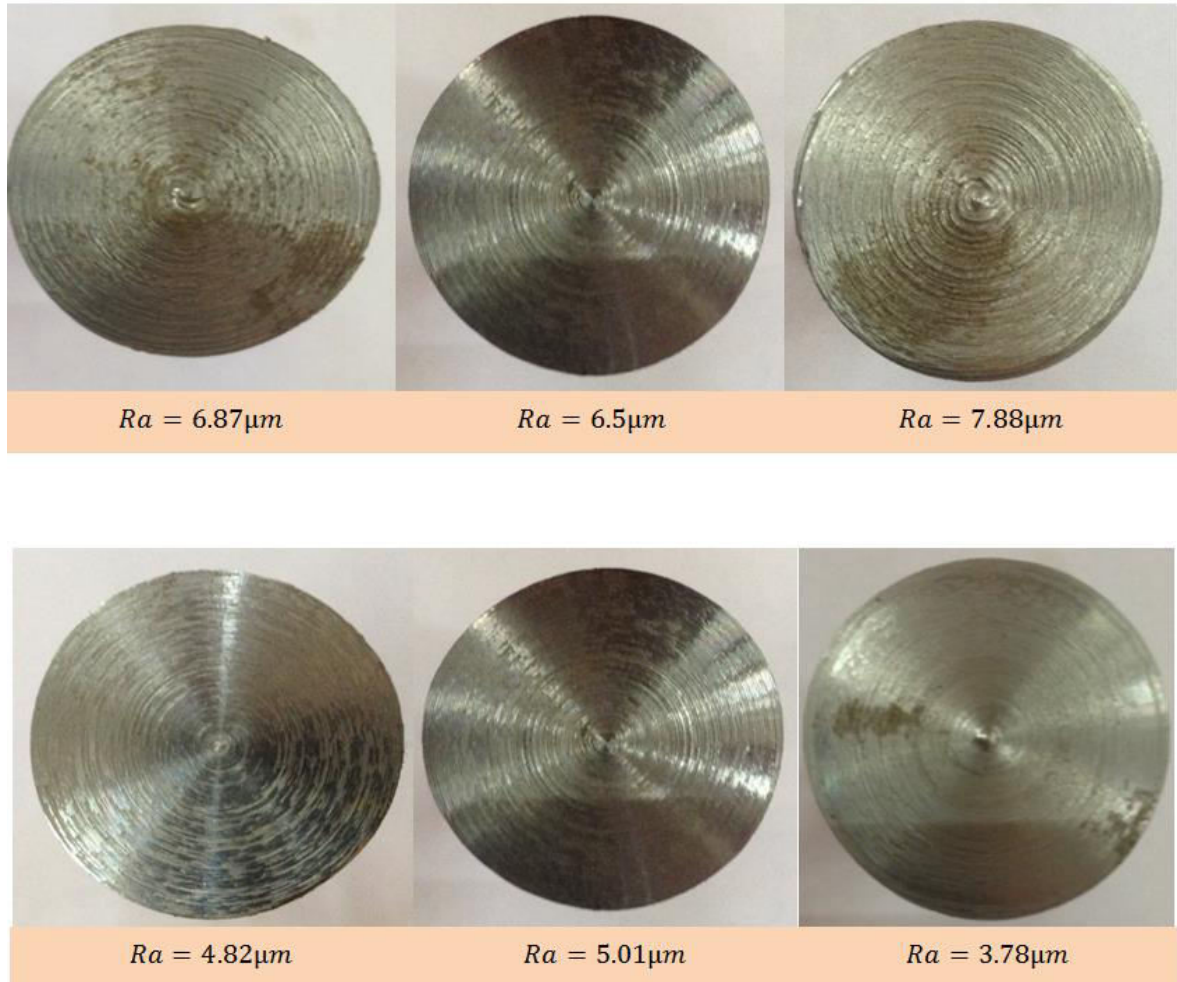


Figure IV.20 : Etats de surface des pièces usinées (avec vibration)

IV.7/ Régime de coupe :

Le régime de coupe a été choisi en fonction du matériau à usiner, de l'outil et des caractéristiques de la machine-outil.

