

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITE de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire**

en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE MECANIQUE

Spécialité : CONCEPTION MECANIQUE

**ETUDE DES EFFETS  
THERMOMECHANIQUE A  
L'INTERFACE OUTIL DE COUPE-  
PIECE**

Présenté par :

Mr : ROUIBI Mohamed Mondhir

Encadré par :

Dr : TEMMER Mustapha

Melle : MELZI Nesrine

Année universitaire : 2015/2016

## **SOMMAIRE :**

<b>RMERCIMENT .....</b>	<b>4</b>
<b>DEDICASE .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>7</b>
<b>I/ Chapitre I Généralités sur l'usinage et le procédé de tournage .....</b>	<b>8</b>
<b>I.1/ EVOLUTION DU MATERIEL D'USINAGE.....</b>	<b>9</b>
<b>I.1.1/ GRANDES ETAPES DU PROGRES TECHNIQUE DANS LE DOMAINE DE L'USINAGE .....</b>	<b>9</b>
<b>I.1.2/ MACHINES SEMI-AUTOMATIQUES .....</b>	<b>9</b>
<b>I.1.3/ MACHINES AUTOMATIQUES :.....</b>	<b>10</b>
<b>I.1.4/ MACHINES AUTOMATIQUES SPECIALES :.....</b>	<b>10</b>
<b>I.2/DIFFERENTS PROCÉDES : .....</b>	<b>11</b>
<b>I.3/ETUDE DE L'ORDRE LOGIQUE D'USINAGE : .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.1/ETUDE DE FABRICATION :... ..</b>	<b>13</b>
<b>I.3.2/ PREPARATION D'UNE PRODUCTION :.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4/ TEMPS D'USINAGE :.....</b>	<b>15</b>
<b>II Chapitre :_PROCEDE DE TOURNAGE .....</b>	<b>17</b>
<b>I.5/ PROCEDE DE TOURNAGE : .....</b>	<b>18</b>
<b>I.5.1/ PRINCIPE DU TOURNAGE :.....</b>	<b>18</b>
<b>I.5.2/ LE TOUR : .....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.3/ LES DIFFERENTES OPERATIONS D'USINAGE : .....</b>	<b>20</b>
<b>I.5.4/ LES DIFFERENTS MONTAGES :.....</b>	<b>23</b>
<b>I.5.5/ L'OUTIL :.....</b>	<b>24</b>
<b>I.5.6/ FORMATION DU COPEAU :.....</b>	<b>27</b>
<b>Chapitre III :GENERALITES SUR L'USINAGE A GRANDE VITESSE (UGV)...</b>	<b>30</b>
<b>III.1 / Les caractéristiques de l'usinage à grande vitesse .....</b>	<b>31</b>
<b>III.1.1 / La vitesse de coupe .....</b>	<b>31</b>
<b>III.1.2 / Le phénomène de coupe .....</b>	<b>32</b>
<b>III.1.3/ Les phénomènes thermiques .....</b>	<b>34</b>

III.1.4/ Les efforts de coupe.....	35
III.2/ Les moyens .....	37
III.3/ Conclusion .....	38
Chapitre IV : Présentation et validation du modèle de coupe orthogonal de molinari et al : (depuis 1992).....	39
IV.1/ INTRODUCTION : .....	40
IV .2/ loi de Molinari et Clifton 1983 .....	40
Chapitre V : Présentation Générale du Modèle et Simulation Numérique de la Coupe orthogonale en 3D par la Méthode des Eléments Finis .....	46
V.1/ Introduction.....	47
V.2/ Application au modèle numérique .....	47
V.2.1/ Lois de comportement .....	47
V.2.2/ Comportement mécanique de la pièce.....	48
V.2.3/ Critère d'endommagement de Johnson-Cook .....	48
V.3/ Modélisation .....	49
V.3.1/ Modélisation de l'outil de coupe .....	49
V.3.2/ Modélisation de la pièce à usiner .....	49
V.3.3/ Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce et de l'outil .....	49
V.3.4/ Conditions aux limites et chargement .....	50
V.3.5/ Le maillage et la gestion de contact .....	50
V.4/ Résultats de la simulation .....	51
V.5/ Conclusion .....	53
Conclusion Générale :.....	54
ANNEXE ANSYS .....	55
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : .....	58

## **Liste de figures :**

<b><u>Figure I.1</u></b> : Les différents procédés .....	11
<b><u>Figure II.1</u></b> : Procédé de tournage .....	18
<b><u>Figure II.2</u></b> : Constitution d'un tour parallèle .....	19
<b><u>Figure II.3</u></b> : Opérations de base en tournage .....	21
<b><u>Figure II.4</u></b> : Opérations d'usinage.....	22
<b><u>Figure II.5</u></b> : Opération de dressage d'un tube .....	23
<b><u>Figure II.6</u></b> : Montage en lunette.....	24
<b><u>Figure II.7</u></b> : Angles de coupe.....	25
<b><u>Figure II.8</u></b> : Influence du rayon du bec de l'outil sur la surface à usinée.....	25
<b><u>Figure II.9</u></b> : Formes variées de plaquettes.....	26
<b><u>Figure II.10</u></b> : Différentes porte-plaquettes pour une même plaquette.....	27
<b><u>Figure II.11</u></b> : Copeau continu .....	28
<b><u>Figure II.12</u></b> : Copeau cisailé.....	28
<b><u>Figure II.13</u></b> : Copeau discontinu .....	29
<b><u>Figure III.1</u></b> : Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux.....	31
<b><u>Figure III.2</u></b> : Evolution des copeaux suivant la vitesse de coupe.....	32
<b><u>Figure III.3</u></b> : Formation du copeau en usinage conventionnel.....	32
<b><u>Figure III.4</u></b> : Représentation schématique de la formation d'une lamelle de copeau.....	33
<b><u>Figure III.5</u></b> : Détail de la formation du copeau en UGV.....	33
<b><u>Figure III.6</u></b> : Carte thermique d'un outil pour différentes vitesses de coupe.....	35
<b><u>Figure III.7</u></b> : Variation des efforts de coupe (N/mm de profondeur de passe) en fonction de la vitesse d'avance (à gauche) et de la vitesse de coupe (à droite).....	36
<b><u>Figure III.8</u></b> : Une machine UGV 4 axes dans un environnement scolaire.....	37
<b><u>Figure V.1</u></b> : modélisation de la coupe orthogonale 3D par Ansys.....	50
<b><u>Figure V.2</u></b> : Méthode appliquée pour le contact outil / pièce.....	51
<b><u>Figure V.3</u></b> : la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ( $V_c=300\text{m/min}$ and $f=0,4\text{mm/tr}$ ).....	51
<b><u>Figure V.4</u></b> :la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ( $V_c=120\text{m/min}$ et $f=0,2\text{mm/tr}$ ).....	52
<b><u>Figure V.5</u></b> : 3D Chip form of XC48 under different cutting conditions.....	53

## **LISTE DES TABLEAUX :**

**Tableau II.1** : Symbole et désignation des formes du bac d'un outil de tournage .....26

**Tableau V.1**: Paramètres de la loi de comportement de l'acier XC48.....49

**Tableau V.2** : Critère d'endommagement Johnson-Cook de l'acier XC48.....49

**Tableau V.3**:les propriétés thermomécaniques de matériau et de l'outil .....49

## Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida 01.

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

Je voudrais tout d'abord remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Je suis très reconnaissant au **Dr Temmar Mustapha**, mon promoteur, et **Mademoiselle Melzi Nesrine**, ma co-promotrice pour avoir accepté de diriger ce travail, et dont l'aide précieuse m'a été indispensable sur le plan scientifique et humain. Je leur présente également ma plus sincère gratitude pour la confiance et la sympathie qu'ils m'ont témoignés au cours de cette période de travail.

J'exprime toute ma gratitude à tous mes enseignants du Département de mécanique pour tout ce qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Aussi, j'exprime toute ma gratitude à **Monsieur Aggoun Hakim**, responsable de l'atelier d'usinage de notre département, et au personnel technique et administratif de notre département.

## Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

A mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A ma grand-mère Ourida pour sa douceur et sa gentillesse.

A mes sœurs, mon frère ainsi qu'à mon beau frère pour leur tendresse, leur complicité et leur présence

A mes tantes, mes oncles, mes cousines et mes cousins pour toute l'affection qu'ils m'ont donnés et pour leurs précieux encouragements.

A toute ma famille ainsi qu'à mes amis.

Au club scientifique Mécano qui ma vraiment aider durant ma formation.

## Introduction générale

La plupart des matériaux de l'industrie mécanique doivent subir au minimum une opération d'usinage dans leurs procédés de mise en forme. Dans le but de réduire les coûts concernant les essais d'usinage (le coût matière, le coût d'utilisation des machines) et d'optimiser la conception des plaquettes, l'utilisation de l'outil numérique devient incontournable.

La modélisation de l'usinage met en jeu à la fois des phénomènes thermiques, mécanique et tribologique. Différentes études ont proposé des modèles en 2D avec des modélisations couplées thermomécaniques comprenant des géométries relativement simple et permettant de récupérer comme résultats les efforts de coupe ainsi que la visualisation de la formation du copeau. Les lois de comportement utilisées suivent le modèle de Johnson-Cook.

L'objet principal de ce mémoire est l'étude des phénomènes de transfert thermique lors d'une opération d'usinage, et principalement la température de coupe, les grands gradients de températures qui se manifestent à l'interface outil/pièce/copeau ont une grande influence sur la durée de vie de l'outil, l'état de surface de pièce usinée, en effet, en usinage, les industriel sont adopté des paramètres de coupe plus sévères, UGV, une augmentation de la vitesse provoque une augmentation significative de la température (plus de 1000°C).

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 sera en chapitre II.

Le chapitre III sera consacré à l'usinage à grande vitesse et dans le chapitre IV on va Présenter et valider le modèle de la coupe orthogonal Molinari et al (1992).

Le chapitre V comporte une présentation du modèle et simulation numérique de la coupe orthogonale en 3D par la méthode des éléments finis.



# **Chapitre I**

## **Généralités sur l'usinage**

## **I.1/ EVOLUTION DU MATERIEL D'USINAGE :**

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

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

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

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

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'autorégler.

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/ MACHINES SEMI-AUTOMATIQUES :**

Il y a semi-automatisme quand la chaîne des séquences automatiques est interrompue par des interventions manuelles : tours semi-automatiques à décolleter, machines à fraiser dites d'opération... sur ces machines, les avances rapides d'approche des outils sur la pièce ainsi que les arrêts en fin de course sont automatisés.

