



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Fabrication mécanique et productique

Titre

Modélisation et étude 3D des phénomènes de distribution de la  
chaleur  
( application au perçage)

**Proposé et encadré par :**

Prof .Temmar Mustapha  
Dr . Melzi Nesrine

**Réalisé par :**

Abadelia Razika  
Deghouche Samah

Année universitaire 2018/2019

# REMERCIEMENT

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en fabrication mécanique et productique . Nous tenons à remercier d'abord Dieu de nous avoir donné force et santé pour mener ce travail à terme. Nous tenons à remercier nos parents pour leurs sacrifices, soutien et compréhension durant toutes nos années d'études. Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements à **Monsieur Temmar Mustapha** et **Mademoiselle Melzi Nesrine** pour leurs précieux conseils, leurs remarques et leurs disponibilités lors de l'élaboration de cette étude.

Nous souhaitons exprimer nos remerciement à tous les membres de jury pour avoir bien voulu accepter notre mémoire , prouvant ainsi l'intérêt qu'ils portent à ce travail. Nous exprimons notre gratitude à l'ensemble du corps enseignants, technique et administratif du Département **Génie Mécanique** de l'université de Blida 1 , pour leur disponibilité. Et finalement, mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

# DEDICACE

Je tiens à remercier en premier lieu mes parents

A mon symbole de sacrifice, écoles de mon enfance qui était mon ombre durant toutes mes années d'études, vous mon cher père qui a tant investi pour assurer mon Avenir. ;

À la source d'amour et tendresse à celle qui a tout donné à toi ma chère maman.

A mes frères , et à tous les membres de ma famille

Spécialement à celle avec qui j'ai partagé ce travail au cours de cette année, **Razika** .

A tous mes collègues de deuxième Année Master. Ainsi qu'à tous mes collègues de l'université.

**Daghouché Samah**

# DEDICACE

En signe de respect et de reconnaissance aux personnes les plus chères

À mon cher papa à qui je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect.

A ma chère et tendre mère à celle qui a tant souffert, sans me faire souffrir.

À mes sœurs Asma, Selma à qui je souhaite toutes les réussites et le bien être, ainsi qu'à

mon frère Abdelkarim

Spécialement à mon binôme **Samah** qui m'a aidé à réaliser ce projet.

À toute ma famille, mes camarades que j'ai connu durant mon cursus Universitaire. Ainsi

qu'à tous mes amis.

**Abadelia Razika**

## Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur l'usinage et sur le procédé de perçage</b>	
I.1 . Introduction :.....	3
I. 2 Principe d'enlèvement de la matière : .....	4
I.3 Recherche de l'optimum en usinage : .....	7
I.4 . Importance du perçage dans la fabrication mécanique : .....	6
I. 4. 1 - Le perçage : .....	6
I.4.2. Mécanismes d'enlèvement de la matière pendant le perçage : .....	7
I.5. Le foret : .....	9
I. 5.1. Différents types des forets monoblocs : .....	12
I.6 . les operation de perçage : .....	13
I.6.1 - Les opérations réalisées et leurs outils associés :.....	14
I.7 . La machine de perçage : .....	16
<b>Chapitre II : Etude de l'usinage à grande vitesse</b>	
II.1. Introduction :.....	18
II.2. La vitesse de coupe :.....	18
II.3. Domaines d'application : .....	19
II.3.1. Facteurs et avantages pour le développement de l'UGV .....	19
II.3.2 Problèmes liés à l'UGV .....	20
II.3.3. Principaux contraintes et inconvénients dans l'UGV [26].....	20
II.4 Comportement mécanique du système pièce/outil/machine (POM) : .....	20
II.5 Phénomènes de coupe.....	21
II.5.1 Discontinuité du copeau.....	21

II.5.2 – les différents types de copeaux .....	22
II.6 les différents zones :.....	24

**Chapitre III : Effet thermiques et modèles numériques associés à la coupe des métaux**

III.1. Origine de la chaleur : .....	27
III.2 .Effets de la température de coupe élevée sur l'outil et la pièce.....	28
III .2.1 La température de coupe .....	28
III.2.2 Effets de la température de coupe .....	29
III.3 Phénomènes thermiques pendant la coupe .....	30
III.4. Détermination de la température de coupe :.....	30
III.4.1 Les méthodes expérimentales :.....	30
a). Mesures indirectes de la température de coupe : .....	31
b). Mesures directes de la température de coupe : .....	31
c). Mesure de la température par la méthode optique.....	32
III .5. Formulation des modèles : .....	33
III.5.1. Approche Lagrangienne : .....	33
III.5.2. Approche Eulérienne : .....	34
III .5.3. Approche Eulérienne-Lagrangienne Arbitraire (ALE) : .....	34
III .6. Maillage : .....	34
III.7. Modèles constitutifs de la coupe des métaux : .....	36
III.7.1. Modèle de Johnson et Cook[27]: .....	36
2.8. Quelques travaux numériques de la coupe des métaux en 2D et 3D:.....	36

**Chapitre IV : La simulation numérique du profil de la température à l'interface outil –copeau par les éléments finis**

IV.1. Introduction.....	40
IV. 2. Le modèle .....	40
IV .2.1. Etapes pour obtenir un volume .....	41
IV.2.2. Assemblages .....	41
IV .2.3. Etapes de l'assemblage.....	41
IV.4. Simulation du perçage .....	42
IV.5. Application au modèle numérique.....	43
IV.5.1. ANSYS explicite.....	43
IV.6. Lois de comportement.....	43
IV.6.1 .Comportement mécanique de la pièce .....	44
IV.6.2. Critère d'endommagement de Johnson-Cook .....	44
IV.7. Simulation du problème en ANSYS :.....	45
IV.7.1. Les étapes à suivre pour la modélisation .....	45
IV.8. Modélisation de l'outil de coupe.....	46
IV.9. Modélisation de la pièce à usiner.....	46
IV.10. Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce et le foret .....	47
IV.11. Conditions aux limites et chargement .....	48
IV. 12. Types d'éléments et domaine du maillage .....	48
IV.12.1. Le maillage et la gestion de contact .....	49
IV.13. RESULTATS DE LA SIMULATION : .....	50
IV .13.1. Distribution la température outil/pièce/copeau .....	50
IV .13.2. Distribution des contraintes équivalente outil/pièce/copeau .....	53
IV.14 . DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA SIMULATION NUMÉRIQU.....	56
Conclusion générale .....	57

## Liste des figures

### CHAPITRE I : Généralités sur l'usinage et sur le procédé de perçage

<b>Figure I.1</b> Configuration de la coupe. [2].....	3
<b>Figure I.2</b> Mouvements de coupe. [3].....	4
<b>Figure I.3</b> Les choix des paramètres de coupe [2].....	4
<b>Figure I.4:</b> Illustration du mouvement de coupe ( <b>Mc</b> ) et celui d'avance ( <b>Ma</b> ) en perçage.....	7
<b>Figure I. 5 :</b> Mécanisme d'enlèvement de la matière pendant le perçage avec un forethélicoïdal conventionnel (a) et un foret de géométrie moderne (b). [1].....	8
<b>Figure I.6.</b> Vitesse de rotation et d'avance [1].13.....	8
<b>Figure.I.7:</b> Foret hélicoïdal classique ou conventionnel à queue conique, sa pointe est caractérisé par deux arêtes principales et une arête centrale rectilignes, l'exemple choisi est un peu ancien, on n'utilise plus ce genre de foret. [1].....	9
<b>Figure I. 8 :</b> Angle au sommet ou de pointe $2p$ et angles d'hélice à différents points de l'arête de coupe.....	10
<b>Figure.I. 9 :</b> Différents types de forets. [1].....	11
<b>Figure I.10 :</b> Evaluation de coût des pièces avec les différents types de forets. [4].....	12
<b>Figure I. 11 :</b> (a) Différents types de foret, (b) Les opérations réalisées avec des forets Etagés. [1].....	13
<b>Figure I.12 :</b> Les opérations réalisées et leurs outils associés.....	14
<b>Figure 1.13 :</b> Mandrin.....	14
<b>figure 1.14:</b> Clé de mandrin.....	14
<b>Figure 1.15:</b> machine de perçage.....	16



## CHAPITRE II : Étude de l'usinage à grande vitesse

<b>Figure II.1</b> : Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux [6].....	18
<b>Figure II.2</b> : Les éléments dépendants de l'opération d'usinage.....	21
<b>Figure II.3</b> : Formation du copeau en usinage Conventionnel.....	21
<b>Figure II.4</b> : Représentation schématique de la formation d'une lamelle de copeau [2].....	22
<b>Figure II.5</b> : Micrographie d'un copeau (a) continu (b) discontinu (c) avec arête rapportée [40].....	23
<b>Figure II.6</b> : les différentes zones.....	24
<b>Chapitre III : Effet thermiques et modeles numeriques associes a la coupe des métaux</b>	
<b>Figure III.1</b> -Aspect général de l'opération de perçage. ....	27
<b>Figure III.2</b> : Flux généré à l'interface de contact outil/copeau .....	28
<b>Figure III.3</b> : Paramètres ayant une influence sur la température de coupe.....	29
<b>Figure III.4</b> : Origine de la chaleur produite .....	30
<b>Figure III.5</b> Mesure de la température par thermocouples .....	31
<b>Figure III.6</b> Pyromètre à infrarouge .....	32
<b>Figure III.7</b> Les valeurs de la Température de l'outil pour certains endroits .....	32
<b>Figure III.8</b> : Configurations initiale et finale issues du modèle de Kim, Lee et Sin [18]...34	
<b>Figure III.9</b> :Raffinement (a) maille locale initiale, (b) réduction de la taille de l'élément [19] .....	35
<b>Figure III.10</b> :Lissage: (a) maille locale initiale, (b) Réallocation des nœuds [20].....	35
<b>Figure III.11</b> : flux de chaleur après 20 et 180 secondes et la déformation totale par (Pavel KOVAČ,2011) [22] .....	37
<b>Figure III.12</b> : Modèle numérique de perçage dans Deform-3D [27] .....	37
<b>Figure III.13</b> : Champs de températures pendant 2 stades de simulation.....	38
<b>Figure III.14</b> : champs de contraintes équivalentes deVon Mises.....	38

## **Chapitre IV : La simulation numérique du profil de la température a l'interface outil – copeau par les elements finis**

<b>Figure.IV1</b> Etapes pour obtenir un volume.....	41
<b>Figure.IV.2</b> L'ensemble outil / pièce.....	42
<b>Figure IV.3</b> Représentation des deux types de simulations.....	43
<b>Figure IV.4:</b> Procédure de la modélisation numérique de la formation des copeaux lors de l'utilisation de logiciel ANSYS Workbench explicite dynamique.....	46
<b>Figure IV.5:</b> Création du modèle sur ANSYS Workbench.....	47
<b>Figure IV.6:</b> modélisation de la coupe orthogonale 3D par Ansys.....	48
<b>Figure (IV-7) :</b> Types d'éléments pour le maillage de la pièce à usiner.....	49
<b>Figure IV.8:</b> Méthode appliquée pour le contact (foret / pièce).....	50
<b>Figure IV.9:</b> la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier standard (Vc= 420m/min and f=0,4mm/tr) .....	51
<b>Figure IV.10:</b> la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier standard (Vc= 460m/min and f=0,4mm/tr) .....	52
<b>Figure IV.11:</b> la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier standard (Vc= 900m /min et f=0,4mm/tr:) .....	53
<b>Figure IV.12:</b> Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises (Vc= 420m/min et f=0,4mm/tr) .....	54
<b>Figure IV.13 :</b> Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises (Vc= 460m/min and f=0,2mm/tr) .....	55
<b>Figure IV.14:</b> Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises (Vc= 900m /min et f=0,4mm/tr) .....	56

## LISTE DES SYMBOLES

$V_c$  : Vitesse de coupe

$a_p$  : Profondeur de passe

$V_f$  : Vitesse d'avance

$f$  : Avance par tour

(UGV) : Usinage Grande Vitesse

(Z1) : Zone de cisaillement primaire

(Z2) : Zone de cisaillement secondaire

(Z3) : Zone de cisaillement tertiaire (zone morte)

$r\epsilon$  : Rayon de l'arête

$\sigma$  : Contrainte équivalente qui représente la limite d'écoulement plastique

$\bar{\epsilon}^p$  : Déformation plastique

$\dot{\bar{\epsilon}}$  : Vitesse de déformation

$T$  : Température

$T_{amb}$  : Température de référence (ambiante)

$T_0$  : Température de fusion

$\dot{\bar{\epsilon}}_t$  : Limite du domaine de déformation

$C_0$  : Composante de contrainte qui correspond à la densité de dislocation sur les contraintes d'écoulement

$T$  : Température absolue

$c_1, c_2$  : Constantes positives

$\bar{\epsilon}^p$  : Déformation plastique équivalente

$\dot{\bar{\epsilon}}$  : Vitesse de déformation plastique

$\dot{\bar{\epsilon}}_0$  : Seuil à partir duquel la vitesse de déformation est prise en compte

$T_{amb}$  : Température ambiante ou de référence

$(A, B \text{ et } n)$  : Paramètres représentant l'écrouissage

$C$  : Constante définissant la dépendance à la vitesse de déformation

$m$  : Paramètre définissant la dépendance à la température

$D1, D2, D3, D4 \text{ et } D5$  : Constantes de rupture de Johnson-Cook

$c$  : Chaleur spécifique ( $J/kgK$ )

(MEF) : Méthode des éléments finis

## Liste des tableau :

<b>Tableau IV.1:</b> Paramètres de la loi de comportement de l'acier standard .....	47
<b>Tableau IV.2 :</b> Critère d'endommagement Johnson-Cook de l'acier standard .....	47
<b>Tableau IV.3:</b> les propriétés thermomécaniques de matériau et de l'outil .....	48

## INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, les industriels cherchent à atteindre un haut niveau de performance pour la tenue en fatigue des composants critiques. Dans ce contexte il s'agit de produire des pièces toujours plus légères, dans des temps relativement courts, et respectant un haut degré de sûreté. Le perçage est l'un des procédés d'enlèvement de matière les plus répandus dans l'industrie, mais aussi l'un des moins étudiés de par sa complexité.