- Profondeur de passe a_p : (0.3 – 0.5) mm
- Avance f : (0, 05- 0, 2) mm/tr
- Vitesse de coupe V_c : (42.39- 52.75) m/mn
- Rayon de bec r_e : (0.4-1.2)mm

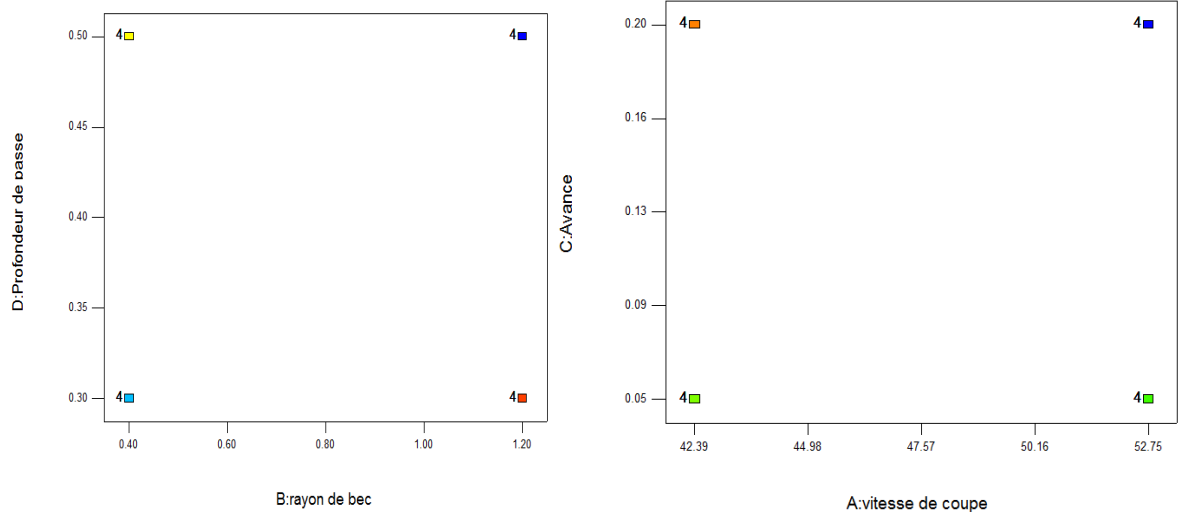


Figure IV.21 : Domaine d'étude des différents paramètres de coupe

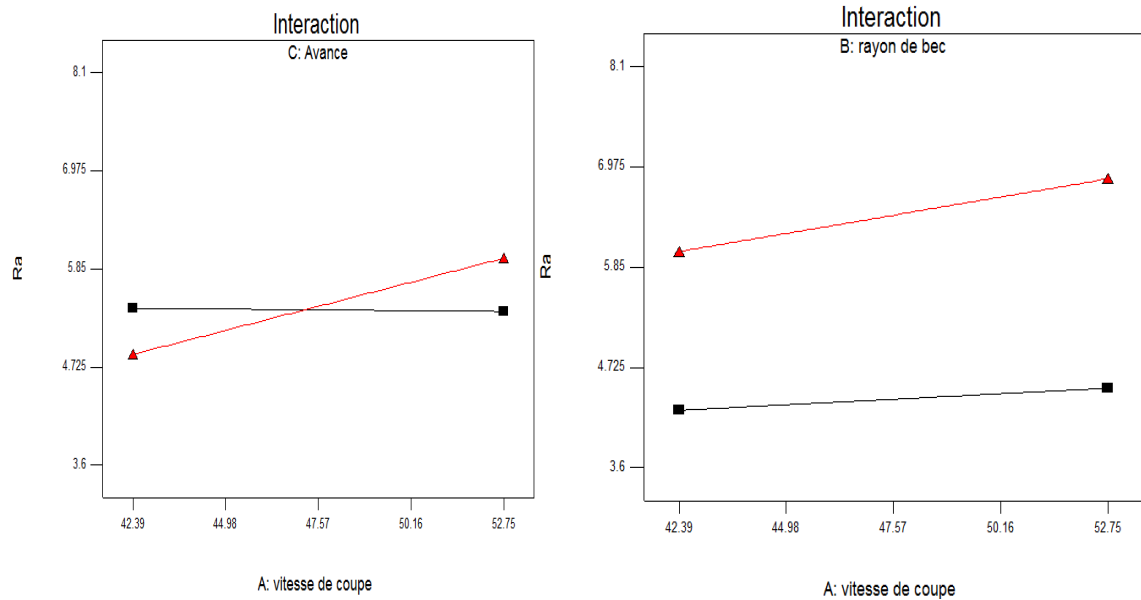


Figure IV.22: Interaction de l'avance et de la vitesse de coupe en fonction de la rugosité Ra

IV.8/Effet des paramètres d'usinage sur la surface de réponse :

Une analyse de variance de la rugosité de surface (Ra) a été faite avec pour objectif l'analyse de l'influence de la vitesse de coupe, la profondeur de passe, le rayon de bec et l'avance sur la pièce.