### **I.1.3/ MACHINES AUTOMATIQUES :**

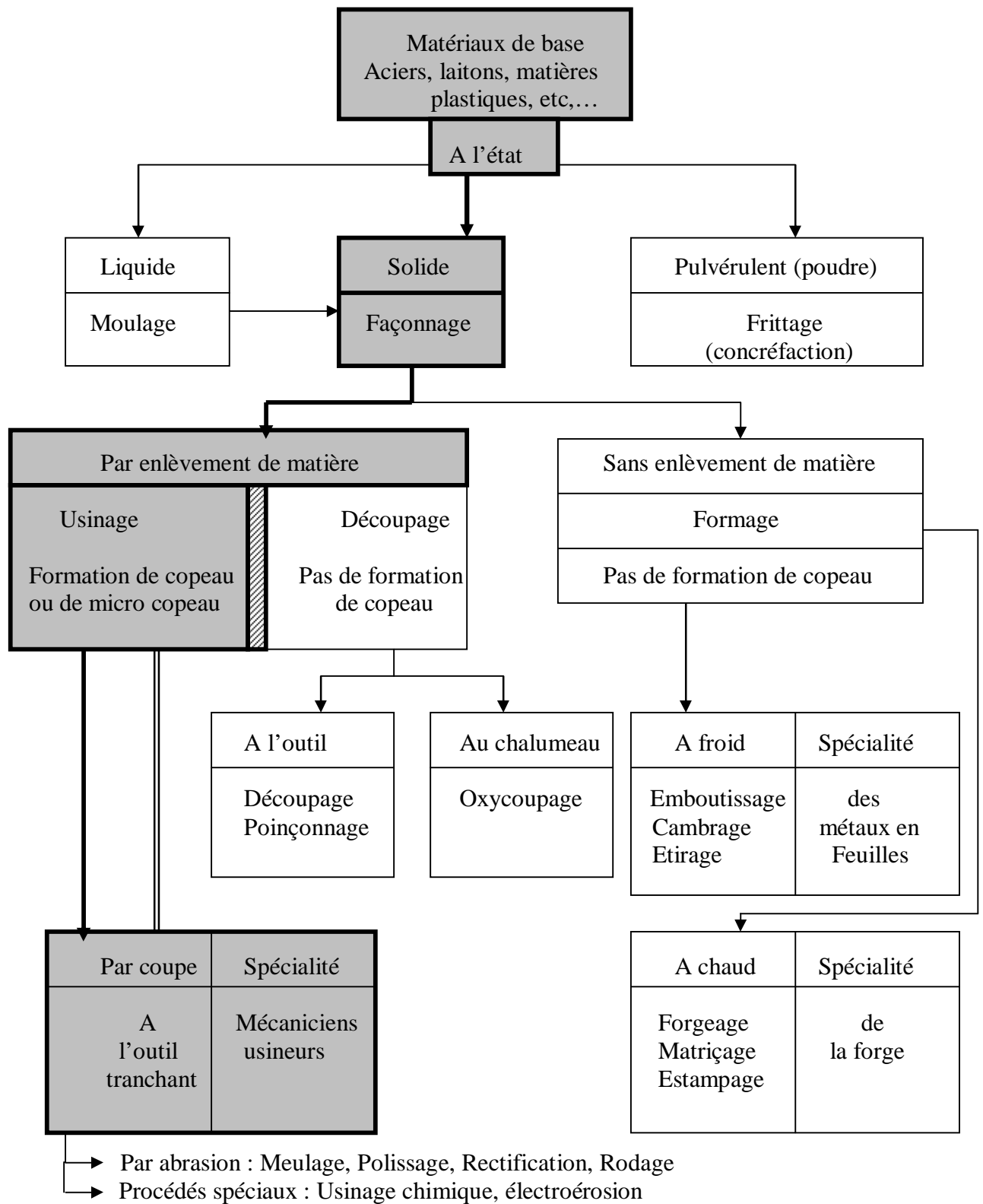
Il y a automatisme total lorsque la production de la machine-outil est assurée sans intervention manuelle autre que l'alimentation en vrac des pièces brutes dans un porte-pièce à chargement automatique.

Exemple : machines-outils à copier, machines-transferts, machines à commande numérique,...

### **I.1.4/ MACHINES AUTOMATIQUES SPECIALES :**

Les machines automatiques spéciales sont des machines-outils conçues pour usiner des formes spéciales non planes ni de révolution, telles que : machines à tailler les engrenages, tailleuses d'engrenages cylindriques, tailleuses d'engrenage coniques, machines à brocher,...

## I.2/DIFFERENTS PROCEDES :



**Figure I.1 :** 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 : [2]

- 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).

$$T_t = L / a.n$$

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 chronoanalyse avec jugement d'allure.

Les Observations Instantanées (OI) de Tippett;

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

# **Chapitre II :**

## **Procédé de tournage**

## II.1/ 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).

### II.1.1/ PRINCIPE DU TOURNAGE :

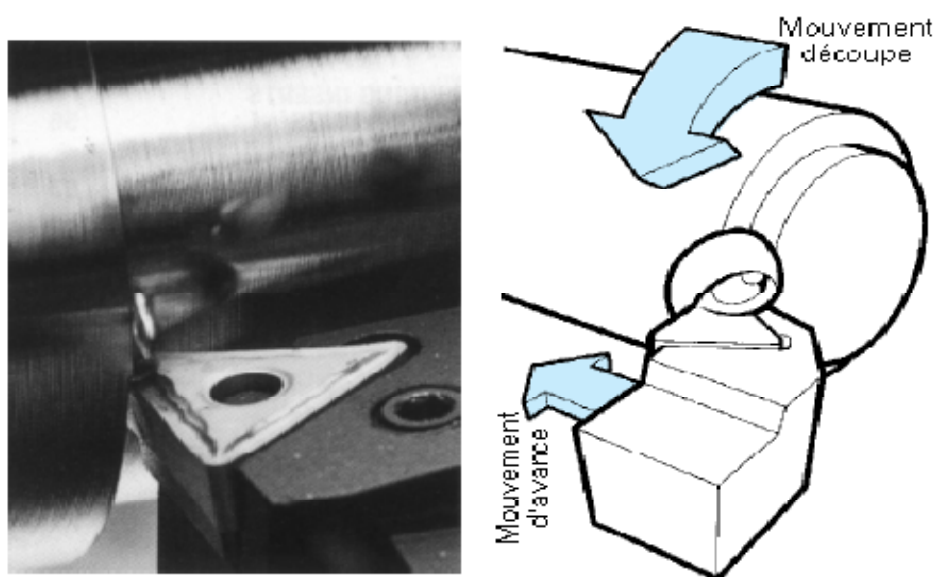
La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme ( $M_c$ ) et est généralement tenue par le mandrin. [3]

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 II.1 représente le procédé de tournage.



**Figure II.1 :** Procédé de tournage

## II.1.2/ LE TOUR :

Le type de machine utilisé en tournage est le tour. [4]

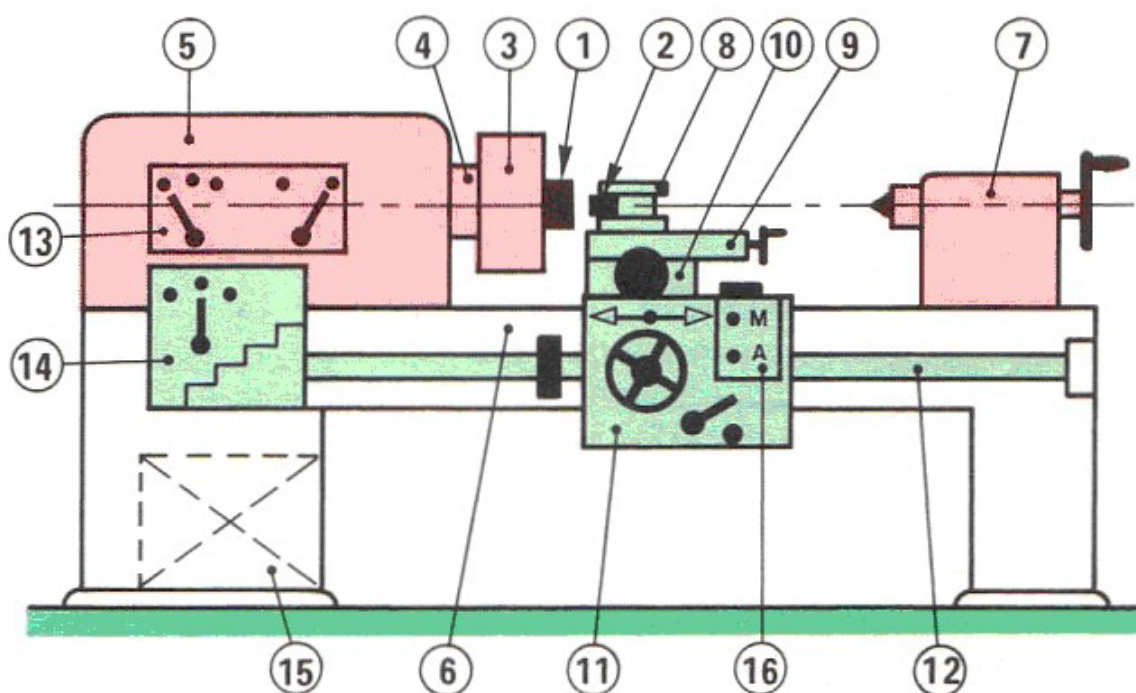
Les tours permettent de réaliser des surfaces hélicoïdales (filetage) et des surfaces de révolution: cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale des ces machines est l'usinage des arbres.

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

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

On trouve :

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



**Figure II.2 :** Constitution d'un tour parallèle

**Avec :**

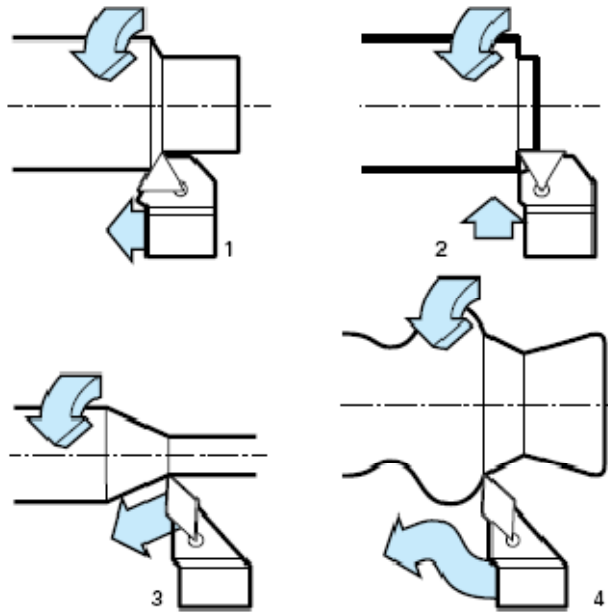
- 1 = Pièce
- 2 = Outil
- 3 = Mandrin
- 4 = Broche
- 5 = Poupée fixe
- 6 = Banc
- 7 = Poupée mobile
- 8 = Tourelle porte-outils
- 9 = Chariot supérieur
- 10 = Chariot transversal
- 11 = Trainard
- 12 = Barre de chariotage
- 13 = Boite des vitesses
- 14 = Boite des avances
- 15 = Moteur
- 16 = Contacteur