La température de coupe est l'un des aspects les plus pertinents des opérations d'usinage, car elle influe sur la durée de vie de l'outil de coupe.

Dans notre travail nous proposons d'étudier l'évolution de la température de coupe et la formation des copeaux pendant le perçage de l'acier standard.

En vue d'atteindre cet objectif, le travail présenté dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

La première partie de notre travail introduira les notions nécessaires sur l'usinage en général et sur le procédé de perçage en particulier.

Le chapitre II sera consacré à l'usinage à grande vitesse. Aussi, une introduction sur les notions d'un comportement d'un système POM (Pièce/Outil de coupe/Machine-outil) sera traitée ainsi que le mécanisme de la formation des copeaux et les différentes zones déduites lors du contact de l'outil de coupe avec la pièce à usiner.

Le chapitre III sera consacré aux phénomènes de la température lors du contact de l'outil avec la pièce à usiner. En effet, l'estimation de la température dans ces zones est importante car elle conduit à une fragilisation des outils de coupe.

Les résultats de simulation de l'opération de perçage en 3D et les discussions seront regroupés dans le quatrième chapitre. En fin, une conclusion générale sur l'ensemble de ce travail.

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

## I.1 . Introduction :

L'usinage est un procédé de fabrication par enlèvement de matière. Il s'effectue par un mouvement relatif entre la pièce à usiner et l'outil de coupe. Il regroupe différentes techniques de fabrication selon le type d'outil.

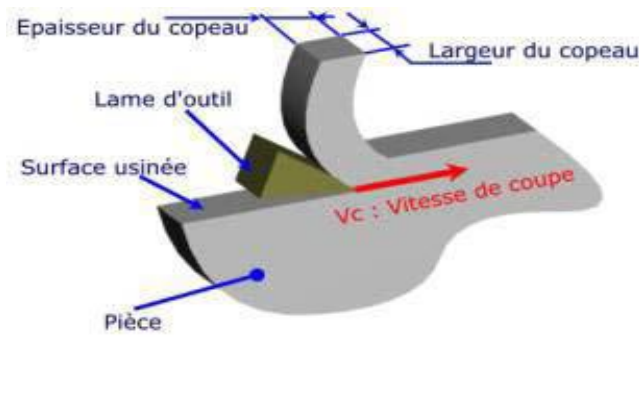
Pour meilleure fabrication d'une pièce mécanique, il est impératif de maîtriser la globalité du processus de fabrication des pièces mécaniques. En conséquence, il est impératif de maîtriser conjointement les procédés (tournage, fraisage, perçage, etc....)[1] .

Dans ce chapitre nous présentons les notions nécessaires sur l'usinage en général et sur le procédé de perçage en particulier.

## I. 2 . Principe d'enlèvement de la matière :

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante (figure I.1): [2]

- Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau .



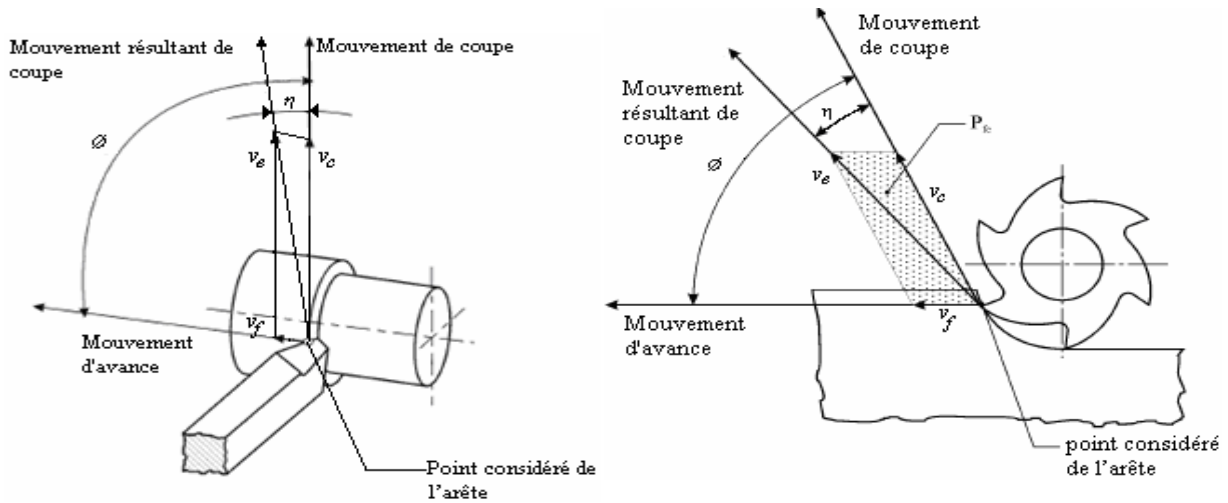
**Figure I.1** Configuration de la coupe. [2]

Un examen plus approfondi du mécanisme de la coupe nous conduit à observer qu'il procède grâce à trois mouvements principaux perpendiculaires entre eux (**figure I.2**).

**Mouvement de coupe « MC »** : C'est un mouvement qui participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de travail.

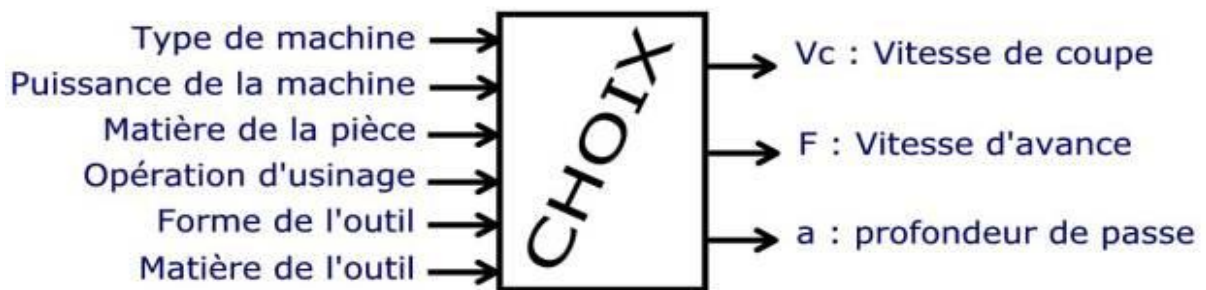
**Mouvement d'avance « Ma »** : C'est le mouvement qui a pour but de décaler latéralement une quantité  $a$ ; dite **avance**, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.

**Mouvement de pénétration « Mp »** : C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe. [3]



**Figure I.2** Mouvements de coupe. [3].

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 la coupe ; où, il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, comme le montre la figure suivante :



**Figure I.3** Les choix des paramètres de coupe [2].

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

La puissance de la machine influe sur les performances. Dans le cas de l'usinage, il y a deux grands cas de figure :

\* **Usinage en ébauche** : on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps, l'objectif est dans ce cas d'augmenter au maximum le débit de copeaux, mais la machine doit être suffisamment puissante, ainsi que l'attachement pièce/porte-pièce, sinon la machine peut 'caler' ou la pièce peut voler.



\* **Usinage en finition** : cette fois, c'est la qualité de réalisation qui est importante. La surface doit être lisse, les cotes doivent être correctes ... Comme les efforts en jeu sont plus faibles que pour une ébauche, la puissance de la machine n'est pas un critère primordial.

Pour la matière il est évident que les efforts de coupe ne sont pas les mêmes si vous usinez une pièce en polystyrène ou en acier. Donc la matière influe sur des choix relatifs à la puissance machine (entre autre) [2].

Cependant, la matière de l'outil influe sur l'usure de l'outil et sa durée du fait que c'est l'outil qui doit usiner la pièce et non l'inverse.

Tous ces critères sont intimement liés et étant donné que l'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela, il faut déterminer certains paramètres spécifiques [2] :

- **La vitesse de coupe :  $V_c$  - La vitesse d'avance :  $F$  (ou  $V_f$ ) - La profondeur de passe:  $a$**

### **I.3. Recherche de l'optimum en usinage :**

Le choix des meilleures conditions d'usinage consiste à trouver pour un produit de qualité donnée les conditions de travail qui conduisant à un optimum.

Le choix du critère optimalité peut correspondre à de différentes éventualités, en général le prix de revient est considéré comme critère quant on se penche à de stricts considération économiques par une démarche très voisine. On prend quelques fois le temps de fabrication comme critère ou autrement dit, on recherche les conditions d'une production maximum, mais il y a des situations où d'autres critères peuvent prévaloir.

Il faut d'abord souligner que le nombre de facteurs à faire entrer en ligne de compte est très élevé en usinage. Pour plus de clarté, on les a groupés par domaines techniques, et on se contente de ne prendre en considération que certains, sur lesquels on peut agir pour optimiser le travail. Ces facteurs sont essentiellement liés aux éléments suivants :

#### **A)-La machine outil :**

- Automatisation des opérations d'usinage ou auxiliaires (commande numérique).
- Augmentation de la puissance des moteurs.
- Commande automatique des vitesses.

- Stabilité du système usinant en diminution les vibrations.
- Palier antifriction pour éviter les pertes de puissances à haute vitesse.
- Machine à outils multiples.

### **B)-La manutention des pièces :**

- Mandrins pneumatiques.
- Chaînes de transferts.

### **C)- Outils :**

- Diminution des temps de changement des outils.
- Préréglage des outils dans les blocs spéciaux.
- Plaquettes à jeter en barreaux diminuant le nombre de réaffûtages.
- Amélioration des tenues des outils en utilisant des nuances comme céramiques etc...

## **I.4 Importance du perçage dans la fabrication mécanique :**

### **I. 4. 1 - Le perçage :**

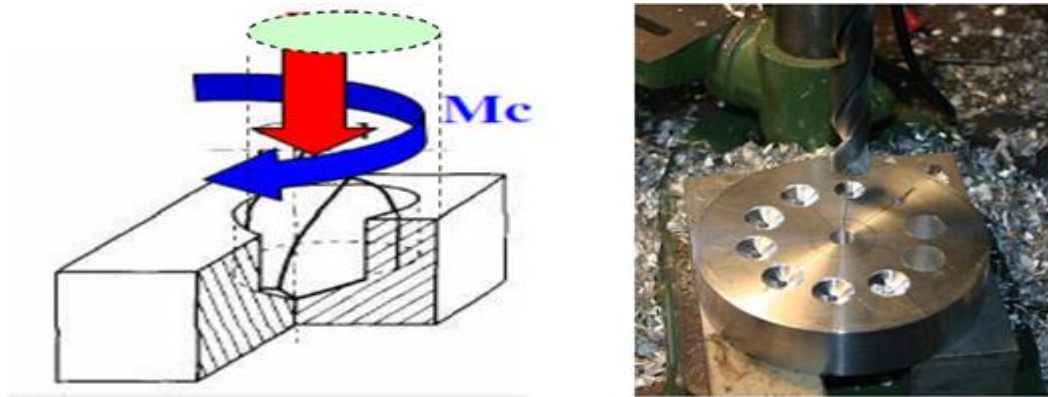
Le perçage est une opération d'usinage consistant à faire un trou dans une pièce, ce trou peut traverser la pièce de part en part, on l'appelle trou débouchant ou bien ne pas la traverser, c'est alors un trou borgne. Ce trou peut être effectué par un foret, par découpe à l'aide d'un poinçon (trous débouchant), par électroérosion, par laser, par brochage, etc. Ce trou peut servir à faire passer une pièce ou un fluide, il peut être lisse ou taraudé pour recevoir un rivet ou une vis d'assemblage[1].

L'étude est limitée au perçage de trous cylindriques lisses réalisés à l'aide d'un outil rotatif coupant appelé foret. Le perçage est l'opération d'usinage la plus courante dans l'industrie mécanique, par exemples de pièces de l'industrie automobile et de l'industrie aéronautique.

Parmi les perçages à l'outil tournant coupant (foret), on peut distinguer : le perçage de trous courts, traité dans cette étude et le perçage de trous profonds appelé forage.

Les trous courts sont caractérisés par un faible rapport entre la profondeur et le diamètre : de l'ordre de 5 à 6 pour les diamètres inférieurs à 30 mm et de 2 pour les diamètres supérieurs..