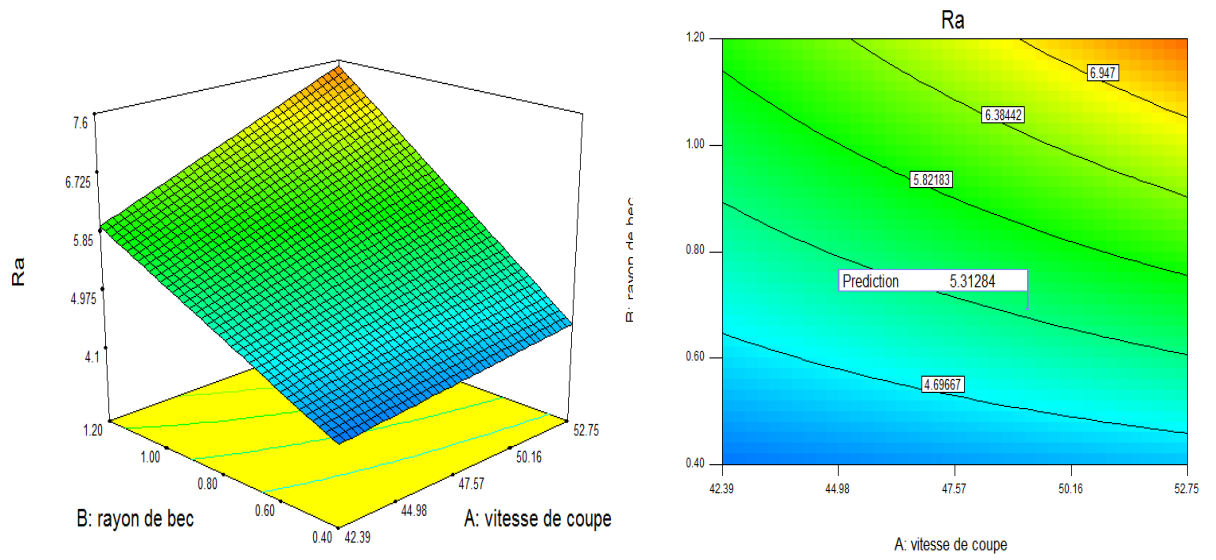


Figure IV.23: Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de rayon de bec "re" et de la vitesse de coupe « V_c »

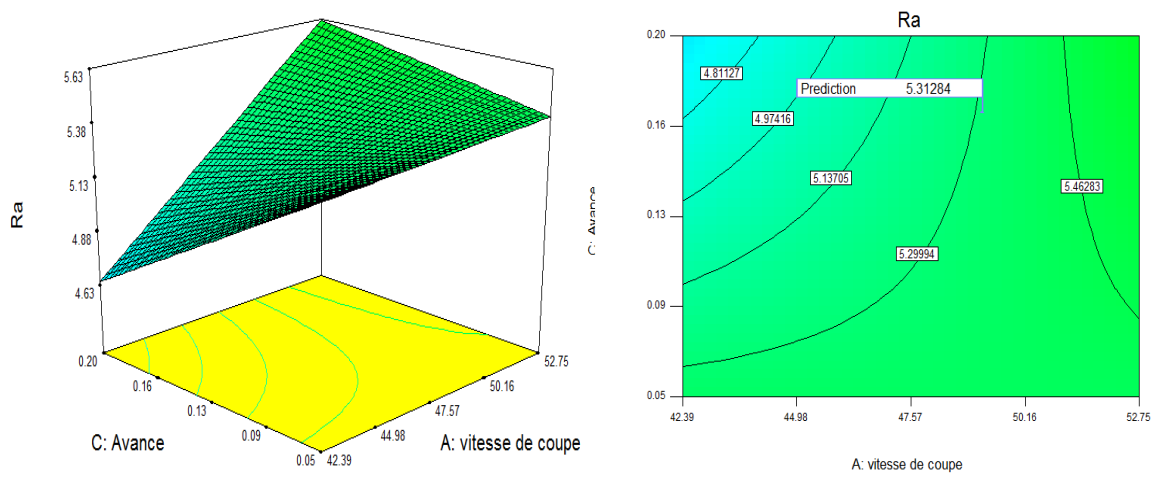


Figure IV.24: Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et de la vitesse de coupe « V_c »