**II.1.3/ LES DIFFERENTES OPERATIONS D'USINAGE :**

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

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

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



**Figure II.3 :** Opérations de base en tournage

**1. En chariotage**, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.

**2. En dressage**, le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe.

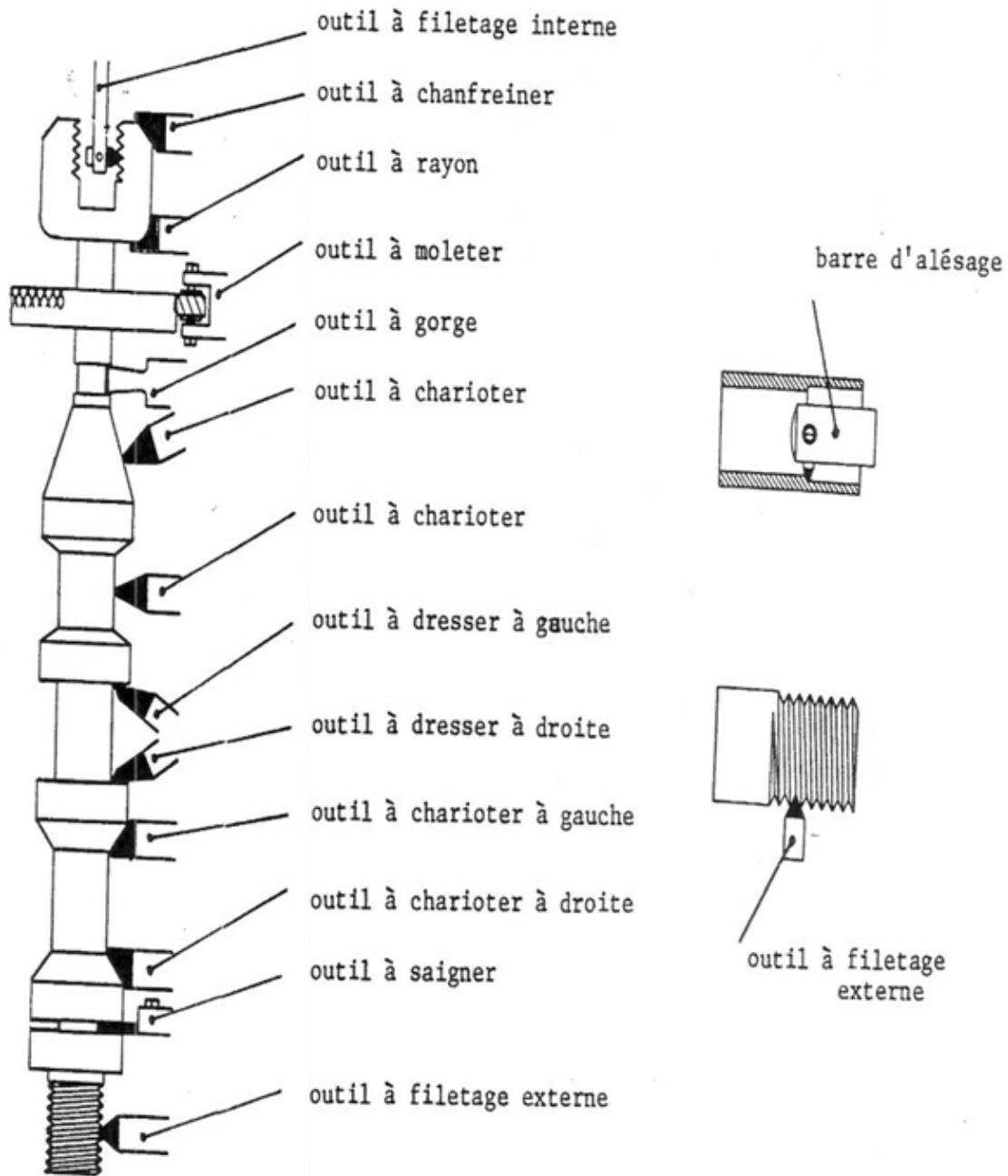
**3. En combinant les deux types de déplacements** précédents (avance de l'outil en translation rectiligne oblique/axe), on génère des cônes de révolution.

**4.** Enfin, en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque (profil de **contournage**), on peut obtenir une forme de révolution quelconque. Ces différentes opérations correspondent à un usinage dit « de génération » ou « d'enveloppe » : la forme obtenue, à l'échelle macrogéométrique, ne doit rien à la forme de l'outil qui l'a générée.

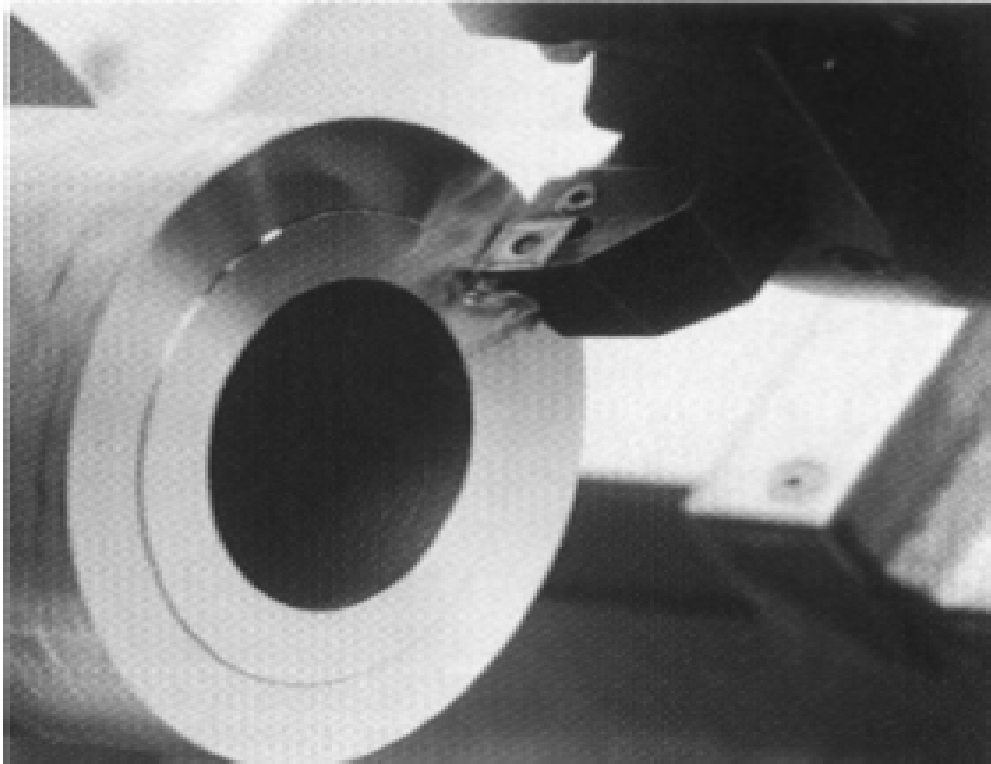
En d'autres termes, la forme obtenue dépend uniquement de la trajectoire de l'outil, à la rugosité près.

À l'opposé, les gorges, filetages, etc., sont obtenues par reproduction dans la pièce du profil de l'outil et sont qualifiés d'usinage « de forme ».

La figure II.4 représente les opérations d'usinage.



**Figure II.4 :** Opérations d'usinage



**Figure II.5 :** Opération de dressage d'un tube

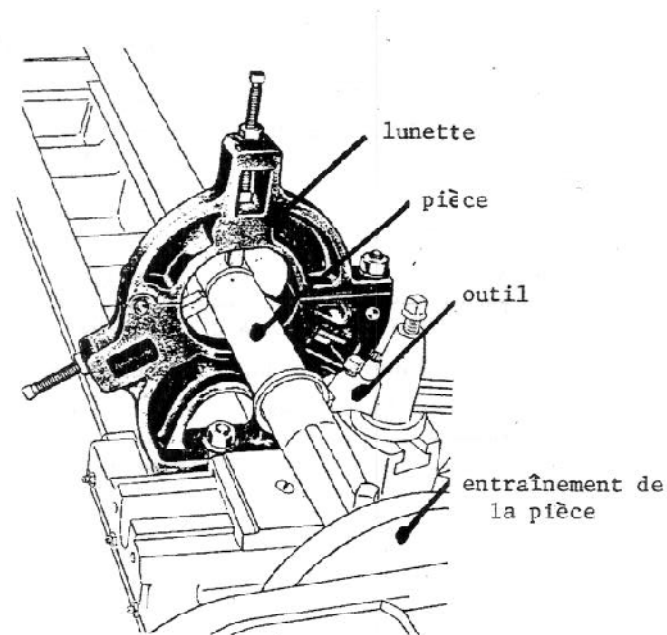
## **II.2/ LES DIFFERENTS MONTAGES :**

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 II.6 illustre un des différents montages à savoir le montage en lunette.



**Figure II.6:** Montage en lunette

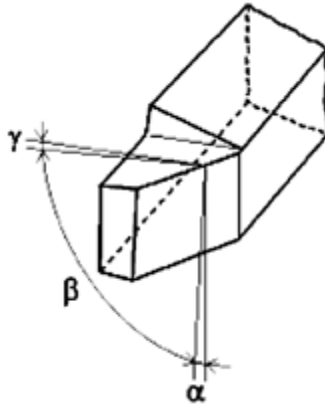
### **II.3/ L'OUTIL :**

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. [5].

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

- Angle de dépouille  $\alpha$ ,
- Angle de taillant  $\beta$ ,
- Angle de coupe  $\gamma$ ,
- Angle d'inclinaison de l'arête  $\lambda$ ,
- Angle de direction de l'arête  $\chi_r$ ,
- Angle de direction complémentaire  $\psi_r$ ,
- Angle de pointe  $\zeta_r$ .



**Figure II.7 :** Angles de coupe

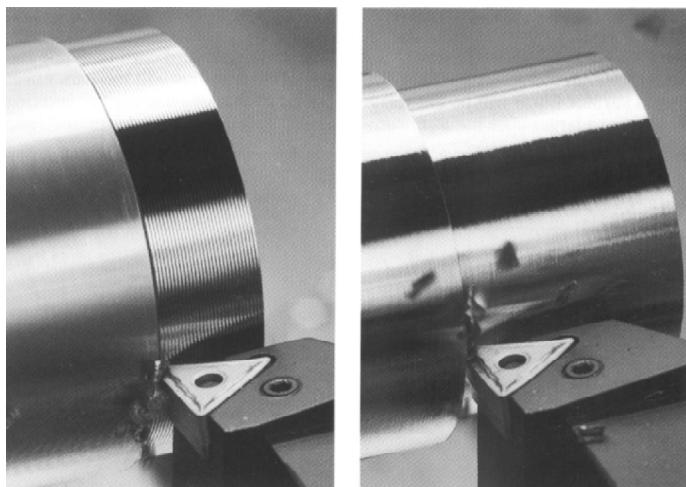
En tournage, la forme du bec influence l'état de surface. Le choix du rayon de bec est fonction de l'opération à effectuer : ébauche ou finition.

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

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

Ainsi, les principales formes sont :

- Intersection vive,
- Rayon,
- Plat.



**Figure II.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
$r_\epsilon$	<b>Rayon nominal de l'arrondi du bec</b>
$b_\epsilon$	<b>Largeur nominale du chanfrein du bec</b>

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

### **Exemple de choix d'un outil de coupe a plaquette rapportée :**

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. [6]

La figure II.9 représente les formes variées de plaquettes.



**Figure II.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 :

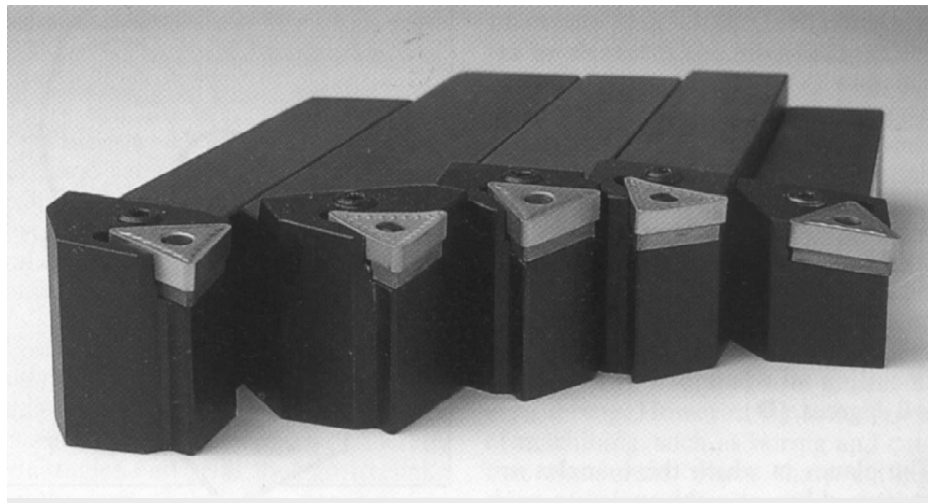
- Matière de la pièce, usinabilité,
- Configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage,
- Limitations : tolérances, état de surface,
- Machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques,

- 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 II.10



**Figure II.10 :** Différentes portes-plaquettes pour une même plaquette.

### I.5.6/ 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.

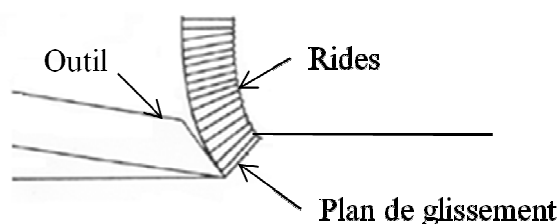
La déformation plastique s'accompagne d'un échauffement important et d'une modification des propriétés du métal. Cette modification rend le métal plus dur, on dit que le métal est écrou.

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.