[1]



**Figure 1.4:** Illustration du mouvement de coupe (**Mc**) et celui d'avance (**Ma**) en perçage.

### I.4.2 . Mécanismes d'enlèvement de la matière pendant le perçage

Les mécanismes d'enlèvement de la matière pendant le perçage avec un foret hélicoïdal conventionnel sont classés en deux catégories :

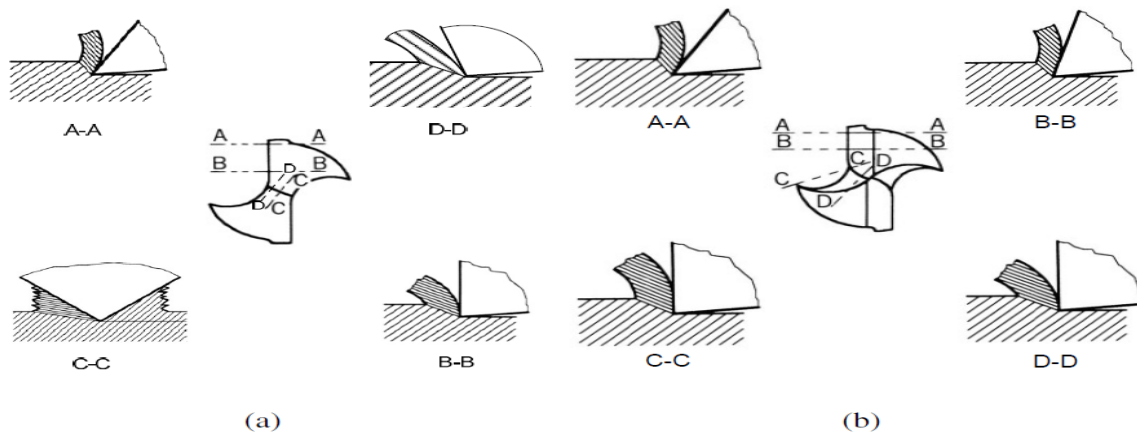
- La formation des copeaux le long des arêtes principales qui est très semblable à une opération de coupe **Figure I.4 a**.
- La formation des copeaux le long de l'arête centrale est plus complexe. En effet, au centre du foret, où la vitesse d'avance est plus importante que la vitesse de rotation, l'enlèvement de la matière est plus proche d'une indentation que de la coupe.

Enfin sur l'autre partie de l'arête centrale, la vitesse de rotation n'est pas nulle :

L'enlèvement de la matière est semblable à un mécanisme de coupe avec des conditions très sévères (angle de coupe négatif).

Dans les forets avec des géométries modernes, mince au niveau de l'arête centrale contribue à l'amélioration des conditions de coupe dans cette région en modifiant

l'angle de coupe **Figure I. 4 b**. L'indentation est réduite à une zone très petite de quelque dizaine de micromètres juste au centre du foret. [1]



**Figure I. 5 .** Mécanisme d'enlèvement de la matière pendant le perçage avec un foret hélicoïdal conventionnel (a) et un foret de géométrie moderne (b). [1]

Le perçage avec un foret combine deux mouvements : une rotation et une translation, Figure 2. Ces deux mouvements sont caractérisés par :

– **la vitesse de rotation du foret**, exprimée en tours par minute et notée  $N$  , à la périphérie du foret elle correspond à une vitesse ;

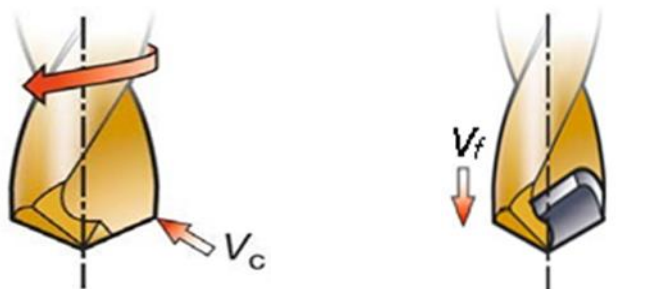
$$Vr(m/min) = \frac{\pi \times D(mm) \times N(tr/min)}{1000}$$

– **l'avance exprimée en mm par tour** et notée  $f$  (mm tr ) , elle correspond à une vitesse d'avance

$$Vf (m/min) = f (mm/ tr) \times N (tr /min) \times 1000$$

Si le foret possède deux arêtes principales de coupe, l'avance par arête est alors  $f$  [2] .

Le choix des conditions de coupe (vitesse de rotation et avance) dépend du foret (de sa géométrie), de la matière à usiner et l'utilisation ou non de la lubrification.

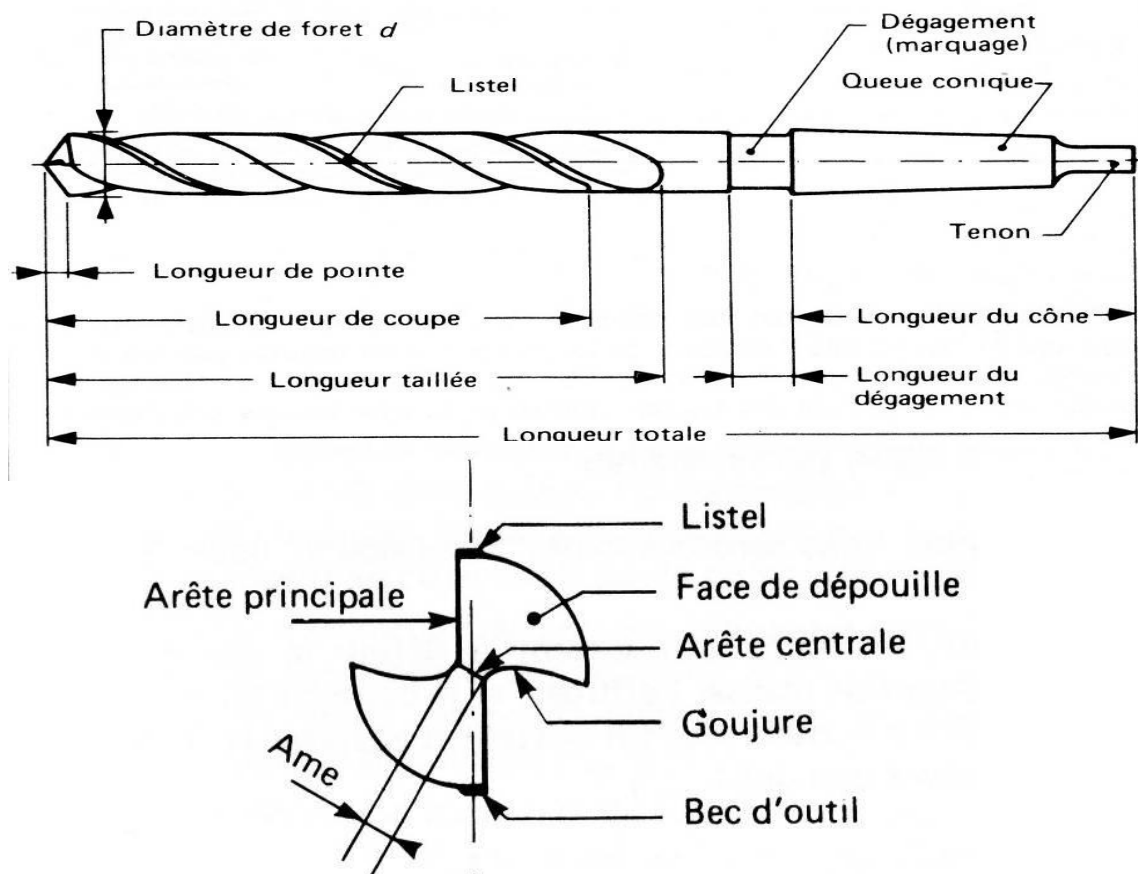


**Figure I.6.** Vitesse de rotation et d'avance [1].

Le perçage peut être réalisé sur un tour à commande numérique, le mouvement de rotation est alors donné à la pièce et le mouvement d'avance correspond au déplacement du chariot porte outil. Plus couramment, il est réalisé sur des centres d'usinage verticaux ou horizontaux, les mouvements d'avance et de rotation sont alors imposés au foret. Le développement des machines et l'amélioration des forets ont radicalement modifié l'opération de perçage, des trous courts de grande qualité dimensionnelle et d'état de surface peuvent aujourd'hui être réalisés sans pré-trou de centrage, usinage préliminaire, et sans usinage consécutif pour obtenir la qualité requise.

### I.5. Le foret :

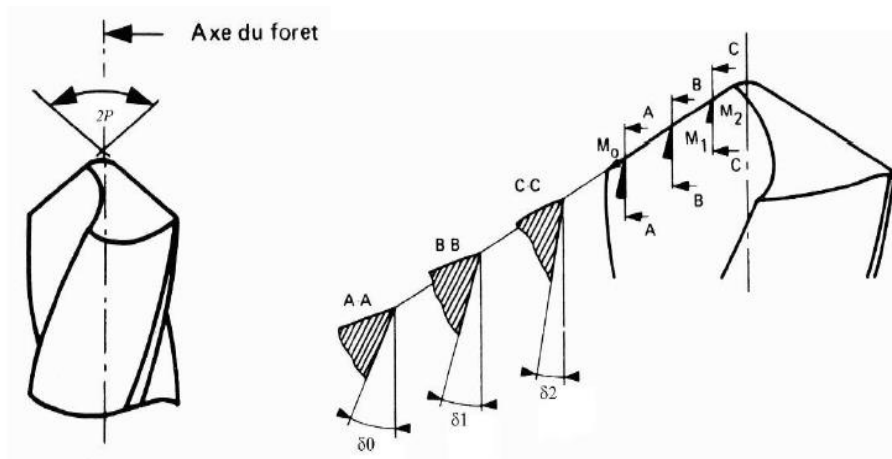
Le foret, **Figure I. 6**, est un outil qui sert à produire un trou dans une pièce. C'est un outil rotatif muni de deux ou plusieurs arêtes de coupe, de deux ou plusieurs goujures hélicoïdales ou rectilignes.



**Figure. I.7.** Foret hélicoïdal classique ou conventionnel à queue conique, sa pointe est caractérisé par deux arêtes principales et une arête centrale rectilignes, l'exemple choisi est un peu ancien, on n'utilise plus ce genre de foret. [1].

▪ Les parties essentielles d'un foret sont les suivantes :

- La queue : elle assure le positionnement et l'entraînement du foret.
- Les parties actives : arêtes de coupe : elles assurent la formation du copeau et le centrage du foret dès l'attaque dans la matière. La géométrie des parties actives est déterminée par l'affûtage ; elle conditionne la qualité du travail réalisé ainsi que la tenue à l'usure du foret.
- Les goujures : elles forment la face de coupe de l'outil et participent à la formation du copeau, elles servent également à évacuer celui-ci et à amener le fluide de coupe au niveau des parties actives. La forme et l'état de surface des goujures ont une grande importance pour la formation et l'évacuation du copeau.
- Les listels : ils frottent sur la portion du trou usiné, ils assurent le guidage de l'outil, ils sont généralement rectifiés. Les caractéristiques nominales du foret sont :
  - Le diamètre du foret  $D$ ,
  - L'angle au sommet ou de pointe  $2p$  Figure I. 7 : c'est l'angle compris entre les projections des arêtes de coupe sur un plan parallèle à celles-ci et contenant l'axe de l'outil,
  - L'épaisseur d'âme  $2w$ ,
  - L'angle d'hélice  $\theta$  à la périphérie du foret Figure I. 6. Notons que cet angle varie le long de l'arête de coupe. [1]

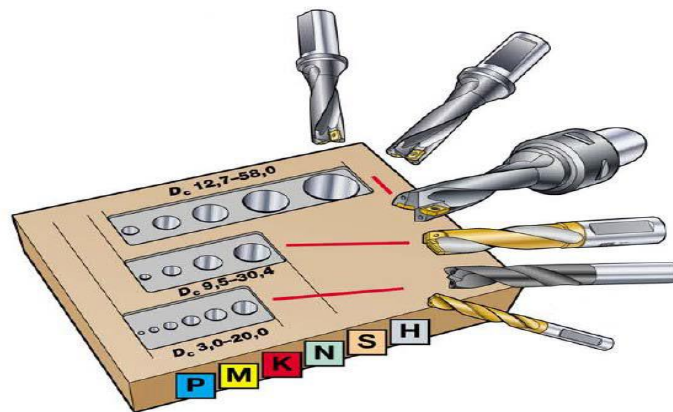


**Figure I.8** Angle au sommet ou de pointe  $2p$  et angles d'hélice à différents points de l'arête de coupe. [1]

Les forets pour le perçage de trous courts sont caractérisés par leur extrémité (pointe du foret) qui permet d'assurer le centrage du foret, obtenir une parfaite symétrie des arêtes de coupe et équilibrer les efforts de coupe. Les forets pour trous courts peuvent être classés en deux grandes catégories **Figure I.8**.

Les forets monoblocs (réalisés en un seul matériau : acier rapide ou carbure de tungstène) ou brasés (inserts en matériau dur au niveau des parties actives brasés dans un corps en acier ou en carbure de tungstène), ils peuvent être revêtus, ils sont réaffûtables, enfin ils sont utilisés pour les trous de petits diamètres et les forets à plaquettes indexables pour les trous de grands diamètres.