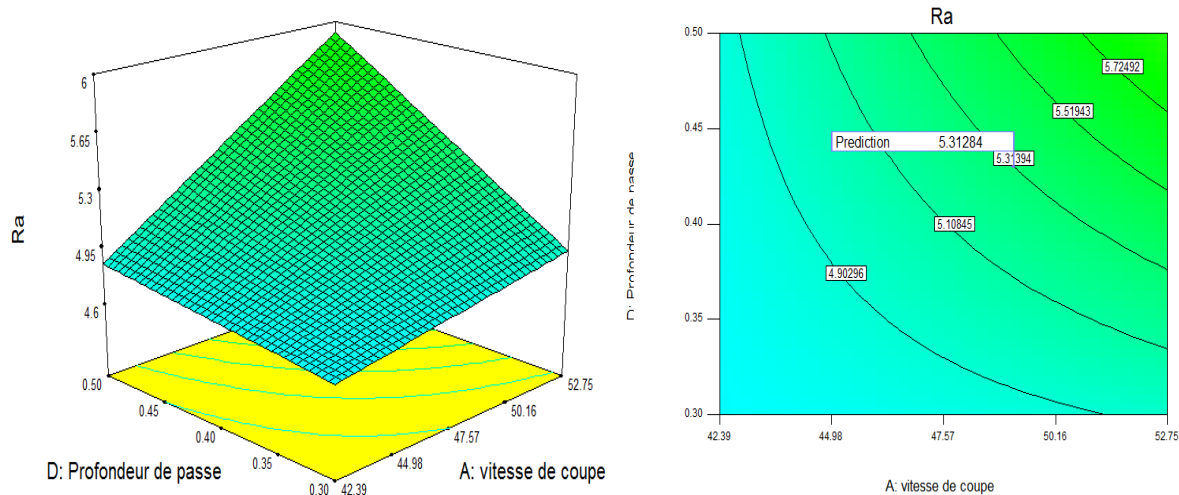


Figure IV.25: Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de rugosité en fonction de la profondeur de passe "ap" et de la vitesse de coupe « Vc »

La relation entre les facteurs et les performances des mesures a été modélisée par l'équation suivante :

$$Ra = 4.50 - 0.27x_1 + 1.03x_2 + 0.020x_3 + 0.59x_4 + 0.14x_1 \cdot x_2 + 0.29x_1 \cdot x_3 + 0.086x_1 \cdot x_4 + 0.18x_2 \cdot x_3 + 0.43x_2 \cdot x_4 - 0.4x_3 \cdot x_4 + 0.4x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.07x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.1x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0.3x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0.3x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \dots\dots\dots (IV.4)$$

IV.9/ INTERPRETATION DES RESULTATS :

Les paramètres de coupe qui influent sur la rugosité de surface Ra sont : l'avance par tour, la profondeur de passe, la vitesse de coupe et le rayon de bec.

Les graphes montrent une corrélation suffisante entre le modèle et les données expérimentales. L'interaction f*Vc est le facteur le plus influant sur les vibrations.

L'augmentation de l'avance et la profondeur de passe implique une augmentation de Ra.

IV.10/ CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de la méthode des plans d'expériences, un modèle mathématique a été développé pour modéliser un procédé d'usinage afin d'étudier l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le rayon de bec). Le but est de déterminer notre objectif à travers cet intervalle (minimum et maximum).

Les résultats sont presque confirmés. La rugosité tend à diminuer pour une vitesse fixée à $V_c=105.55$ m/min (niveau bas) avec une profondeur de passe "ap" qui augmente, et une avance "f" qui varie autour de sa valeur moyenne. Ainsi donc, la variation de la vitesse ainsi que celle de la profondeur de passe ont un effet bénéfique sur l'amélioration de la qualité de surface.

Conclusion générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à optimiser les conditions de coupe (cas de la rugosité) par l'application de la méthode des surfaces sur une pièce d'acier dur.

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.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique s'est consacrée sur le procédé de tournage du fait que notre travail s'est concentré sur une opération de dressage de ce procédé.

La troisième et quatrième partie de notre travail ont montré l'importance de la coupe des métaux qui parfois est difficilement réalisable car d'une part, elle dépend des 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 à l'obtention d'un mauvais état de surface.

Notre travail nous a permis de :

- Pour une opération de tournage (dressage), on a établi des corrélations fortes entre les vibrations auto-entretenues et les paramètres de coupe,

Par la méthode des plans d'expériences, on conclut que :

- L'augmentation de chacun des facteurs influant comme : la vitesse de rotation, l'avance, la profondeur de passe et le rayon de bec font augmenter la rugosité,
- Les faibles avances permettent de diminuer la rugosité.