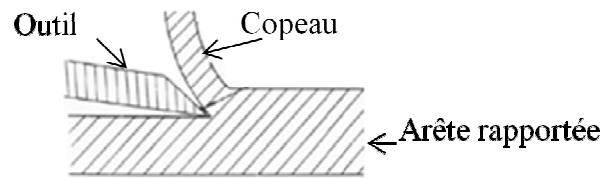
On obtient aussi le copeau fragmenté produit par l'usinage de métaux peu plastiques (fontes, bronzes,...).

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



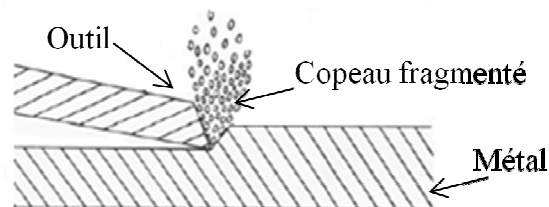
**Figure II.11:** Copeau continu

- **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 II.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 II.13 :** Copeau discontinu

**Chapitre III :**  
**Généralités sur l'usinage à grande vitesse**  
**(UGV)**

### III.1 / Les caractéristiques de l'usinage à grande vitesse

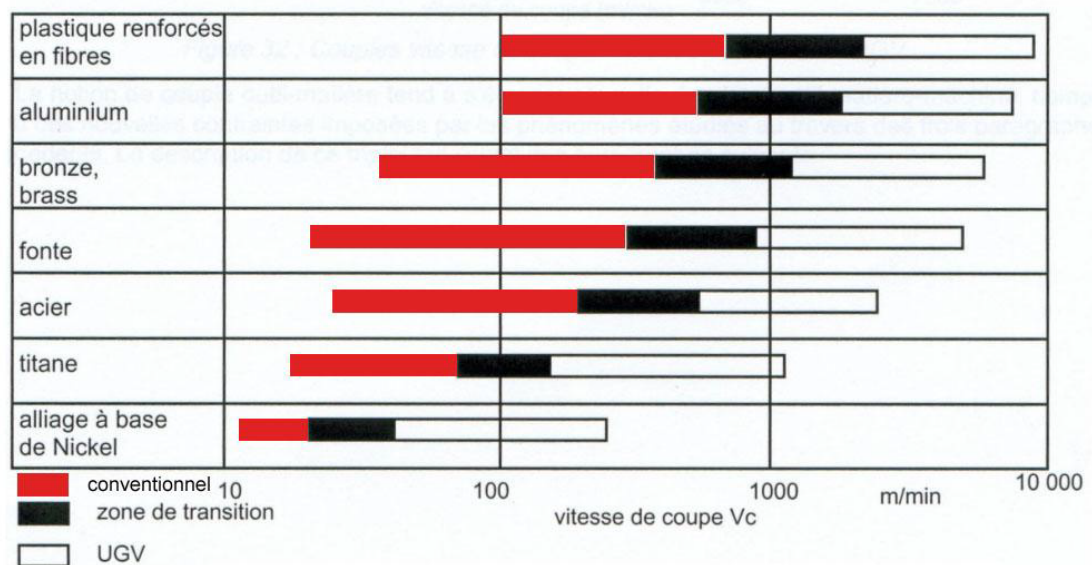
L'usinage grande vitesse (UGV) est une opération d'enlèvement de matière à des vitesses de coupe élevées. Ces grandes vitesses engendrent un phénomène de coupe spécifique.

#### **II.1.1 / La vitesse de coupe**

Il est aujourd'hui possible d'usiner des pièces mécaniques sur de larges plages de vitesses de coupe. Selon le matériau utilisé, ces plages varient, mais il est toujours possible de distinguer trois zones de vitesses de coupe distinctes :

- une zone de vitesses correspondant à « l'Usinage Conventionnel »,
- une zone de vitesses inexploitable, parfois surnommée « Vallée de la mort », où les conditions de coupe sont dégradées (usure rapide de l'outil, mauvais état de surface...),
- une zone de vitesses de coupe correspondant à « l'Usinage Grande Vitesse ».

Par exemple, pour l'acier, l'usinage conventionnel correspond aux vitesses de coupe comprises entre 30 et 200 m/min, et l'UGV aux vitesses de coupe comprises entre 500 et 2000 m/min. Ces valeurs dépendent du matériau, et également de l'opération effectuée (fraisage, tournage...). La figure 1 donne quelques ordres de grandeur.



**Figure III.1 :** Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux

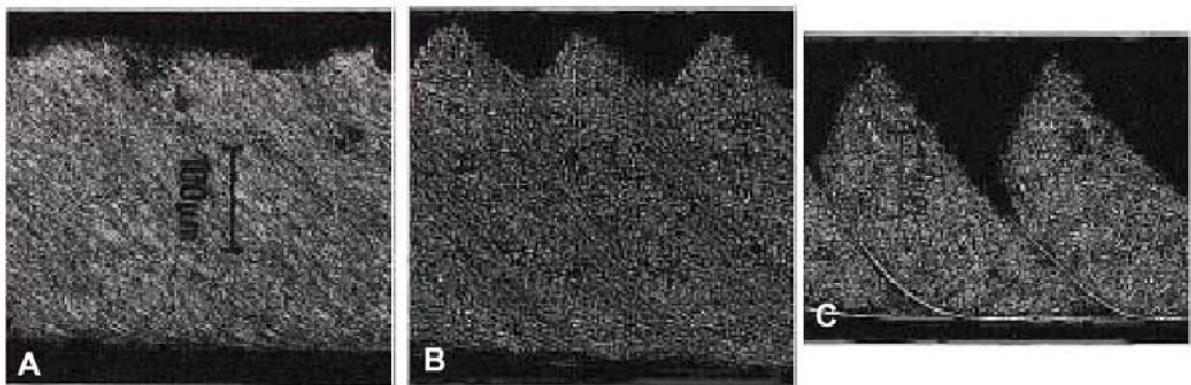


## II.1.2 / Le phénomène de coupe

L'UGV offre des conditions de coupe excellentes, qui s'expliquent par les phénomènes de formation du copeau.

### A / La discontinuité du copeau

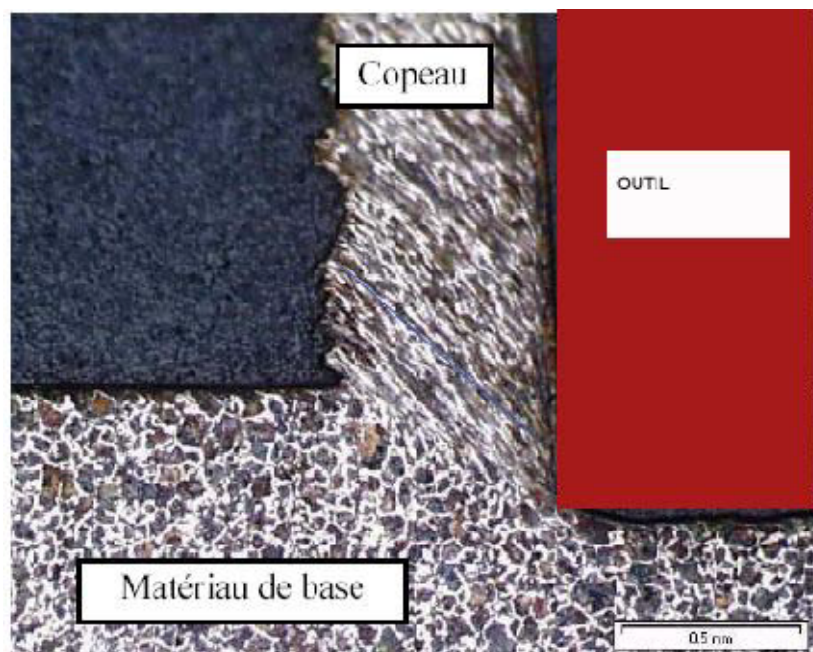
L'image ci-dessous montre le résultat d'un test courant appelé « Quick Stop Test » (la pointe de l'outil est retirée brutalement par un système explosif), qui permet d'étudier un copeau en cours de formation pour trois vitesses de coupe différentes.



**Figure III.2 :** Evolution des copeaux suivant la vitesse de coupe

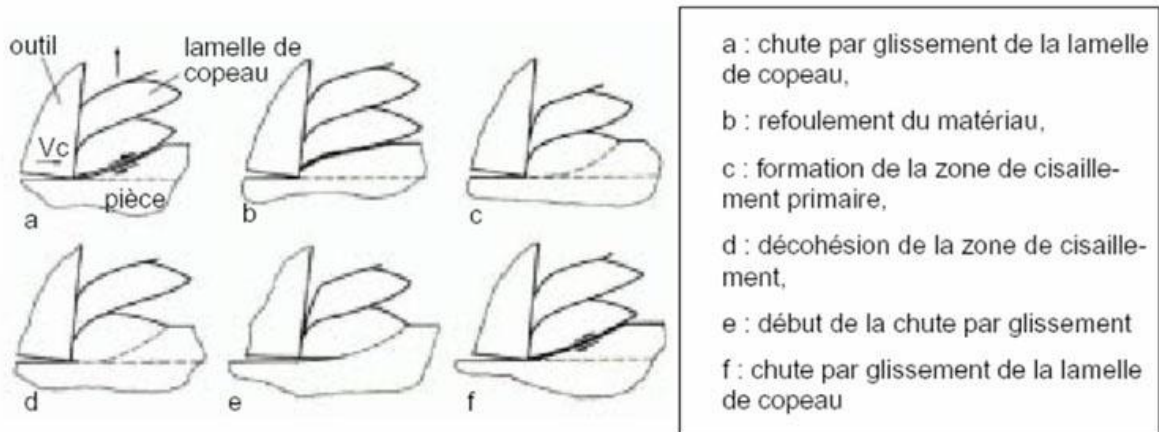
(A: copeau continu B; copeau segmenté C: copeau dentelé)

Pour les métaux, le processus de formation du copeau est principalement basé sur des déformations plastiques (permanentes) de cisaillement. Aux faibles vitesses de coupe, le copeau est continu et ces déformations sont quasi-stationnaires (figures 2A et 3).

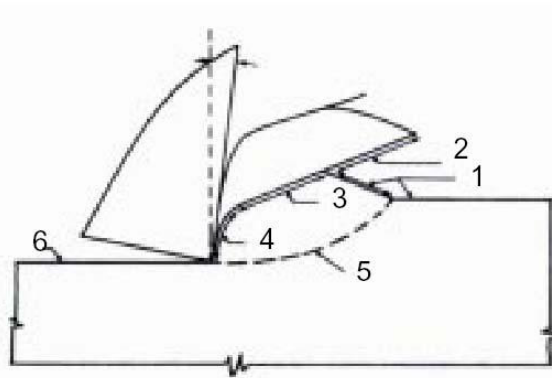


**Figure III 3 :** Formation du copeau en usinage conventionnel

Aux hautes vitesses de coupe, le copeau est dentelé et formé d'éléments séparés (figure 2C), ce qui semble être généré par une rupture du matériau plus que par un cisaillement. En UGV, des fragments de copeaux se détachent par la propagation de fissures, comme l'illustrent les figures 4 et 5.