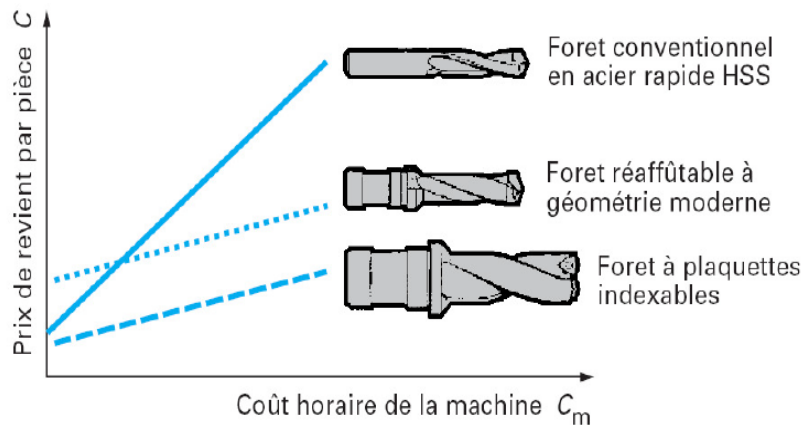
Le corps du foret est en acier et les plaquettes en carbure de tungstène revêtues ou non .



**Figure. I. 9** Différents types de forets. [1]

Avec le faible coût d'utilisation de la machine qu'il permet, le foret à plaquettes indexables est le choix le plus économique au niveau du prix de revient par pièce : les plaquettes indexables peuvent être changées jusqu'à 40 fois au cours de la durée de vie du foret. Les forets à plaquettes indexables ne couvrent toutefois pas la plage la plus courante de diamètres de trous, ce qui explique que les forets conventionnels en acier rapide demeurent prédominants dans le domaine du perçage des trous courts[4].

Sur les machines modernes d'un coût horaire élevé, ces forets en : acier rapide ne satisfont pas aux critères de performances permettant d'atteindre un niveau de rentabilité satisfaisant. Il est en effet nécessaire, dans la plupart des applications, de perdre un temps précieux en pré-perçage et finition. C'est pourquoi, l'utilisation de forets réaffûtables à géométries modifiées a augmenté au rythme de l'apparition de machines dont le coût horaire est élevé Figure I.9.



**Figure I. 10.** Evaluation de coût des pièces avec les différents types de forets .[4]

### I. 5.1. Différents types des forets monoblocs :

Pour les petits trous de 2,50 à 12,7 mm de diamètre, on utilise principalement des forets monoblocs ou brasés réaffûtables. Une différenciation doit cependant être effectuée entre les forets en acier rapide (HSS) classiques ou conventionnels, les forets en carbure également classiques et les forets en carbure à géométrie de coupe modifiées : définies par une pointe non forcément conique, des arêtes principales parfois incurvées et un amincissement de l'âme[4].

Cette géométrie modifiée a radicalement transformé les conditions de perçage des trous courts

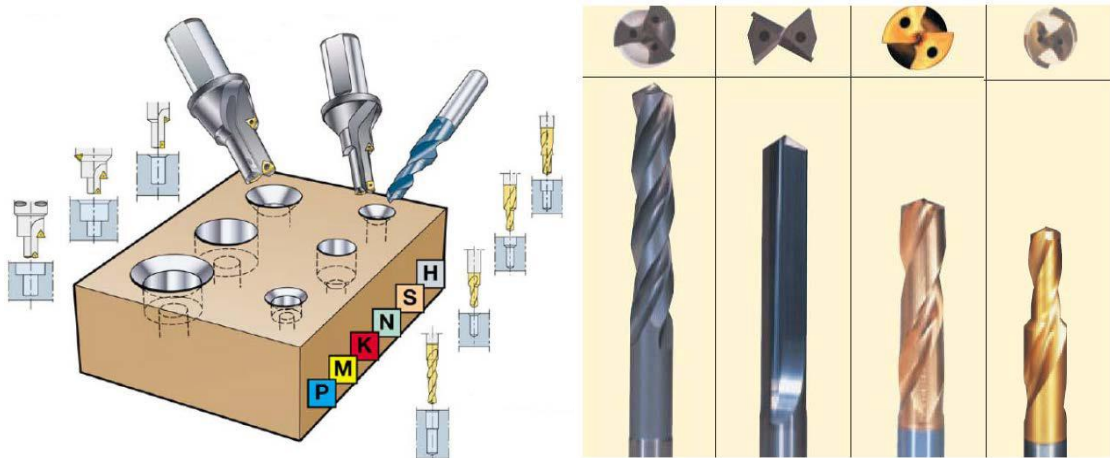
Sa propriété d'auto-centrage, qui rend inutile l'exécution d'avant-trous et les tolérances étroites qu'elle respecte, en combinaison avec des matériaux de coupes modernes, permettent un usinage rentable en une seule opération, jusqu'à la classe de tolérance IT9 et avec un fini de surface  $Ra\ 1\ \mu m$ . Avec ces outils, on remarque que le perçage est le procédé d'usinage qui consiste dans la création des trous dans une pièce donnée en utilisant un foret (**figure I.9**).

Plusieurs familles de forets monoblocs existent pour effectuer les différents types de trous (différents diamètres et profondeurs). La matière de la pièce usinée peut jouer un rôle dans le choix du type du foret, mais elle influence d'avantage la géométrie de la pointe du foret. On peut donc distinguer plusieurs types **Figure I.9** :

– Le foret hélicoïdal **Figure I.6** conventionnel ou classique : Ce type de foret était le plus couramment utilisé .



- Le foret étagé **Figure I.10** : foret à diamètres étagés utilisé pour réaliser des trous avec deux diamètres différents ou avec un chanfrein ;
- Le foret avec trous de lubrification (deux trous de lubrification débouchent sur la face en dépouille et amènent au fond du trou le lubrifiant) : le lubrifiant refroidit l'arête de coupe, chasse les copeaux dans les goujures et lubrifie les surfaces. Il est employé pour augmenter la vitesse d'avance et la profondeur du trou percé et avec certain matériau dur .
- Le foret à trois ou quatre goujures : caractérisé par une rigidité et une stabilité remarquable, il est employé pour le perçage de précision, de la fonte et de l'aluminium .
- Le foret à goujure rectiligne : utilisé pour le perçage à très grande vitesse, souvent avec une lubrification centrale à haute pression pour évacuer les copeaux. [4]

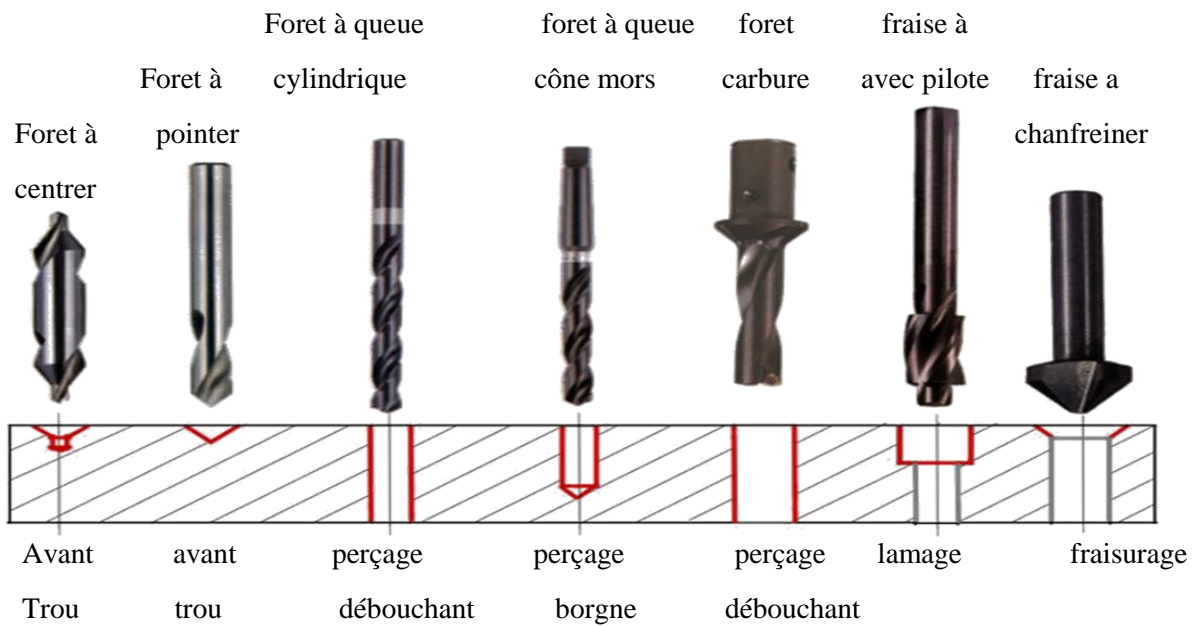


**Figure I. 11** (a) Différents types de foret, (b) Les opérations réalisées avec des forets Etagés.

[1]

## I-6 LES OPERATIONS DE PERÇAGE :

**I.6.1 - Les opérations réalisées et leurs outils associés :**



**Figure I.12 :** Les opérations réalisées et leurs outils associés [2 ]

- ✓ Les forets qu'ils soient hélicoïdaux à queues cylindriques ou à queues cônes morses ou encore carbure permettent de réaliser des perçages débouchant ou borgnes.
- ✓ Un foret hélicoïdal à queue cylindrique se monte dans un mandrin.



(a)



(b)

**Figure I.13 :** Mandrin

**figure I.14:** Clé de mandrin

Un foret hélicoïdal à queue cône morse se monte directement dans la broche d'une machine ou bien par l'intermédiaire d'une ou plusieurs douilles de réduction que l'on appelle cône morse

Une fois les différentes douilles emboîtées entre elles, on utilise un chasse cône sur lequel on frappe avec un marteau pour les déboîter



Chasse cône



cône morse

Il permet de guider le foret lors de l'attaque du foret dans la matière, d'autant plus, si la matière à percer est tendre (matières plastiques).

- Le perçage sans avant trou fait fléchir le foret.
- La précision de la position du trou ne peut pas être obtenue.

Si la flexion est trop importante, le foret peut se casser.

- Le perçage avec avant trou permet au foret d'être stable et guidé.

Un perçage avec un foret ne permet pas d'obtenir un trou précis dimensionnellement et géométriquement.

Le trou obtenu est toujours légèrement plus grand que le diamètre de l'outil c'est pour cela que pour obtenir un trou de diamètre 5 par exemple, le foret mesuré fera légèrement moins que 5 mm.

C'est la pointe du foret qui guide et génère le diamètre du trou (les arêtes latérales ne sont pas trop coupantes, elles guident le foret).



Quand on perce les copeaux s'accumulent et quand l'outil pénètre plus de trois fois son diamètre il faut réaliser un déburrage, soit reculer afin de permettre aux copeaux de s'évacuer.

### I.7 La machine de perçage :

La perceuse est la machine qui a été conçue pour réaliser un perçage, mais le tour ou encore la fraiseuse, peuvent réaliser cette opération d'usinage. On peut classer les perceuses selon plusieurs types :

- ✓ Les perceuses sensibles.
- ✓ Les perceuses à colonne.
- ✓ Les perceuses radiales.
- ✓ Les machines portatives à air comprimé ou électrique.

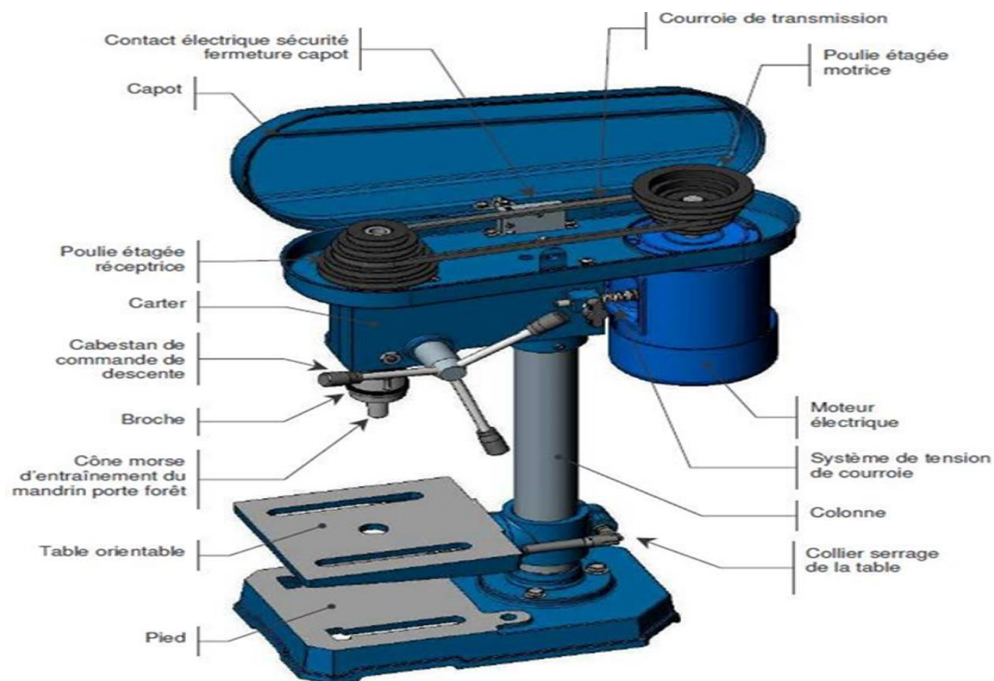


Figure I.15: machine de perçage [5]