Bibliographie

- [1] : M.Temmar, cours de fabrication mécanique , Département de Mécanique, Université SAAD DAHLAB de Blida, 2006.
- [2] : <http://iut-gmp-toulouse.upc-tlse.fr>.
- [3] : A.Toumine, cours d'usinage groupe conception production, INSA de Lyon,France.
- [4] : M.Balazinski, fabrication mécanique avancée, MEC 4530,école polytechnique de Monreale,CANADA.
- [5] : Y.Schotefs, S.Fournier et J.C.Leon, productique mécanique, edition Delagrave, 1994 France.
- [6] : R.Berghida, Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la geométrie des pieces mécaniques, mémoire de magister, Département de Génie Mécanique, Juin 2006.
- [7] : D.Gelin, M.Vicent, elements de fabrication, les editions Foucher, 1995.
- [8]. [9] : coupe des métaux, Pierozak-Jean Piere. Edition OPU Alger 1988.
- [10] : J.L. Fanchon, Guides des sciences et technologies industrielles.Edition Nathan Paris.France, 1994.
- [11] : L.Pimband, G.Layes et J.Moulin, guide pratique de l'usinage, Tome 1 edition Hachette.France 2003.
- [12]. [25] : E.J.Armarego, S.Verzut et P.Samara, the effects of coatings on the cutting process,friction forces and predictive cutting model in machining operations, Journal of Engineering Manufacture, n° 216 PP.347.356? 2002.
- [13] : W.Grzesik, Z.Zalish, and P.Niesloug .Friction and wear testing of multilayer coatings on carbide substrates for dry machining applications. Surface and coatings technology, 155:37-45.2002.
- [14] : La coupe des métaux, Pierre Bourdet (version V5 _ octobre 2004) Ecole normale sperieur De CACHAN CEDEX.
- [15] : Fabrication Mécanique, Tome I&II, R.Butin et M.pinot, edition Foucher Paris.
- [16]. [26] : N.S.Atcherkane, les machines travaillant par enlèvement de métal, société des publications mécaniques Paris.France.
- [17]. [18] : Fabrication mécanique Tome I&II, R.Butin et H.Pinot edition Foucher.Paris.
- [19]. [28] : J.M. Linares , J.M. Sprauel et C.Marty. Analyse du processus élémentaire de mesure Revue contrôle industriel n°205,P27.31,1997.
- [20]. [23] : A.Chevalier, guide du dessinateur industriel, Hachette Technique, Edition 2004.

- [21] : Wikipédia en cyclopédie libre [http://fr.wikipedia.org/wiki/AS%](http://fr.wikipedia.org/wiki/AS%20). Etat de surface catégorie usinage.
- [22] : Y.Schotefs, S.Fournier,j-j Leon, productique mécanique, Delagrave 1999.
- [24] : All cut instruments, principe de la mesure, www.mesures.com, www.allcut-biz.
- [27] : J.Boulanger, Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'état de surface Article B7010, Technique de l'ingénieur .1991.
- [29] : L.Gazal et R.Recordier, Erreurs de forme et de position, Article R.1220,technique de l'ingénieur 1991.
- [30] : C.Barlier et L.Grradin, memotech, productique matériaux et usinage.1995.
- [31] : C.F.Cheung W.B.Lee.A, theoretical and ewpermental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning, international Journal of machine tools et manufacture,(40)979-1002,2000.
- [32] : B.H.Amstread, P.F.oswald and M.L.Begeman, manufacturing processes, Jhon Wiley, New York, 8^{eme} edition, 1987.
- [33] : R.Younes, Etude de la stabilité des vibrations de l'usinage XIV^{eme} colloque <<vubration chocs et brent>>,Ecole centrale de Lyon.16,17,18 juin 2004.
- [34] : M.G. Vigier, pratique des plans d'experience, les editions d'organisation, pp190, 188.
- [35] : Jacques Goupy, plans d'expèrience pour surfaces de réponse edition Dunod,2001.
- [36] : E.P.George, Hunter G.William ,Hunter.J, Stuart, Jhon. Wiley << Statistics For Expérimenters >> , Deuxieme edition New York 2005.
- [37]. [38] : Jacques Goupy,Tutorial<<les plans d'expériences >> Revue Modulas,2006.
- [39] : Sahin, Y.Motorcuriza, A (2005) surface roughness model for machining mildsteel, Materials et Design , 26-321-326.
- [40] : Shew, Y.W,Kwong 2002 optimisation of the plated through hole process using experimental design and reponse surface methodology international Journal of Advanced Manufacturing technology, 20.758-764.