**Figure III.4 :** Représentation schématique de la formation d'une lamelle de copeau



- 1 : surfaces non déformées,
- 2 : zone de la surface rompue par cisaillement catastrophique, séparée du segment suivant,
- 3 : bande de cisaillement intense due au cisaillement catastrophique pendant l'étape précédente,
- 4 : surface fortement cisailée.
- 5 : situation de la prochaine bande de cisaillement intense
- 6 : surface finie

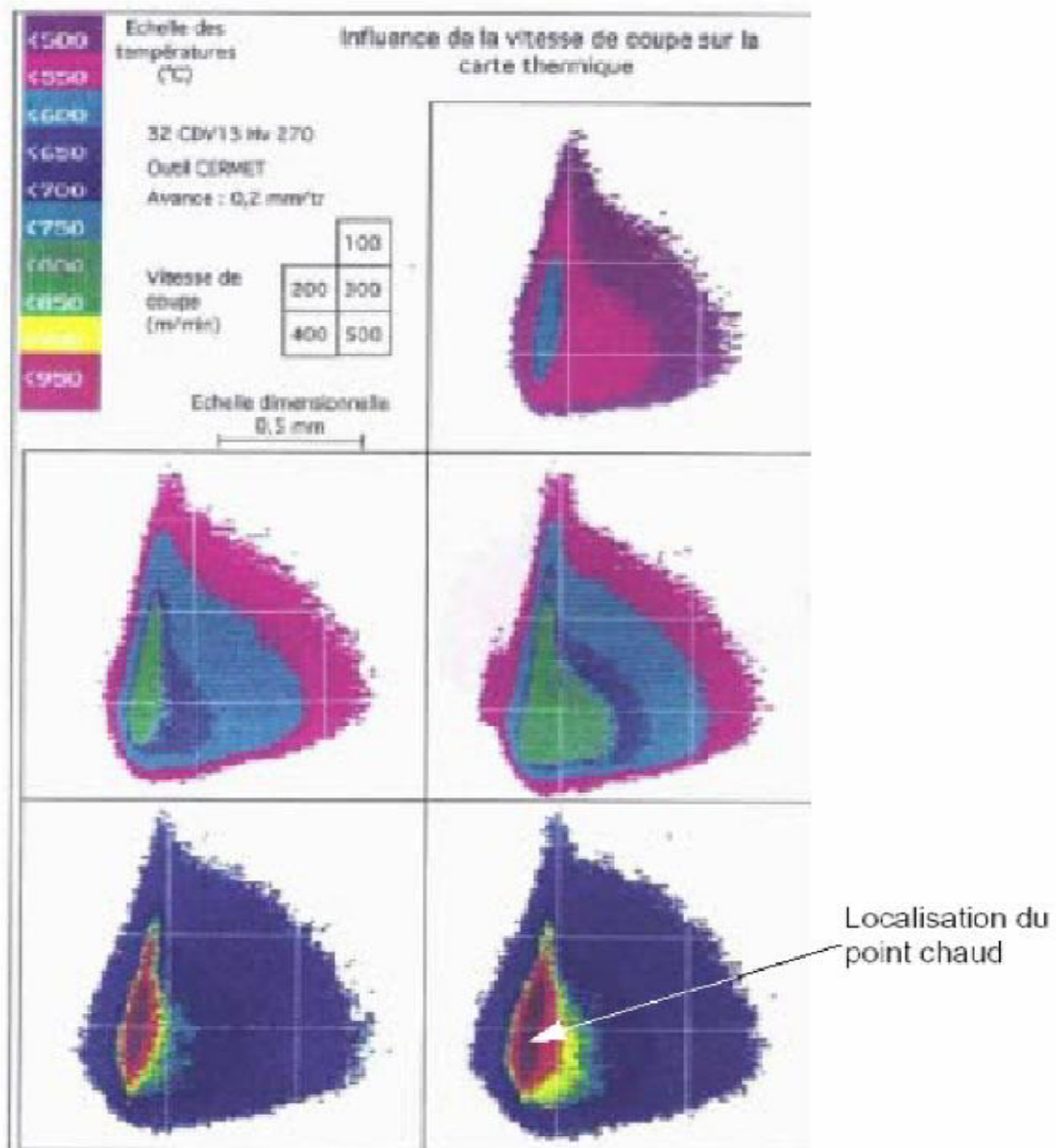
**Figure III.5 :** Détail de la formation du copeau en UGV

### III.1.3/ Les phénomènes thermiques

L'usinage génère de la chaleur par auto-échauffement du matériau de la pièce et par frottement à l'interface outil/pièce. Les phénomènes thermiques qui en résultent diffèrent entre les deux modes d'usinage.

- En usinage conventionnel, l'énergie calorifique s'évacue dans les copeaux mais également dans la pièce et l'outil dans des proportions non négligeables. Ainsi, le matériau subit un traitement thermique local (trempe superficielle) qui modifie les caractéristiques de la pièce finie.
- En UGV, les échanges thermiques entre le copeau et la pièce n'ont plus le temps d'avoir lieu : la pièce reste pratiquement à température ambiante bien que des énergies plus importantes soient mises en jeu, et l'énergie de la coupe s'évacue à plus de 80% dans les copeaux.

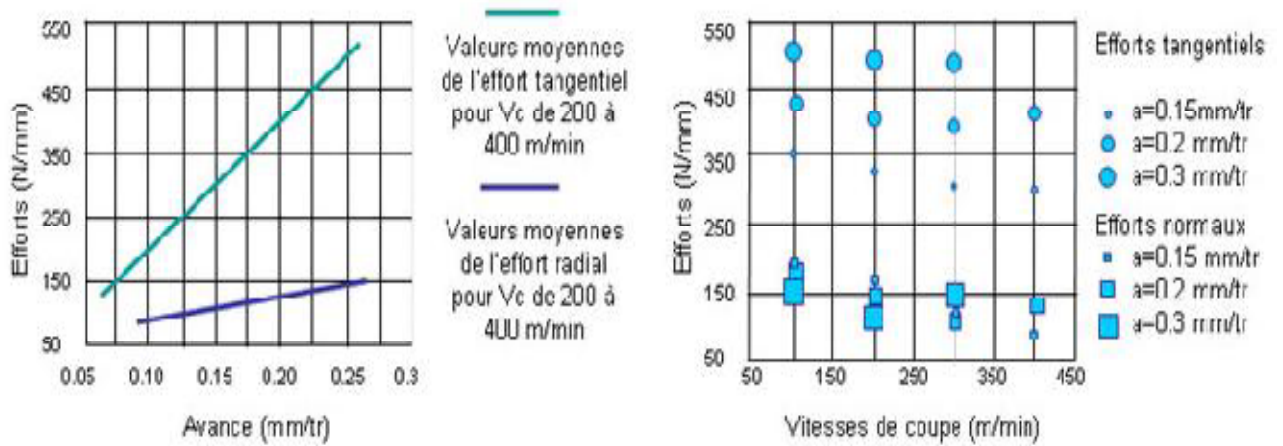
En outre, la température du « point chaud » situé à la pointe de l'outil diffère également : elle varie de 500°C en usinage conventionnel à 1000°C en UGV. Cette température élevée facilite la coupe des matériaux ductiles, car ceux-ci ont tendance à se ramollir localement. La figure 6 représente les résultats d'une simulation thermique de la coupe pour différentes vitesses de coupe (100 m/min en haut à droite, 500 m/min en bas à droite) ; on observe bien une augmentation de la température du point chaud avec la vitesse de coupe.



**Figure III.6 :** Carte thermique d'un outil pour différentes vitesses de coupe

### III.1.4/ Les efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. L'expérience montre qu'ils sont beaucoup plus sensibles à la vitesse d'avance qu'à la vitesse de coupe : pour toutes autres conditions de coupe égales, l'effort tangentiel augmente à peu près proportionnellement à la vitesse d'avance (figure 7, courbe de gauche) tandis que l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ ; voir figure 7, courbe de droite).



**Figure III.7 :** Variation des efforts de coupe (N/mm de profondeur de passe) en fonction de la vitesse d'avance (à gauche) et de la vitesse de coupe (à droite).

La puissance des broches des machines UGV a des limites. Pour ne pas devoir changer de gamme de puissances, il est nécessaire de réduire les efforts de coupe lorsque l'on augmente les vitesses de rotation de la broche. Pour réduire ces efforts tout en conservant un débit copeau élevé, on choisit généralement d'associer des profondeurs de passe faibles (pour diminuer les efforts) avec des vitesses d'avance élevées (pour augmenter le débit copeaux).

### III.2/ Les moyens

Les phénomènes spécifiques qui apparaissent en UGV et les niveaux atteints tant en vitesse angulaire de la broche qu'en niveaux d'accélération imposent l'utilisation de moyens spécialement dédiés pour l'UGV. Les éléments qui seront étudiés sont :

- la machine-outil (bâti, cinématique),
- la broche,
- les porte-outils et les outils,
- les porte-pièces,
- la commande, et l'environnement .



**Figure III.8** : Une machine UGV 4 axes dans un environnement scolaire.

### **III.3/ Conclusion**

L'UGV fait évoluer la manière de concevoir les pièces en permettant d'obtenir des formes jusqu'ici impossibles à réaliser par enlèvement de matière. Il permet aussi l'usinage de matériaux ayant subi un traitement thermique préalable.

L'UGV suppose par contre une adéquation complète entre produit, procédé et moyens. Certains incidents, vibrations ou ruptures d'outil, déjà gênants aux vitesses conventionnelles, prennent des proportions catastrophiques en UGV : les processus et outils de simulation doivent donc être adaptés pour garantir de bonnes conditions d'usinage.

# **Chapitre IV :**

## **Présentation et validation du modèle**



## **INTRODUCTION :**

Molinari et Dudzinski (1992), Dudzinski et Molinari (1997), puis Moufki et al. (1998) ont propose un modèle thermomécanique de la coupe capable de déterminer les efforts de coupe, la longueur de contact outil-copeau, la pression a la pointe de l'outil et le champ de température le long de la face de coupe. En 1998 Moufki et al. introduisent dans le modèle une loi de frottement dépendante de la température moyenne a l'interface outil-copeau. Cette loi permet de reproduire les tendances observées expérimentalement, a savoir, la décroissance des efforts de coupe avec l'augmentation de la vitesse. En effet, de nombreuses études tribologiques ont montre que le coefficient de frottement diminue lorsque la température augmente. Cette observation d'ordre générale se retrouve dans l'usinage à grande vitesse. Ainsi, l'augmentation de la vitesse de coupe induit une élévation de la température a l'interface outil-copeau qui permet, par l'intermédiaire du coefficient de frottement moyen, de réduire les efforts de coupe. La première partie de ce chapitre est consacrée a la présentation du modèle de coupe orthogonale de Molinari et al. (1992).

### **IV -2 loi de Molinari et Clifton 1983 :**

$$\tau = \mu_0 (\gamma_0 + \gamma)^n \tilde{\gamma}^m \bar{\theta}^\nu$$

$\tau$ : la contraint d'écoulement en cisaillement

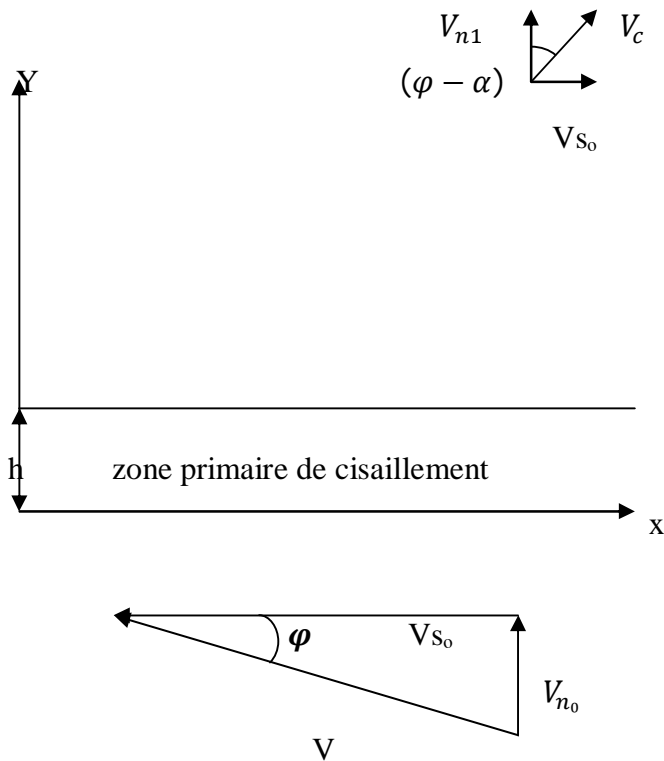
$\mu_0$ : la constante des matériaux

$\gamma$ : la prédiformation

$n$ : coefficient d'écrouissage (>0)