***Chapitre II :***  
***Étude de l'usinage à grande vitesse***

**II.1. Introduction**

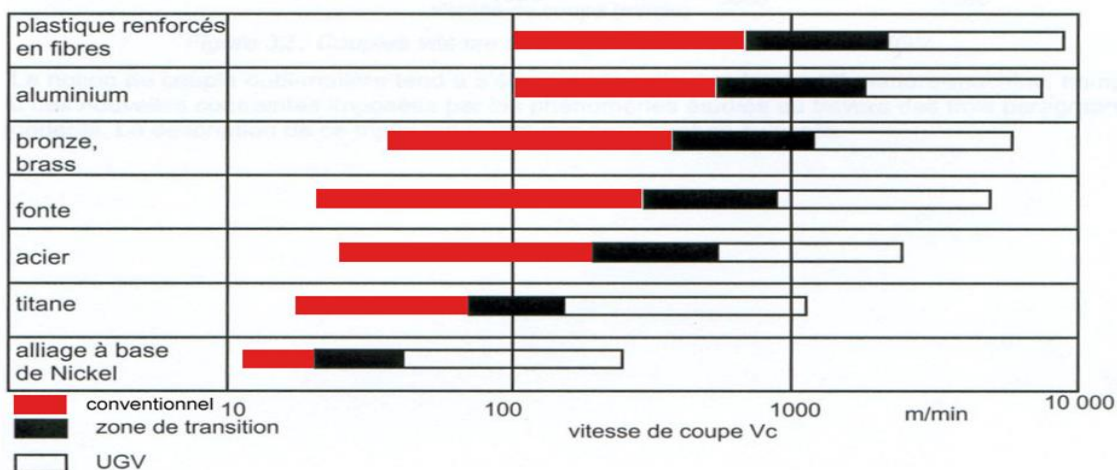
L'usinage à grande vitesse est une opération d'enlèvement de copeaux mettant en jeu des vitesses de coupe, pour des matériaux donnés, qui sont cinq à dix fois plus élevées que celles conventionnellement utilisées pour ces mêmes matériaux. Ces grandes vitesses de coupe entraînent des températures, dans le plan de cisaillement du copeau, qui sont suffisamment élevées pour que les propriétés mécaniques du matériau usiné soient très diminuées lors de son usinage.[6]

**II.2. 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 [7]



**Figure II.1 :** Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux [7]

### II.3. Domaines d'application :

L'UGV s'applique en Fraisage, Perçage, Taraudage, Tournage et Rectification sur la plupart des matériaux métalliques ; en Fraisage et Perçage sur d'autres matériaux, dans les applications industrielles suivantes :

- Aéronautique Usinage des alliages légers, des superalliages, matériaux composites.
- Moulistes Fontes et aciers de construction.
- Électro-érosion Alliages de cuivre. Graphite.
- Automobile Usinage Grande Vitesse intégré aux transferts, usinage des matrices d'emboutissage.[3]

#### II.3.1. Facteurs et avantages pour le développement de l'UGV :

L'UGV offre des conditions de coupe excellentes, qui découlent des phénomènes de formation du copeau.

Le processus de formation du copeau est principalement basé sur des déformations plastiques de cisaillement pour les métaux. Aux faibles vitesses de coupe, le copeau est continu et ces déformations sont quasi-stationnaires aux faibles vitesses de coupe.

Les phénomènes de coupe qui existent entre la pièce, l'outil et le copeau sont différents de ceux observés en usinage conventionnel. Ils sont dus aux vitesses de coupe élevées. La chaleur dégagée lors du cisaillement du copeau n'a pas le temps de se propager dans la pièce et l'outil. On note que :

- La majeure partie de cette chaleur est évacuée par le copeau : 80 % en UGV et 40 % en usinage conventionnel.
- Plus la vitesse de coupe augmente, plus l'énergie spécifique de coupe diminue.

L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne l'augmentation de la vitesse d'avance.

Parmi les avantages de l'UGV, on cite :

- Augmentation de la productivité,
- Amélioration de l'état de surface,
- Conservation de l'intégrité matière,
- Amélioration de la précision,

- Possibilité d'usinage à sec,
- Possibilité d'usiner des aciers traités thermiquement, ...

En outre, il y a des problèmes qui sont liés à l'UGV. Ces derniers sont dus aux fréquences de rotation élevées des outils, et des phénomènes d'instabilité dynamique (broutement, vibrations) surviennent régulièrement lors d'opérations d'UGV.

### II.3.2 Problèmes liés à l'UGV :

À cause des fréquences de rotation élevées des outils, des phénomènes d'instabilité dynamique (broutement, vibrations) surviennent régulièrement lors d'opérations d'UGV.[4]

### II.3.3. Principaux contraintes et inconvénients dans l'UGV [26]

Équipements et outillages plus coûteux : L'UGV nécessite une machine, une commande numérique, une broche, un porte-outil et des outils spécifiques qui représentent un investissement lourd, 2.5 fois plus cher que le conventionnel.

Sécurité renforcée : Les vitesses de coupes en UGV sont souvent grandes ce qui est imposé une sécurité consolidée durant l'usinage pour protéger l'opérateur.

Formation spécifique au processus d'Usinage Grande Vitesse : L'utilisation d'une machine UGV nécessite une formation spécifique des opérateurs.

Approche différente de l'usinage conventionnel : Le temps de mise au point peut être plus long qu'en conventionnel. Il est nécessaire de faire une préparation **méticuleuse**.

### II.4 Comportement mécanique du système pièce/outil/machine (POM) :

La machine-outil est un ensemble complexe mettant en œuvre un ou plusieurs procédés, des éléments de structure fixes (bâtis, glissières) ou mobiles (broches et arbres tournants dans des paliers) ainsi qu'une partie commande. La machine-outil est donc un véritable système qui doit être étudié comme tel.

Tous Les éléments, qu'ils soient actifs ou passifs, interagissent. La machine à un comportement dynamique dont ne saurait rendre compte l'étude séparée de chacun de ses éléments.

La simulation de son apparition doit être réalisée afin de l'éviter : c'est un des objectifs de la méthode que nous proposons. [8]





Figure II.2 : Les éléments dépendants de l'opération d'usinage

## II.5 Phénomènes de coupe

Les bons résultats de l'UGV s'expliquent par les phénomènes de formation du copeau.

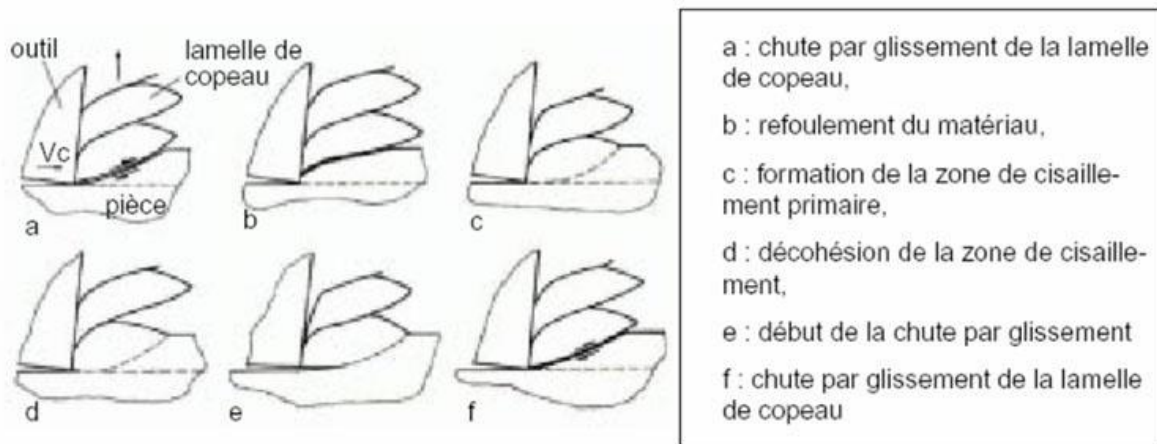
### II.5.1 Discontinuité du copeau

Pour les métaux, le processus de formation du copeau est principalement basé sur des déformations plastiques. En faible vitesse de coupe, le copeau est continu, et les déformations plastiques dans les zones de cisaillement sont quasi-stationnaires (Copeau A et figure 4 ci-dessous).



Figure. II.3: Formation du copeau en usinage Conventionnel

Avec de hautes vitesses de coupe, le copeau est dentelé et formé d'éléments séparés (C), 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 ci-dessous.



**Figure II. 4** : Représentation schématique de la formation d'une lamelle de copeau [2]

### II.5.2 – LES DIFFERENTS TYPES DE COPEAUX :

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

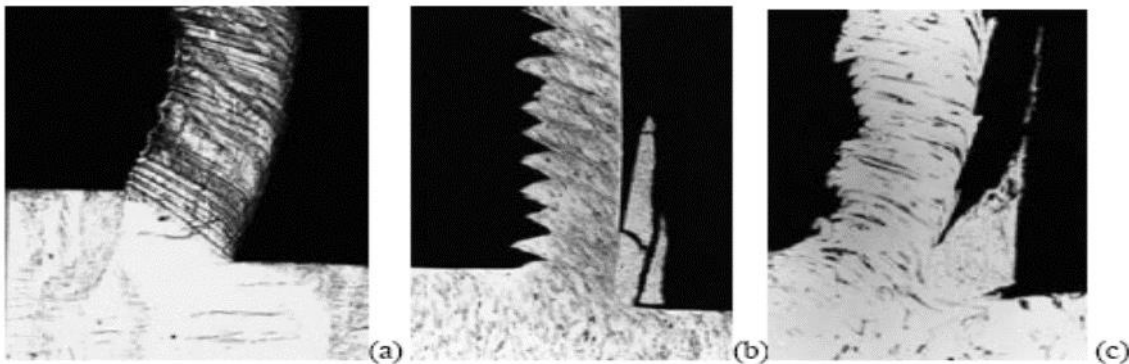
La formation du copeau joue un rôle important sur la rugosité de la surface usinée.

Les formes du copeau varient suivant les conditions d'usinage. L'usinage des métaux plastiques (aciers) donne lieu à trois types de copeaux : continu, cisailé et discontinu. On obtient aussi le copeau fragmenté produit par l'usinage de métaux peu plastiques (fontes, bronzes).

- **Copeau continu** : est caractérisé par un processus de déformation plastique dans la zone de cisaillement primaire. La contrainte de cisaillement n'atteignant pas la limite à

rupture du métal, le copeau s'écoule de manière continue. C'est la configuration qui, de par sa simplicité, a été la plus modélisée dans la littérature (figure a).

- **Copeau discontinue** : est caractérisé par sa rupture périodique et par l'apparition de segments. La contrainte de cisaillement atteint, dans la zone de cisaillement primaire, la limite à rupture du matériau et une fissure se propage de la surface de la pièce vers la pointe de l'outil. Il s'agit d'un phénomène cyclique sur lequel nous reviendrons par la suite (figure b).
  
- **Copeaux avec formation d'une arête rapportée** : est quant à lui caractérisé par l'apparition d'un amas de matière écrouie sur la face de coupe de l'outil. Cette accumulation forme alors une nouvelle arête de coupe qui donne son nom à cette configuration de copeau. Cette configuration de copeau est rencontrée lorsque les vitesses de coupe sont faibles. Abstraction faite de l'arête rapportée, le copeau en lui-même est en général continu. (Figure c)



**Figure II.5:** Micrographie d'un copeau (a) continu (b) discontinu (c) avec arête rapportée [9]

Selon différents auteurs [10], le processus de formation de copeau dépend fortement de la rhéologie du matériau usiné comme :

- Les propriétés thermomécaniques du matériau usiné et de l'outil de coupe,
- La géométrie de l'outil de coupe (brise copeau, rayon d'arête, etc...),
- La nature du contact à l'interface outil-copeau (collant ou glissant),
- La nature de l'opération effectuée (fraisage, tournage, brochage, etc...).

## II.6 LES DIFFERENTES ZONES :

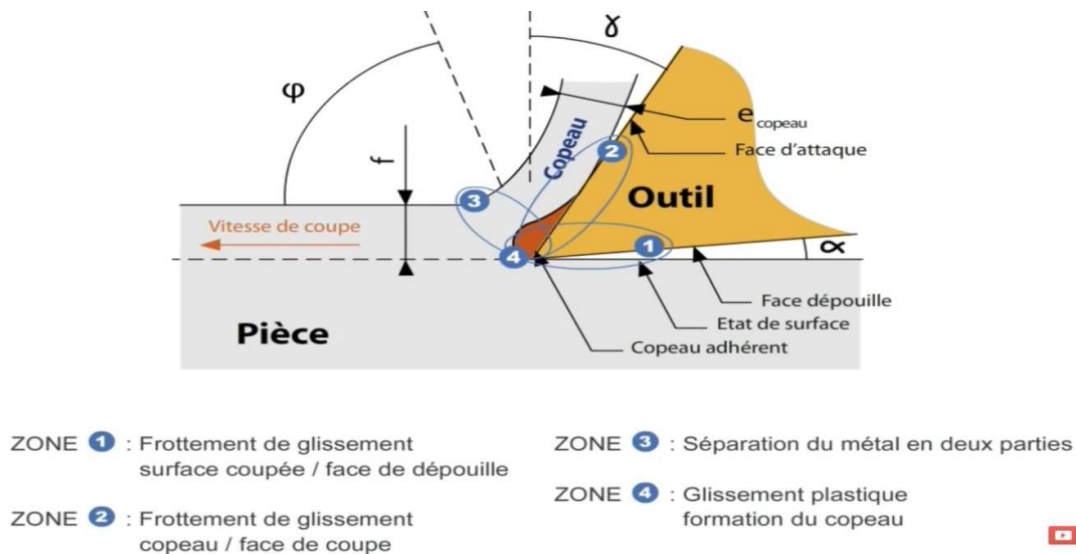


Figure II.6 : les différentes zones

**Zone de cisaillement primaire (1) :** la formation du copeau se fait principalement dans cette zone sous l'effet du changement de la direction d'écoulement de la matière. Elle est le lieu de grandes déformations plastiques et d'échauffements. Le comportement de cette zone définit la nature géométrique des copeaux.)