$m$ : la sensibilité à la vitesse de déformation

$\nu$ : l'adoucissement thermique



$$*V_{n0} = V_{n1} = V \sin\varphi \dots\dots\dots(2)$$

$$*V_c = \frac{Vn}{\cos(\varphi-\alpha)} = \frac{V\sin\varphi}{\cos(\varphi-\alpha)} \dots\dots\dots(3)$$

**Les vitesses dans le plan de cisaillement :**

$$*\text{à l'entrée : } \tilde{V}_x(\tilde{y}=0) = V_{s0} = -V \cos\varphi \dots\dots\dots(4)$$

$$*\text{à la sortie : } \tilde{V}_x(y=h) = V_{s0} = V_c \sin(\varphi-\alpha) \dots\dots\dots(5)$$

**L'équation de quantité de mouvement :**

$$*\frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial \tilde{y}} = \left[ \frac{\partial \tilde{V}_n}{\partial t} + \dot{\gamma} V_n \right] \dots\dots\dots(6)$$

**La température dans la zone primaire :**

$$*\rho c \left[ \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial \tilde{y}} V_n \right] = \beta \tilde{\tau} \dot{\gamma} + k \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial \tilde{y}^2} \dots\dots\dots(7)$$

Avec  $\beta$  : coefficient de (quinnay-taylor) qui représente la fraction de la déformation plastique transformée en chaleur

**La vitesse de glissement en fonction de la vitesse de l'écoulement de la matière :**

$$*\tilde{\gamma} = \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{y}} \dots\dots\dots(8)$$

**La vitesse de glissement est dérivée particulière du glissement :**

$$*\tilde{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{\partial \gamma}{\partial \tilde{y}} V_n \dots\dots\dots(9)$$

**Afin d'obtenir des équations adimensionnelles :**

$$y = \frac{\tilde{y}}{h} \dots\dots(10) \quad ; \quad \dot{\gamma} = \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{\gamma}_R} \dots\dots(11)$$

$$t = \tilde{t} \cdot \tilde{\gamma}_R \dots\dots(12) \quad ; \quad \theta = \frac{\tilde{\theta}}{\tilde{\theta}_0} \dots\dots(13)$$

$$\tau = \frac{\tilde{\tau}}{\tilde{\tau}_r} \dots\dots(14) \quad ; \quad V_x = \frac{\tilde{v}_x}{V_n} \dots\dots(15)$$

h : l'épaisseur de la bande

$\theta_0$  : la température de la pièce avant l'usinage

$V_n$  : la vitesse normal

$$\tau_r : \text{la contrainte de référence} : \tilde{\tau}_r = \mu_0 \tilde{\gamma}_r^m \tilde{\theta}_0^v \dots\dots\dots(16)$$

$\tilde{\gamma}_R$  : la vitesse de référence

**La démonstration pour déterminer le  $\tilde{\gamma}_R$  :**

$$\bullet \quad \tilde{\gamma}_R = \tilde{\gamma}_m = \frac{1}{h} \int_0^h \tilde{\gamma} d\tilde{y}$$

On utilise la relation (8) :

$$\tilde{\gamma}_R = \frac{V_{s1} - V_{s0}}{h}$$

On remplace les  $V_{s1}$  et  $V_{s0}$  par ces valeurs dans les relations (4) et (5) respectivement on trouve :

$$\tilde{\gamma}_R = \frac{V_c \sin(\varphi - \alpha) + V \cos(\varphi)}{h}$$

On utilise la relation (3) pour remplacer le  $V_c$  par sa valeur

$$\tilde{\gamma}_R = \frac{V \sin(\varphi) \sin(\varphi - \alpha) + V \cos(\varphi) \cos(\varphi - \alpha)}{h \cos(\varphi - \alpha)}$$

On utilisant la relation trigonométrique on trouve :

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_R &= \frac{V \sin(\varphi) [\sin(\varphi) \cos(\alpha) - \cos(\varphi) \sin(\alpha)] + V \cos(\varphi) [\cos(\varphi) \cos(\alpha) + \sin(\varphi) \sin(\alpha)]}{h \cos(\varphi - \alpha)} \\ &= \frac{V [\sin^2(\varphi) \cos(\alpha) - \cos(\varphi) \sin(\varphi) \sin(\alpha) + \cos^2(\varphi) \cos(\alpha) + \cos(\varphi) \sin(\varphi) \sin(\alpha)]}{h \cos(\varphi - \alpha)} \\ &= \frac{V \cos \alpha [\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi)]}{h \cos(\varphi - \alpha)} = \frac{V \cos \alpha}{h \cos(\varphi - \alpha)} \end{aligned}$$

$$\rightarrow \tilde{\gamma}_R = \frac{V \cos \alpha}{h \cos(\varphi - \alpha)} \dots \dots \dots (17)$$

**La démonstration des relations additionnelles :**

**1) Le glissement :**

On sait que : d'après la relation(11) :

$$\dot{\gamma} = \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{\gamma}_R}$$

on utilise la relation(9) :

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= \frac{1}{\tilde{\gamma}_R} \left[ \frac{\partial \gamma}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \gamma}{\partial \tilde{y}} V_n \right] \\ &= \frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{V_n}{\tilde{\gamma}_R} \frac{\partial \gamma}{\partial \tilde{y}} \\ \dot{\gamma} &= \frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{V_n}{\tilde{\gamma}_R} \frac{h}{h} \frac{\partial \gamma}{\partial y^2} \\ \dot{\gamma} &= \frac{\partial \gamma}{\partial t} + c \frac{\partial \gamma}{\partial y} \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

Avec

$$c = \frac{V_n}{\tilde{\gamma}_R h} = \frac{\sin \varphi \cos(\varphi - \alpha)}{\cos \alpha} \dots \dots \dots (19) \text{ par la relation (17)}$$

**2) L'équation de quantité de mouvement :**

D'après la relation (6) :

$$\frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial \tilde{y}} = \rho \left[ \frac{\partial \tilde{U}_n}{\partial \tilde{t}} + \tilde{\gamma} V_n \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\tau}_R}{\tilde{\tau}_R} \frac{h}{h} \frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial \tilde{y}} &= \rho \left[ \frac{\tilde{\gamma}_R}{\tilde{\gamma}_R} \frac{V_n}{V_n} \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial \tilde{t}} + \frac{\tilde{\gamma}_R}{\tilde{\gamma}_R} \tilde{\gamma} V_n \right] \\ \frac{\tilde{\tau}_R}{h} \frac{\partial \tau}{\partial y} &= \rho V_n \tilde{\gamma}_R \left[ \frac{\partial V_x}{\partial t} + \dot{\gamma} \right] \\ \rightarrow \frac{\partial \tau}{\partial y} &= D \left[ \frac{\partial V_x}{\partial t} + \dot{\gamma} \right] \dots \dots \dots (20) \end{aligned}$$

Avec

$$D = \frac{h \rho \tilde{\gamma}_R V}{\tau_R} = \frac{\rho V^2 \sin(\varphi) \cos(\alpha)}{\tilde{\tau}_R \cos(\varphi - \alpha)} \dots \dots \dots (21)$$

3) **La relation de la température :**

A partir de la loi (7) :

$$\begin{aligned} \rho c \left[ \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} V_n \right] &= \beta \tilde{\tau} \tilde{\dot{\gamma}} + k \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial \tilde{y}^2} \\ \rightarrow \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} V_n &= \frac{\beta}{\rho c} \tilde{\tau} \tilde{\dot{\gamma}} + \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial \tilde{y}^2} \\ \rightarrow \frac{\tilde{\theta}_0}{\tilde{\theta}_0} \frac{\tilde{\gamma}_R}{\tilde{\gamma}_R} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial \tilde{t}} + \frac{h}{h} \frac{\tilde{\theta}_0}{\tilde{\theta}_0} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial \tilde{t}} V_n &= \frac{\beta}{\rho c} \frac{\tilde{\tau}_R}{\tilde{\tau}_R} \frac{\tilde{\gamma}_R}{\tilde{\gamma}_R} + \frac{k}{\rho c} \frac{\theta_0}{\theta_0} \frac{h^2}{h^2} \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial \tilde{y}^2} \\ \rightarrow \left[ \frac{\partial \theta}{\partial t} \tilde{\gamma}_R \tilde{\theta}_0 + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\theta_0 V_n}{h} \right] &= \frac{\beta \tilde{\tau}_R \tilde{\gamma}_R}{\rho c} \tau \dot{\gamma} + \frac{k \tilde{\theta}_0}{\rho c h^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \\ \rightarrow \tilde{\gamma}_R \tilde{\theta}_0 \left[ \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{V_n}{h \tilde{\gamma}_R} \right] &= \tilde{\gamma}_R \tilde{\theta}_0 \left[ \frac{\beta \tilde{\tau}}{\rho c \tilde{\theta}_0} \tilde{\tau} \dot{\gamma} + \frac{k}{\rho c h^2 \tilde{\gamma}_R} \frac{\partial^2 \theta^2}{\partial y^2} \right] \\ \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial y} C &= \beta \tilde{\tau} \dot{\gamma} + K \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \dots \dots \dots (22) \end{aligned}$$

Avec

C= voir la relation (19)

$$B = \frac{\beta \tilde{\tau}_R}{\rho c \tilde{\theta}_0} \dots \dots \dots (23)$$

$$K = \frac{k}{\rho c h^2 \tilde{\gamma}_R} \dots \dots \dots (24)$$

4) **la loi de Molinari et Clifton :**

d'après les relations (1) et (14) et (16)

$$\begin{aligned} \tau = \frac{\tilde{\tau}}{\tilde{\tau}_R} &= \frac{\mu_0 (\gamma_0 + \gamma)^n \tilde{\gamma}^m \tilde{\theta}^\lambda}{\mu_0 \tilde{\gamma}_R^m \tilde{\theta}_0^\lambda} \\ \Rightarrow \tau &= (\gamma_0 + \gamma)^n \gamma^m \theta^\lambda \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

Comme il a été énoncé dans l'introduction du modèle, l'hypothèse d'un écoulement de copeau continu induisant un état stationnaire a été choisie. De plus, les très hautes vitesses atteintes lors de l'usinage ne laissent pas le temps à la chaleur de diffuser. L'hypothèse de l'écoulement adiabatique se justifie ainsi et permet de simplifier la relation (22) en supprimant les termes de conduction. Le système d'équations précédent (18) , (20) , (21) et (25) devient :

$$- \dot{\gamma} = C \frac{d\gamma}{dy} \dots \dots \dots (26)$$

$$- \frac{\partial \tau}{\partial y} = D \dot{\gamma} \dots \dots \dots (27)$$

$$- C \frac{d\theta}{dy} = B \tau \dot{\gamma} \dots \dots \dots (28)$$

$$- \dot{\gamma} = \tau^{\frac{1}{m}} (\gamma_0 + \gamma)^{\frac{-n}{m}} \theta^{\frac{-\lambda}{m}} \dots \dots \dots (29)$$

On combine les équations (26) et (27) on trouve :

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = DC \frac{d\gamma}{dy}$$

Après intégration :

$$\tau = DC\gamma + \tau_0 \dots\dots\dots(30)$$

$$\theta = 1 + B[\tau_0\gamma + \frac{DC\gamma^2}{2}] \dots\dots\dots(31)$$

On remplace les relation (30) et (31) dans (29) :

$$\dot{\gamma} = (DC\gamma + \tau_0)^{\frac{1}{m}} (\gamma_0 + \gamma)^{\frac{-v}{m}} [1 + B(\tau_0\gamma + \frac{DC\gamma^2}{2})]^{\frac{-v}{m}} \dots\dots\dots(32)$$

-d'après la relation (26) :

$$\frac{\partial \gamma}{\partial y} = \frac{\dot{\gamma}}{c} = \frac{1}{c} (DC\gamma + \tau_0)^{\frac{1}{m}} (\gamma_0 + \gamma)^{\frac{-n}{m}} [1 + B(\tau_0\gamma + \frac{DC\gamma^2}{2})]^{\frac{-v}{m}} \dots\dots\dots(33)$$

**La résolution de cote équations :**

$$\gamma (y=0) = 0$$

$$\begin{aligned} \gamma (y=h) = \gamma_1 &= \frac{V_s - V_{s0}}{V_N} = \frac{V_c \sin(\varphi - \alpha) + V \cos(\varphi)}{V \sin(\varphi)} \\ &= \frac{V \sin(\varphi) \sin(\varphi - \alpha) + V \cos(\varphi) \cos(\varphi - \alpha)}{V \sin(\varphi) \cos(\varphi - \alpha)} \end{aligned}$$

$$\gamma (y=h) = \tan(\varphi - \alpha) + \tan(\varphi)^{-1} \dots\dots\dots(34)$$

**Chapitre V :**  
**Simulation Numérique de la Coupe**  
**orthogonale en 3D**

## **V.1/ Introduction :**

Le but de toute simulation est de reproduire le processus réel le plus fidèlement possible. Pour cela, le modèle numérique doit prendre en compte la physique du problème et les phénomènes thermomécaniques présents.