**Zone de cisaillement secondaire (2) :** correspond à la zone de frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil.

**Zone de cisaillement tertiaire (3) :** correspond au frottement entre la face en dépouille de l'outil et la surface usinée. Un phénomène de cisaillement est aussi identifié dans cette zone [6]

**Dans les zones 2 et 4 la température est la plus élevée.**

Pour les outils carbures la dureté de l'outil diminue entre 800 et 900°, il faut donc maintenir la température des outils en dessous de ces valeurs lors de l'usinage.

Pour la pièce des températures élevées auront tendance à dilater la pièce et donc en refroidissant la pièce va se rétracter. Même s'il faut viser la cote moyenne de manière générale, il est préférable de viser la cote maxi (pour une cote extérieure) qui pourra être retouchée après refroidissement.

Pour refroidir l'outil et la pièce, on peut utiliser du lubrifiant (huile de coupe ou huile soluble). En plus de refroidir, le lubrifiant diminue le coefficient de frottement entre la pièce et l'outil ce qui facilite la coupe.

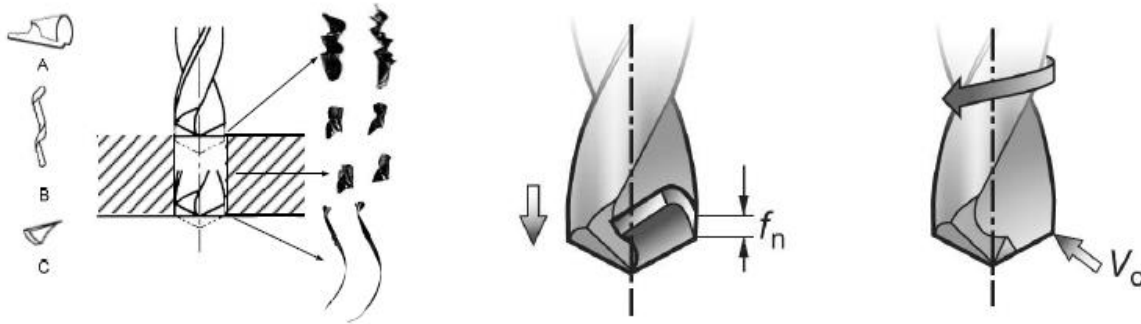
La lubrification doit être abondante pour évacuer les copeaux. Pour certains métaux il est préférable d'éviter la lubrification (fonte, alu (alu de fonderie)...) à cause du fait qu'ils produisent des copeaux fragmentés qui forment une boue abrasive avec le lubrifiant.

## ***Chapitre III :***

***Effets thermiques et modèles numériques  
associés à la coupe des métaux***

### III.1. Origine de la chaleur :

Le perçage est le procédé d'usinage qui consiste dans la création des trous dans une pièce donnée en utilisant un foret .Le foret est un outil complexe de coupe qui a deux arêtes symétriques qui coupent et enlèvent la matière et une zone centrale qui déforme, repousse la matière et l'écroute (zone d'indentation). Les deux arêtes coupantes se trouvent sur une surface généralement conique,



**Figure III.1** -Aspect général de l'opération de perçage. [11]

Du point de vue thermique, le perçage est l'opération d'usinage la plus délicate. La coupe et l'indentation génèrent de la chaleur, chaleur difficilement évacuée puisque la zone de coupe est confinée à l'extrémité du trou percé. Une partie est évacuée par les copeaux et l'apport d'un fluide de coupe permet de réduire l'élévation de température dans l'outil et la pièce. La lubrification ou le refroidissement le plus efficace étant celui réalisé par le centre de l'outil. Cependant, l'emploi des lubrifiants est aujourd'hui limité et des solutions d'usinage à sec ou avec un minimum de fluide de coupe sont recherchées. La géométrie du foret joue un rôle non négligeable dans la coupe et donc dans la production de chaleur lors du perçage. Afin de limiter l'échauffement du foret et par voie de conséquence les mécanismes d'usure il est nécessaire d'optimiser la géométrie du foret. La température a un effet important sur l'usure du foret, la durée de vie du foret, la qualité du trou, le niveau des contraintes résiduelles, les altérations métallurgiques de la surface du trou.

La température de coupe, générée à l'interface outil - copeau, est le facteur le plus influant sur l'usinabilité des métaux [11].

En effet, et d'une part, l'élévation des températures de coupe diminue la résistance à l'abrasion des outils et active les phénomènes de diffusion des composés du substrat vers le copeau [12].

D'autre part, cette augmentation de la température a un effet néfaste sur l'intégrité de la surface usinée.

Les mécanismes d'usure en fonction de la température. Il apparaît que l'usure par adhésion est active sur une large plage de température de coupe. L'usure par abrasion semble également être indépendante de la température mais présente une intensité plus faible que l'usure par adhésion. En revanche les mécanismes d'usure par oxydation, par diffusion et par affaiblissement plastique ne s'activent qu'aux hautes températures.

L'estimation de la température dans ces zones est importante car elle conduit à une fragilisation et à une usure des outils de coupe. Dans ces zones de frottement, où deux corps différents sont en contact, le problème de coefficient de partage de flux devient pertinent. La Figure (III.2) issue des travaux de Ceretti et al [13] représente un modèle phénoménologique de transfert de chaleur dans l'outil. Il apparaît clairement sur cette figure un apport de chaleur dû au frottement ( $Q_1$ ) et une perte de chaleur par conductance ( $Q_2$ ) [14].

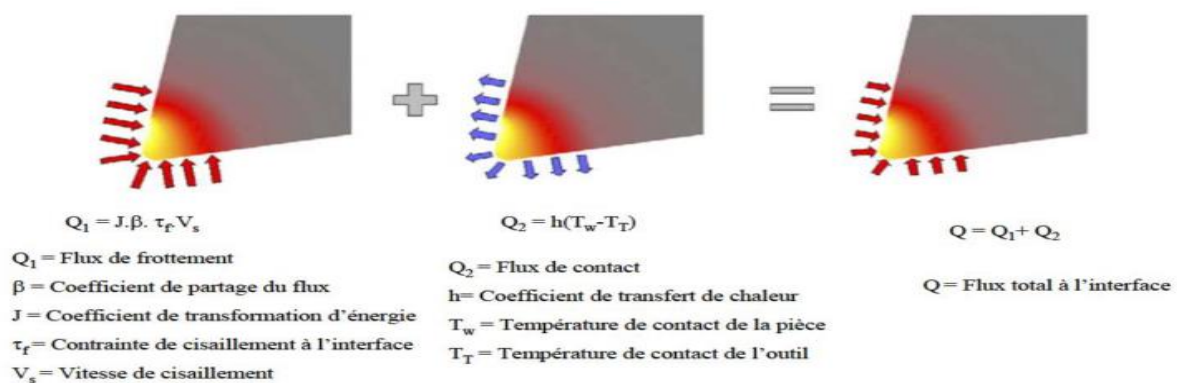


Figure III .2 : Flux généré à l'interface de contact outil/copeau [13].

## III.2 .Effets de la température de coupe élevée sur l'outil et la pièce :

### III .2.1 La température de coupe

Les zones de déformation du copeau et de frottement copeau/outil étant relativement restreintes, il en résulte d'importantes variations de température dans les volumes directement affectés par le dégagement de la chaleur. D'après les études de Boothroyd [11], le gradient de température, dans l'outil peut atteindre les 200°C/mm. Dans ces conditions, il est délicat de définir une température de coupe. Si bien qu'en général, la température de coupe représente une valeur moyenne du champ thermique d'une zone particulièrement sollicitée, telle que l'interface outil/copeau pour un outil [15].



### III.2.2 Effets de la température de coupe

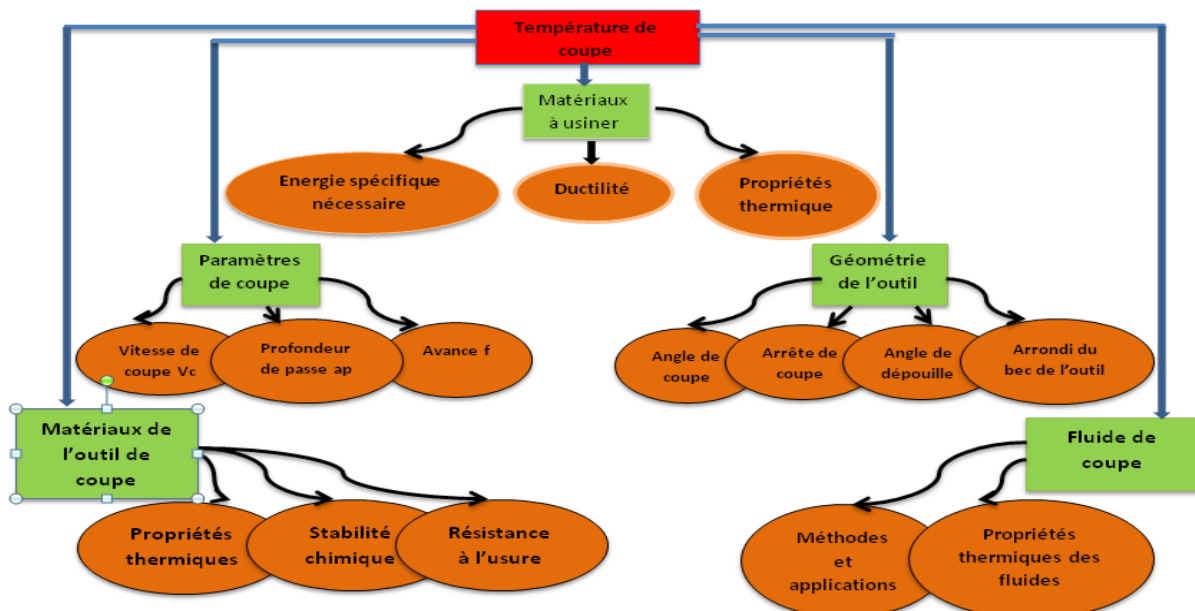
L'effet de la température de coupe, particulièrement quand elle est élevée, est nuisible pour l'outil de coupe et la pièce.

Les effets néfastes sur l'outil de coupe sont [15]:

- L'usure, qui réduit la durée de vie de l'outil de coupe,
- La déformation plastique des arêtes de coupe si le matériau de l'outil n'est pas assez dur,
- Endommagement des arêtes de coupe dus aux chocs thermiques,
- Formation de l'arête rapportée.

Les effets néfastes de la température sur la pièce [15]:

- Le manque de précision des dimensions de la pièce à cause de la distorsion thermique.
- L'expansion et la contraction durant et après l'usinage.
- Endommagement de la surface par oxydation, corrosion rapide, inflammation.
- Induction des contraintes résiduelles sur la surface.



**Figure III.3 :** Paramètres ayant une influence sur la température de coupe [15]

### III.3 Phénomènes thermiques pendant la coupe

Deux phénomènes distincts contribuent au dégagement de la chaleur :

- La déformation plastique.
- Le frottement à l'interface outil/copeau.

Le premier phénomène affecte tout le volume du copeau produit, le second est localisé aux surfaces en mouvement relatif: écoulement du copeau le long de la surface d'attaque de l'outil. Accessoirement, le frottement entre la pièce usinée et les bords des faces en dépouille, au voisinage de l'arête tranchante, peut également être une cause d'élévation de température de l'outil [15].

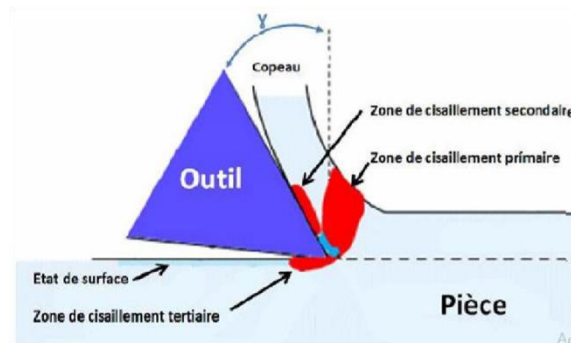


Figure III.4 : Origine de la chaleur produite [15]

### III.4. Détermination de la température de coupe :

La température de coupe est nécessaire pour être connue ou évaluée pour faciliter :

- L'usinabilité qui est jugée principalement par les forces de coupe et la température et la durée de vie.
- Conception et sélection des outils de coupe.
- Evaluation du rôle de la variation des différents paramètres d'usinage sur la température de coupe.
- Sélection et application des fluides de coupe.
- Analyse de la distribution de la température sur l'outil de coupe, la pièce et le copeau

### III .1 .Méthodes de mesure de la température de coupe

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la température au cours de l'usinage à savoir :

#### a). Mesures indirectes de la température de coupe :

La température de coupe est mesurée à l'aide d'un vernis thermosensible. Ce dernier est déposé sur l'outil et change de couleur à partir d'une valeur de température bien définie. La frontière entre deux couleurs présente l'isotherme [16].

D'autres méthodes consistent à introduire une poudre, dont on connaît le point de fusion, entre deux parties d'une plaquette. Lorsque la température de fusion de la poudre est atteinte, l'essai est arrêté. Les points où la poudre a atteint son point de fusion matérialisent l'isotherme [16].

#### b). Mesures directes de la température de coupe :

- Mesure de la température par thermocouples :

La mesure de la température par un thermocouple se base sur le principe suivant : si deux métaux sont soudés à leurs extrémités et si une de ces soudures est portée à une température bien déterminée, l'autre étant maintenue à une température différente, on observera alors une force électromotrice entre les deux jonctions. L'évaluation de cette force, qui dépend des matériaux utilisés, symbolise la température mesurée. L'avantage des thermocouples est la simplicité et la flexibilité de réalisation et d'utilisation pour de simple acquisition et ce à moindre coût. Il existe plusieurs types de thermocouples, les plus répandus sont les thermocouples standard et dynamique [16].

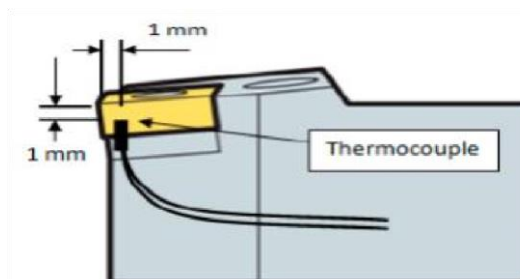


Figure III.5 Mesure de la température par thermocouples [16].

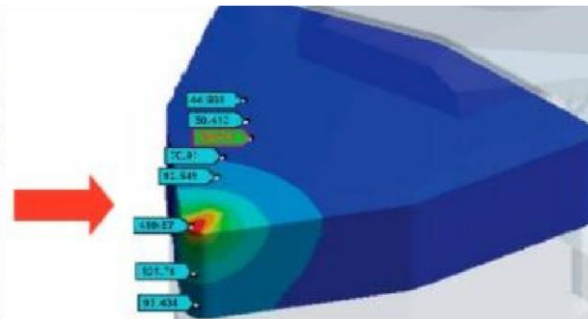
**c). Mesure de la température par la méthode optique**

La méthode d’implantation des thermocouples reste une technique onéreuse et ne permet pas d’effectuer des mesures de la température de contact outil-copeau. De plus, les difficultés liées à la connaissance pour reproduire les conditions de coupe afin de nourrir les modèles basés sur la méthode inverse et les erreurs de mesures liées à l’usure de l’outil. Il est donc nécessaire d’utiliser d’autres systèmes de mesure de température directes qui permettent une acquisition locale et au cours du temps au niveau de la zone de coupe (outil/pièce/copeau). Voir même au niveau des zones de cisaillement. Les seules méthodes permettant de faire des relevés de températures de la zone de coupe sur lesquelles l’évolution du contact pièce-outil copeau n’influe pas, sont celles basées sur l’émission d’onde électromagnétique d’un corps lorsqu’il est chauffé. Les techniques les plus répandues sont le pyromètre optique, la caméra infrarouge et la caméra proche infrarouge [16].

Le pyromètre est une technique basée sur l’émission d’onde électromagnétique. Le principe consiste à comparer deux énergies (dans la même bande de longueur d’onde), celle émise par le corps chauffé à celle émise par une source étalon. L’étalonnage d’un pyromètre se fait à l’aide d’un corps noir [16].



**Figure III.6** Pyromètre à infrarouge [16].



**Figure III.7** Les valeurs de la Température de l’outil pour certains endroits [16].

**III .5. Formulation des modèles :**

Il existe Trois formulations principales sont utilisées dans la simulation de la coupe des métaux. Il s’agit de :

- Lagrangienne(Lagrangian),
- Eulérienne (Eulerian),

- Lagrangien-Eulérienne arbitraire (ArbitraryLagrangian - Eulérien (ALE)).

### **III.5.1. Approche Lagrangienne :**

L'approche lagrangienne est une description matérielle liée à la matière.

Les points de la grille de discrétisation sont fixés à la matière et se déplacent à la vitesse matérielle. Les grandeurs de l'écoulement (vitesse, pression ...) sont calculées de la même façon, en chaque point, au fur et à mesure de l'avancée du processus.

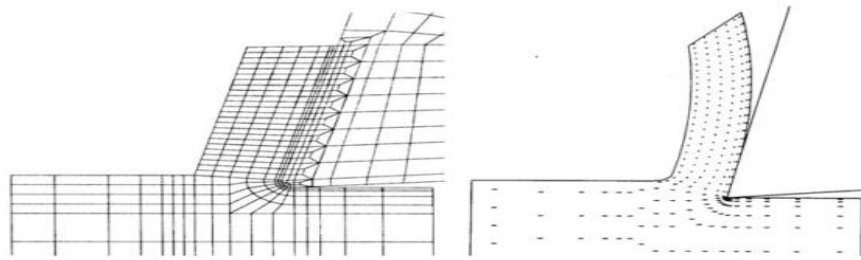
Cette description a certaines qualités pour l'application au problème de la coupe. Le traitement des conditions aux limites de surface libre est simple. Il est possible de suivre une grandeur attachée à une particule de l'écoulement. Les deux principales difficultés associées à cette approche sont d'une part le traitement des grandes déformations et d'autre part, la gestion de la séparation du copeau. Les grandes déformations localisées génèrent des distorsions de mailles importantes et implique l'utilisation technique de remaillage ou de maillage pré-distordu. La séparation du copeau nécessite une gestion spécifique car il y a création de nouveaux bords libres. Malgré ces difficultés, l'approche lagrangienne permet de réaliser des modélisations complètes de cas de coupes stationnaires (copeaux continus) et instationnaires (copeaux discontinus) [17].

### **III.5.2. Approche Eulérienne :**

Cette approche focalise l'attention sur une région fixée de l'espace au travers de laquelle s'écoule la matière. Son application à la simulation de la coupe est couplée avec une gestion des surfaces libres permettant, à partir d'une définition plus ou moins grossière de la géométrie initiale du copeau, d'obtenir l'écoulement en phase stationnaire d'un copeau continu (figure III.8). La gestion des surfaces est définie de manière à obtenir des composantes normales de vitesses nulles sur la surface libre de la pièce et du copeau, ainsi que des contraintes normales négatives sur l'interface de contact.

Ce type d'approche permet d'étudier l'influence de certains paramètres du procédé sur la formation d'un copeau continu. Kim, Lee et Sin [18] détaillent par exemple l'influence de la profondeur de passe, de la vitesse de coupe et du rayon d'arête de l'outil sur les champs de déformations, de contraintes et de températures obtenus. Leur modèle thermo-visco-plastique est validé à partir d'une comparaison des efforts mesurés expérimentalement et obtenus par

simulation. Cette formulation est à la base des premières simulations réalisées en coupe orthogonale, mais ne permet pas de rendre compte de la formation d'un copeau discontinu.



**Figure III.8 :** Configurations initiale et finale issues du modèle de Kim, Lee et Sin [18]

### **III .5.3. Approche Eulérienne-Lagrangienne Arbitraire (ALE) :**

Cette approche est un compromis entre les approches Eulerienne et Lagrangienne. Elle repose sur l'utilisation d'un maillage mobile partiellement indépendant des points matériels. Le maillage est globalement Lagrangien, au sens où il est nécessaire que sa frontière suive la surface du domaine occupé par la matière. Mais une liberté de choix quant au mouvement des nœuds internes est introduite. Cette dissociation entre maillage et matière permet de s'affranchir des problèmes de distorsions.

### **III .6. Maillage :**

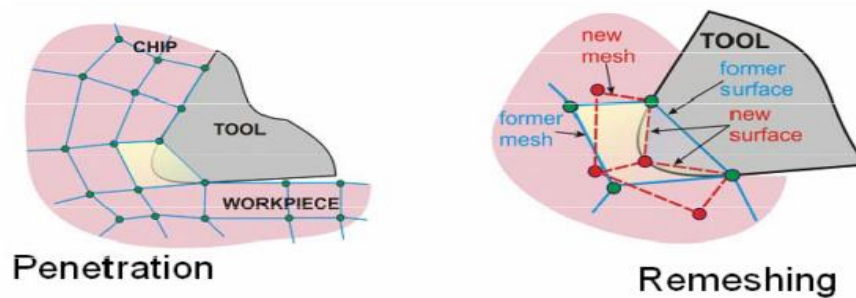
Le maillage est la première étape de la méthode des éléments finis. C'est une étape fondamentale qui conditionne tout le reste du calcul : le temps de calcul et les ressources nécessaires (mémoire vive, mémoire virtuelle, temps processeur), la précision des résultats, la stabilité du modèle (possibilité de divergence dans le cas de calculs non-linéaires). Cette procédure est appelée discrétisation. et elle est purement géométrique. Un bon maillage est donc un maillage qui :

1. Permet d'avoir des résultats proches de la réalité.
2. Permet au calcul de tourner avec les moyens disponibles (capacités du système informatique), et en un temps compatible avec la durée du projet.

Il est difficile de maintenir la forme générale des mailles initiales des éléments finis à cause des différentes déformations plastiques durant la coupe des métaux ou le formage du métal. La distorsion due au non linéarité, conduit à des erreurs numériques. Pour

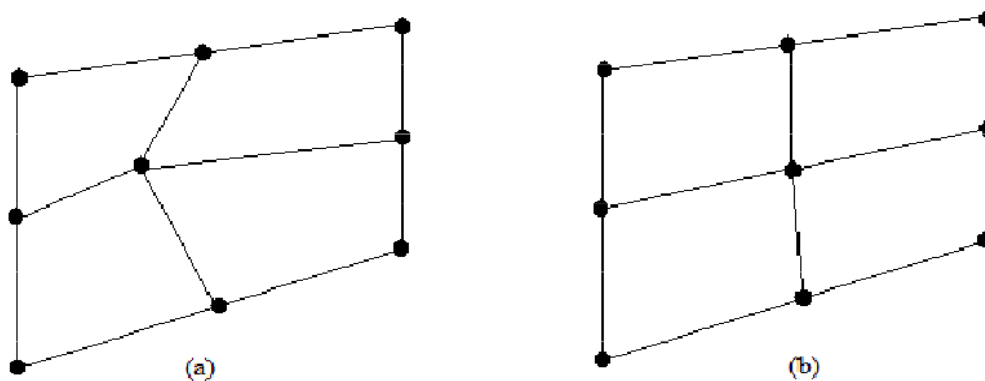
résoudre ce problème, une nouvelle maille des éléments finis doit être générée dans la manière à changer la taille, celle-ci est appelée procédure de maillage adaptative.

L'une des procédures de maillage adaptatives est la technique de remaillage continu, et comporte la génération de nouvelles mailles des éléments finis hors les mailles existantes détruites. La deuxième technique est appelée technique de raffinement basée sur l'augmentation de la densité des mailles locales par la réduction de la taille de l'élément local, comme est montré sur la figure (III.9) [15].



**Figure III.9 :**Raffinement (a) maille locale initiale, (b) réduction de la taille de l'élément [19]

La dernière technique des mailles adaptative est le lissage qui a pour objet la réallocation des nœuds pour avoir de meilleures formes d'éléments comme est montré sur la figure (III.11). La procédure de maillage adaptative réduit les erreurs de la solution durant les calculs, ainsi elle améliore l'exactitude de la simulation. Pour ces raisons, la procédure des mailles adaptative doit être utilisée dans la simulation des EF y compris la déformation plastique comme la mise en forme des métaux [15].



**Figure III.10:**Lissage: (a) maille locale initiale, (b) Réallocation des nœuds [20]

### III.7. Modèles constitutifs de la coupe des métaux :

Il existe divers codes de calculs (DEFORM, ANSYS, Ls-DYNA, ABAQUS, FORGE, THIRDWAVE PRODUCT ADVANTEDGE ...), disponibles pour les simulations numériques des procédés de perçage.

L'un des plus importants sujets sur la coupe des métaux est la modélisation de l'écoulement des contraintes des matériaux lors de le perçage, celui-ci dépend des déformations, températures,...et peut être représenté par des formes mathématiques d'équations constitutives, parmi ces modèles les plus largement utilisés dans la simulation de la coupe des métaux sont : le modèle de Oxley, Johnson Cook, Zerilli Armstrong et Ramberg-Osgood [15]

#### III.7.1. Modèle de Johnson et Cook [21]:

La loi de comportement de Johnson-Cook [21] est très utilisée dans les simulations numériques de procédés dynamiques notamment dans le perçage .