La méthode des éléments finis propose une résolution numérique approchée des systèmes d'équations aux dérivées partielles. Un certain nombre d'études numériques ont pu décrire le comportement thermique, thermomécanique de l'outil et même du système outil/pièce/copeau avec des codes commerciaux comme NASTRAN, ABAQUS, COSMOS, DEFORM3 ou encore ANSYS.

L'objectif de cette partie est de modéliser et de simuler la formation du copeau en coupe orthogonale 3D de l'acier XC48 en utilisant la loi de comportement et d'endommagement de Johnson-Cook afin de prévoir la distribution de la température à l'interface outil/copeau. Notre étude consistera donc à décrire toutes les étapes nécessaires afin d'obtenir un modèle réaliste. Des simulations seront effectuées par la suite à l'aide du logiciel de simulation par éléments finis ANSYS/Explicit.

## **V.2/ Application au modèle numérique :**

Des modèles numériques simulant l'usinage intégrant Johnson-Cook ont déjà été réalisés avec le logiciel d'éléments finis ANSYS.

Il y a plusieurs paramètres importants à prendre en compte pour la modélisation de l'usinage. Nous cherchons donc à modéliser en éléments finis la formation du copeau en trois dimensions et son détachement du bloc de matière. Nous avons ensuite affiné notre modèle en modifiant la dimension des éléments le composant pour avoir un résultat plus précis.

On donne dans ce qui suit la démarche à effectuer pour simuler la coupe orthogonale 3D de l'acier XC48 avec le logiciel ANSYS

### **V.2.1/ Lois de comportement**

Le choix de la loi de comportement adaptée est primordial dans l'établissement d'un modèle numérique.

Pour simuler la coupe orthogonale 3D, il a été choisi pour décrire le comportement mécanique et thermomécanique de la pièce en Acier XC48 une loi de type Johnson Cook.



## V.2. 2/ Comportement mécanique de la pièce

Un modèle 3D de coupe orthogonale basé sur une approche lagrangienne a été employé pour mener à bien une analyse couplée thermomécanique dans le code de calcul ANSYS /Explicit, Le modèle se compose ici d'une pièce déformable et d'un outil rigide.

Le comportement du matériau usiné est pris en compte par une loi de type Johnson-Cook (Eq. 1)

$$\sigma = (A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

$\sigma$  est la contrainte équivalente qui représente la limite d'écoulement plastique,  $\bar{\varepsilon}^p$  est la déformation plastique équivalente,  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  est la vitesse de déformation plastique,  $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$  est le seuil à partir duquel la vitesse de déformation est prise en compte,  $T_{amb}$  est la température ambiante ou de référence,  $T_0$  est la température de fusion.

( $A$ ,  $B$  et  $n$ ) sont les paramètres qui représentent l'écrouissage,  $C$  est la constante définissant la dépendance à la vitesse de déformation est  $m$  est le paramètre définissant la dépendance à la température.

### V.2.3/ Critère d'endommagement de Johnson-Cook

La loi d'endommagement de Johnson et Cook [M. Barge, « Etude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion ». Thèse de doctorat de l'école Centrale de Lyon, Juillet 2005] est utilisée comme critère de rupture ductile. Ce critère fait apparaître les trois mêmes termes :

- La contrainte équivalente ;
- La vitesse de déformation ;
- Et les températures (Ambiante, transition et fusion du matériau).

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*) (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*) \quad (2)$$

$D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  et  $D_5$  sont les constantes de rupture de Johnson-Cook.

### **V.3/ LA MODELISATION :**

#### **V.3.1/ Modélisation de l'outil de coupe :**

L'étude s'est focalisée sur un acier XC48 , fourni en barre cylindrique (diamètre 30 mm x 50 mm).

Durant l'analyse, l'outil de coupe est assimilé à un corps indéformable (rigide), pas de champ de déformation sur celui-ci mais conducteur de la chaleur; les variables géométriques de l'outil sont données : angle de coupe  $\gamma = -10^\circ$  et l'angle de d'épouille  $\alpha = 6^\circ$ .

#### **V.3 .2/ Modélisation de la pièce à usiner**

Les tableaux 2 et 3 donnent respectivement les critères et les paramètres de la loi de Johnson Cook du matériau XC48 (Jaspers and Dautzenberg 2002)

$A[MPa]$	$B[MPa]$	$C(-)$	$n(-)$	$m(-)$	$T_0 (k)$
553.1	600.8	0.0134	0.234	1	1733

**Tableau V.1:** Paramètres de la loi de comportement de l'acier XC48

D1	D2	D3	D4	D5	$\dot{\epsilon}_0 (s^{-1})$
0.25	4.38	2.68	0.002	0.61	1

**Tableau V.2 :** Critère d'endommagement Johnson-Cook de l'acier XC48

#### **V.3.3/ Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce et de l'outil**

Les propriétés thermomécaniques de l'acier XC48 et de l'outil en carbure métallique sont représentées dans le tableau suivant :

<b>Propriétés</b>	<b>XC48</b>	<b>Outil en carbure métallique</b>
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	7800	12800
Module de Young (GPa)	210	800
Coefficient de Poisson	0.3	0.22
Conductivité (W/mk)	47	82
Chaleur spécifique (J/kg k)	432	226
<b>Thermal Expansion (m/m°C)</b>	<b>11.9x10<sup>-6</sup></b>	4.9x10 <sup>-6</sup>

**Tableau V.3:** les propriétés thermomécaniques de matériau et de l'outil (Guo and Liu 2002)

### V.3.4/ Conditions aux limites et chargement

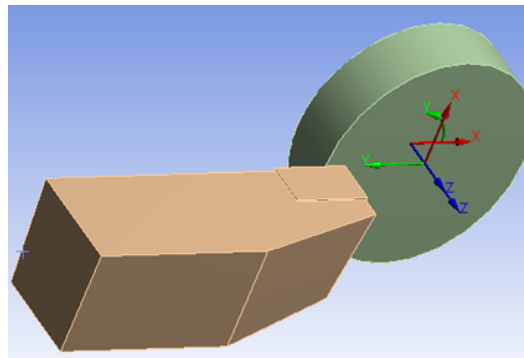
La pièce est modélisée comme un corps déformable : elle est fixée par un encastrement à sa base. L'outil est modélisé par un corps rigide, La température initiale de la pièce et de l'outil est de 20°C (293K).

Pour les conditions de coupe, on a pris deux cas :

Le 1<sup>er</sup> cas :  $f=0,4\text{mm}$  et  $V_c=300\text{m/min}$

Le 2<sup>ème</sup> cas :  $f=0,2\text{mm}$  et  $V_c=120\text{m/min}$

Le contact entre l'outil et la pièce usinée est considéré avec frottement et le coefficient de frottement outil- pièce est estimé à  $\mu=0.4$ .

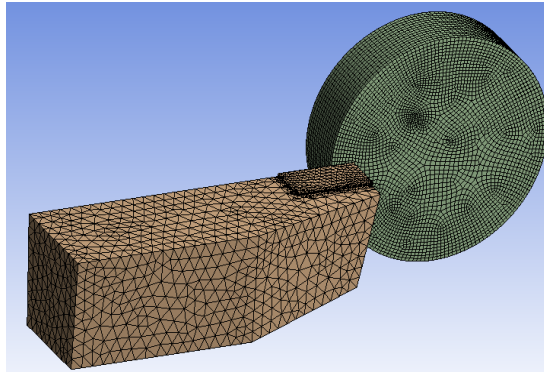


**Figure V.1 :** modélisation de la coupe orthogonale 3D par Ansys

### V.3.5/ Le maillage et la gestion de contact

L'outil de coupe est modélisé en générant 79301 éléments, et 56971 nœuds le couplage thermomécanique est introduit. La distribution des mailles est uniforme sur toute la surface de l'outil, la méthode de raffinement de maillage a été faite pour améliorer la précision des solutions ,une densité de maillage est très élevée sur la face d'attaque de l'outil pour obtenir plus de résultats comme la température. Le frottement de Coulomb est déterminé par le contact entre l'outil et la pièce à usiner, les propriétés de contact sont : coefficient de frottement est de 0.4, le coefficient dynamique est de 0.1 et la constante de dégradation est égale à zéro, La température initiale de la pièce et de l'outil est de 22°C (295K).

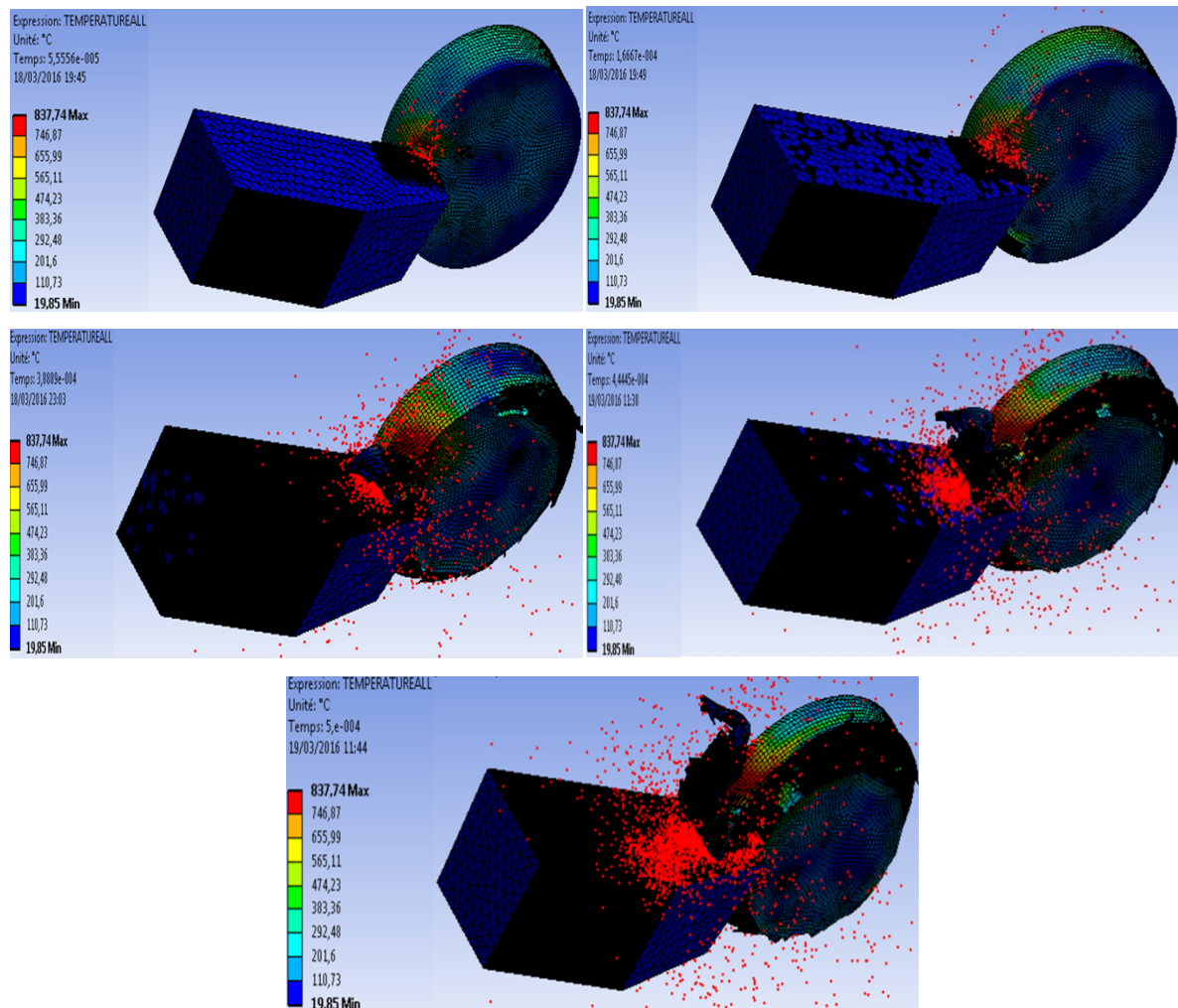
La gestion du contact est basée sur la stratégie de surface maître et de nœuds esclaves. On définit une surface maître(corps rigide) et une surface esclave(corps déformable) en sélectionnant les ensembles d'éléments, comme elle montre la figure suivante :



**Figure V.2 :** Méthode appliquée pour le contact outil / pièce

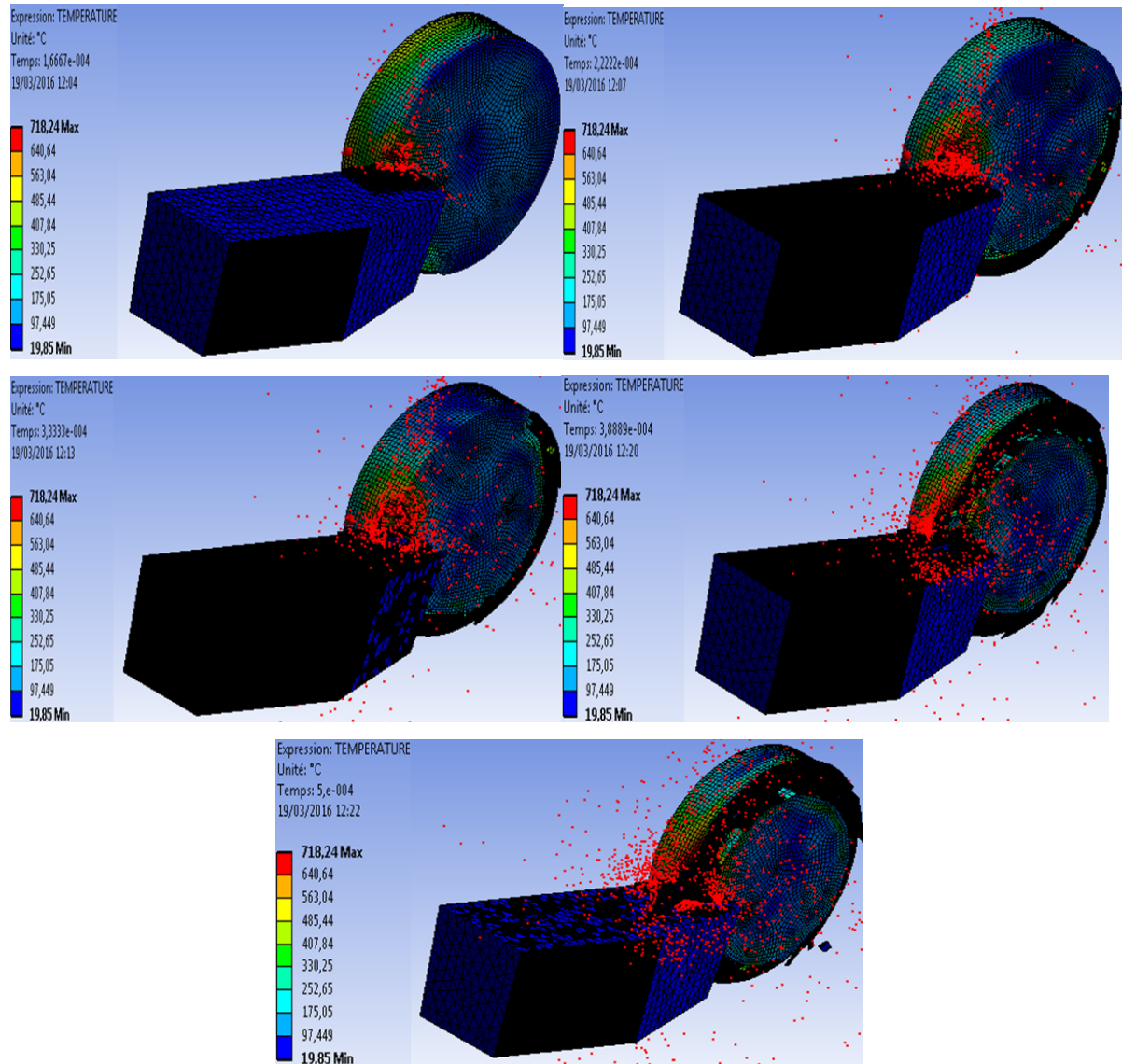
**V.4/ Résultats de la simulation du distribution de la température à l'interface outil/copeau :**

1<sup>er</sup> cas :  $V_c=300\text{m/min}$  and  $f=0,4\text{mm/tr}$



**Figure V.3:** la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ( $V_c=300\text{m/min}$  and  $f=0,4\text{mm/tr}$ )

2<sup>ème</sup> cas :  $V_c=120\text{m/min}$  et  $f=0,2\text{mm/tr}$



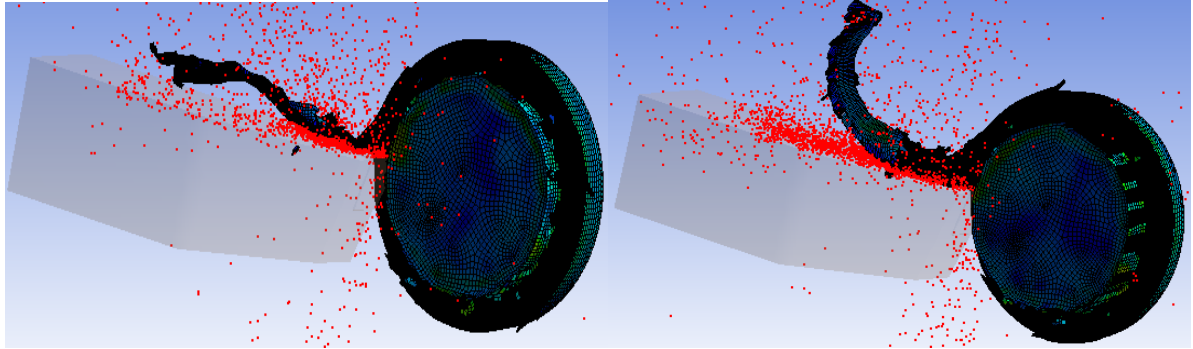
**Figure V.4:** la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48  
( $V_c=120\text{m/min}$  et  $f=0,2\text{mm/tr}$ )

On voit sur les figures 3 et 4 que la température de la pièce au contact avec l'outil varie. Pour une vitesse de coupe de  $300\text{ m/min}$ , la température atteint une valeur maximale  $T_{\text{max}}=837,74^\circ\text{C}$  par contre  $T_{\text{max}}=718,24^\circ\text{C}$  pour une vitesse de coupe de  $120\text{m/min}$ . Cette différence est essentiellement due à la zone de contact entre la pièce et l'outil : plus elle est importante, plus la température est élevée.

La couleur rouge correspond au phénomène de la conduction ; par contre les dégradations des couleurs correspondent au phénomène de convection. La partie éloignée de la surface de

contact en couleur bleue est complètement refroidie . Plus la conductivité thermique du matériau est faible, plus la température est élevée.

En adoptant la méthode Lagrangienne, la température est uniformément distribuée sur les surfaces et la morphologie du copeau est meilleure dans la figure 3.



**Figure V.5:** la morphologies des copeau pour des different conditions de coupe

### V.5/ Conclusion

L'objectif principal de ce travail est l'étude du phénomène d'enlèvement de la matière et plus exactement pour le cas de la coupe orthogonale, en utilisant la méthode par les éléments finis (MEF).

On a exploré les différentes lois décrivant l'interaction entre l'outil et la pièce et dans notre étude : on a utilisé la loi de comportement de Johnson- Cook pour la modélisation de la pièce, on a aussi formulé le problème thermomécanique.

La détermination de la température de coupe nous a permis :

- L'évaluation de l'usabilité qui est jugé par les forces de coupe, la température et la durée de vie de l'outil .
- L'évaluation du rôle de variation des paramètres de l'usinage sur la température de coupe.
- L'analyse de la distribution de la température le long de l'outil, pièce et copeau.

La méthode par EF permet de diminuer le besoin d'expérimentation.

## Conclusion générale

L'objet principal de ce travail était d'étudier les effets thermiques à l'interface Outil de coupe-Copeau lors d'une opération d'usinage. La particularité de ce travail était de ne pas utiliser la lubrification. Pour cela, on a fait appel à l'Usinage à Grande Vitesse (UGV).

Après avoir étudié la recherche bibliographique sur notre sujet, nous avons développé un modèle numérique pour obtenir la température en tout point de contact entre la pièce et l'outil de coupe. A cet effet, on a fait appel au logiciel ANSYS. Plusieurs simulations ont été utilisées. Le but était d'être conforme avec la partie expérimentale. Ainsi, une moyenne de température fut obtenue. Celle-ci est acceptable si on se réfère à notre recherche bibliographique.

Lors du développement de notre modèle, on s'est surtout basé sur les phénomènes de contact et non pas sur les efforts de coupe.

Parmi les différentes lois de comportement, on a opté pour celle de Johnson-Cook. Elle est la plus idéale pour notre cas.

En conclusion, notre modèle peut être utilisé pour déterminer ou prévoir la distribution de la température d'une part, et de corriger d'autre part les paramètres d'usinage en tournage de notre matériau Acier XC 48 .

# ANNEXE ANSYS

ANSYS



Logo de la société

ANSYS, Inc. est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales<sup>1</sup> à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

Aspects techniques

---

## Principaux produits

**ANSYS Structural** : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- 
- l'analyse statique
  - l'analyse modale
  - l'analyse harmonique (réponse forcée)
  - l'analyse temporelle
  - la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).
- **ANSYS Mechanical** : Ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.
  - **ANSYS CFX** et **Fluent** : Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetées par ANSYS.Inc respectivement en février 2003 et en février 2006. *Fluent* est un solveur : il ne comporte pas de mailleur (le maillage doit



être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS). Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU).

- **Gambit** : Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société *Fluent*). Ce mailleur permet de créer sa propre géométrie avec un grand degré de liberté et une grande précision, ou d'importer celle-ci depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un mailleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.
- **ANSYS AUTODYN** et **ANSYS LS-DYNA** : Ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.
- **ANSYS Electromagnetics** et **Ansoft** : Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.
- **ANSYS Multiphysics** : Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

## Environnements logiciels

---

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **ANSYS classique** : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). *ANSYS classic* est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
- **ANSYS Workbench** : Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

## **REFERENCES BEBLIOGRAPHIQUES :**

- [1] **Cours de fabrication mécanique**, Département de mécanique, Université Saad Dahlab de Blida, 2021
- [2] **A.Toumine**, Cours d'usinage, Groupe conception production, INSA de Lyon, France
- [3] **M.Balazinski**, Fabrication mécanique avancée, MEC 4530, Ecole Polytechnique de Monreale, CANADA
- [4] **Y. Schoefs, S. Fournier et J. C. Leon**, Productique mécanique, Edition Delagrave, 1994,
- [5] **R. Berghida**, Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques », Mémoire de magister, Département de génie mécanique, Juin 2006
- [6] **D. Gelin, M. Vincent**, Eléments de fabrication, Les Editions Foucher, 1995