Le modèle de Johnson-Cook [21] exprime la contrainte équivalente sous forme d'une fonction de 3 constantes du matériau :  $\bar{\epsilon}^p$  La déformation plastique  $\dot{\bar{\epsilon}}$  La vitesse de déformation.

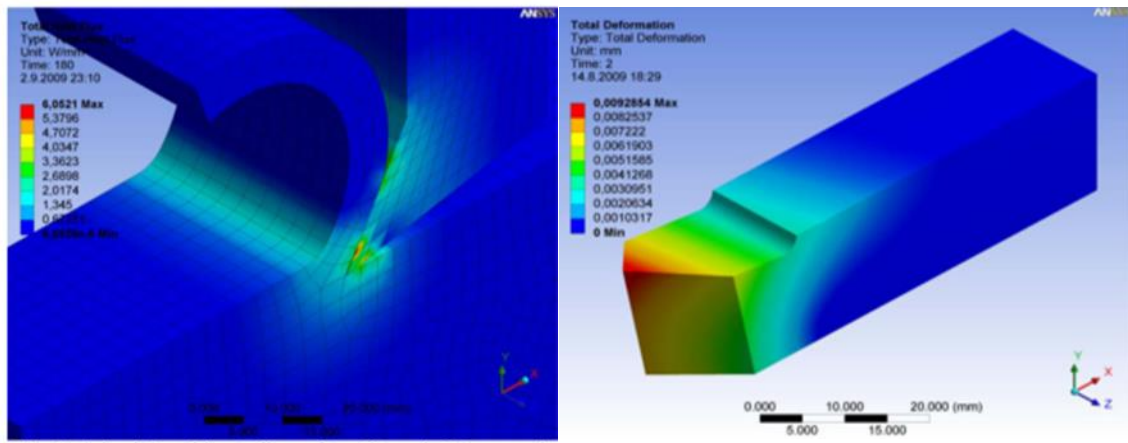
$$\sigma = (A + B(\bar{\epsilon}^p)^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0}\right)^m\right] \quad (2.1)$$

$T$  Désignant la température. La loi de comportement de Johnson-Cook nécessite la connaissance de 5 paramètres :  $A, B, C, n$  et  $m$  . Les paramètres  $A, B$  et  $n$  sont liés au comportement élasto-plastique du matériau,  $C$  permet de décrire la sensibilité à la vitesse de déformation et  $m$  représente la sensibilité du matériau à la température. Les températures  $T_{amb}$  et  $T_0$  désignent une température de référence et une température de fusion.

### **III .8. Quelques travaux numériques de la coupe des métaux en 3D:**

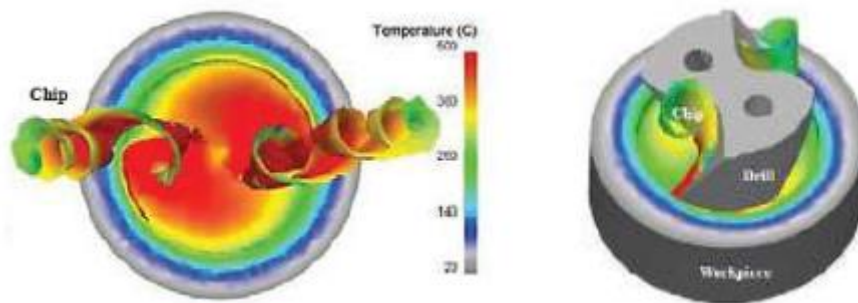
Pavel KOVAČ [22] a utilisé la MEF pour modéliser en 3D les phénomènes de coupe mécaniques et thermiques durant une opération de tournage par le logiciel ANSYS Workbench afin de déterminer le flux de chaleur et d'obtenir les informations à propos de la durée de vie de l'outil du fait qu'il est l'un des facteurs les plus importants à tester .





**Figure III.11:** flux de chaleur après 20 et 180 secondes et la déformation totale par (Pavel KOVAČ,2011) [22]

Abouridouane et al. [27] ont simulé sous Deform-3D la formation des copeaux ainsi que les chargements thermiques induits par une opération de perçage (voir Figure III .12 ).



**Figure III .12 :** Modèle numérique de perçage dans Deform-3D [27]

Benabid Farida [15] a simulé par la méthode des éléments finis le procédé de fraisage périphérique de l'aluminium par l'introduction des données de coupe, les données géométriques , les données thermomécaniques et les conditions aux limites afin de déterminer les contraintes de Von Mises et le champs de températures.

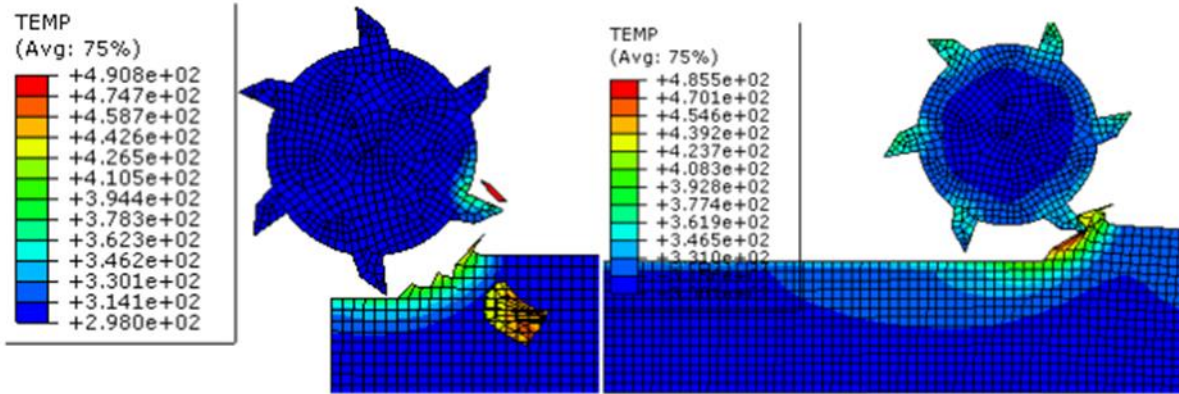


Figure III.13 :Champs de températures pendant 2 stades de simulation

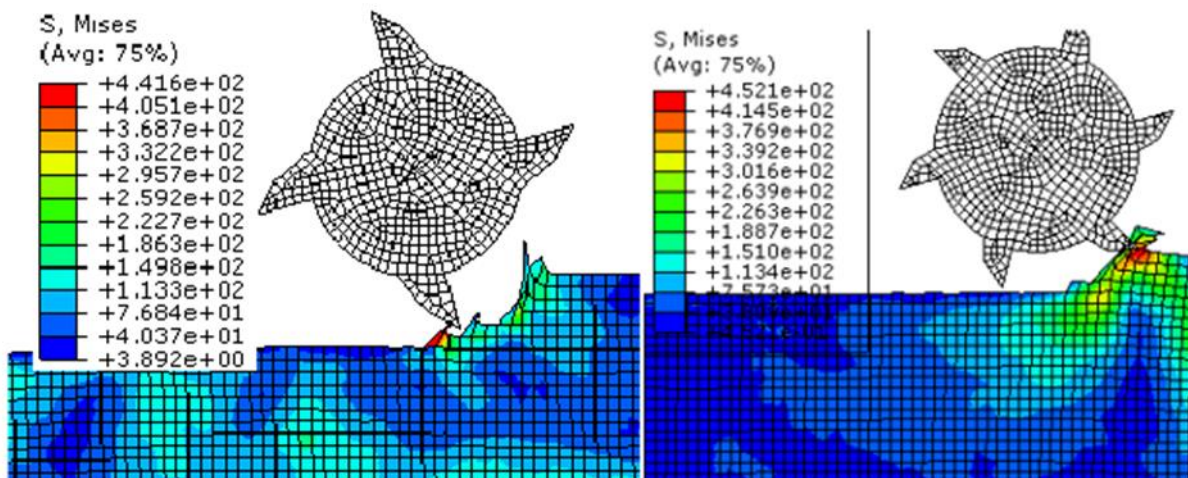


Figure III.14 : Figure champs de contraintes équivalentes deVon Mises [15]

*Chapitre IV : La simulation numerique du profile de  
la temperature a l'interface outil –copeau par les  
elements finis*

## **IV.1. Introduction :**

La simulation numérique est particulièrement basée sur la méthode des éléments finis, elle représente actuellement une phase inévitable [1].

Le but de toute simulation est de reproduire le processus réel le plus fidèlement possible. Pour cela, le modèle numérique doit prendre en compte le problème physique et les phénomènes thermomécaniques présents. Pour améliorer la fabrication, la qualité, la performance de l'outil de coupe et la réduction du coût, plusieurs industries cherchent à bien comprendre le processus de coupe des métaux.

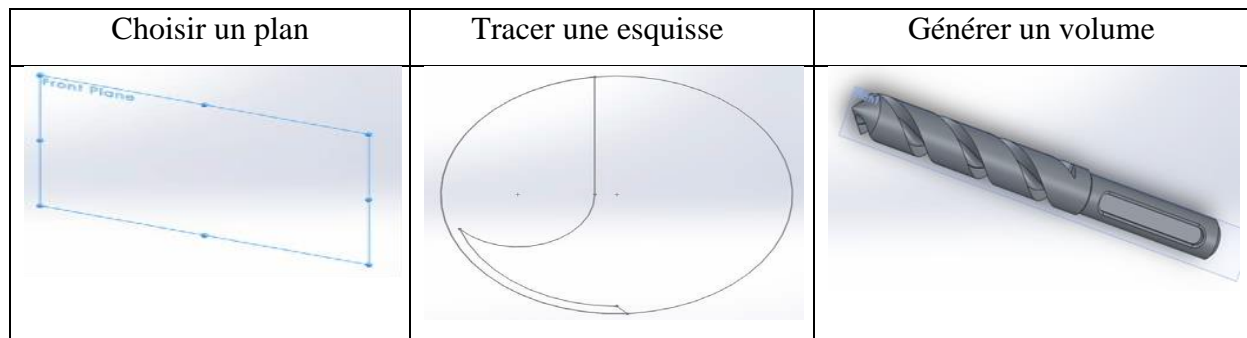
A cet effet, un certain nombre d'études numériques ont pu décrire le comportement thermique, thermomécanique de l'outil et même du système outil/pièce/copeau avec des codes commerciaux comme NASTRAN, ABAQUS, COSMOS ,DEFORM3 ou encore ANSYS.

nous allons à travers ce chapitre modéliser et simuler la formation du copeau en 3D d'une opération de perçage à sec de l'acier standard . Pour cela, on a utilisé la loi de comportement et d'endommagement de Johnson-Cook dans le but de prévoir la distribution de la température à l'interface foret /copeau sachant que la température qui se forme suite au frottement dans le couple foret /pièce a une influence sur la durée de vie de l'outil. On va 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/Explicite.

## **IV. 2. Modélisation de l'outil et de la pièce (Création du modèle) :**

La pièce est l'objet 3D monobloc. La modélisation d'une telle entité dépendra de la culture de l'utilisateur. Comme de nombreux logiciels conviviaux, Solidworks permet d'aboutir à un même résultat apparent par des voies souvent différentes. C'est lors de la retouche de ces fichiers ou de leur exploitation qu'on appréciera la bonne méthode. Une pièce est la réunion d'un ensemble de fonctions volumiques avec des relations d'antériorité, des géométriques, des relations booléennes (ajout retrait)... Cette organisation est rappelée sur l'arbre de construction. Chaque ligne est associée à une fonction qu'on peut renommer à sa guise. [25]

### **IV .2.1. Etapes pour l'obtention d'un volume sous Solidworks :**



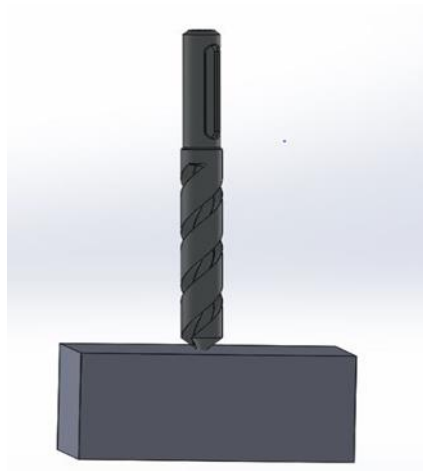
**Figure.IV .1.** Etapes pour l'obtention d'un volume sous solidworks

### **IV.2.2 . Assemblages :**

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition de pièces. La mise en position de pièces est définie par un ensemble des contraintes d'assemblage associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxialité...). Dans une certaine mesure, ces associations de contraintes s'apparentent aux liaisons mécaniques entre les pièces. Le mécanisme monté, s'il possède encore des mobilités, peut être manipulé virtuellement. On peut alors aisément procéder à des réglages à l'aide des différents outils disponibles (déplacement composants, détection de collision ou d'interférence, mesure des jeux, etc.) [25]

### **IV .2.3. Etapes de l'assemblage :**

- a. Ajouter des pièces dans un assemblage
- b. Déplacer et faire pivoter des composants dans un assemblage.
- c. On peut positionner et orienter les composants à l'aide des contraintes qui créent des relations entre les composants. [25]



**Figure.IV.2** L'ensemble outil / pièce

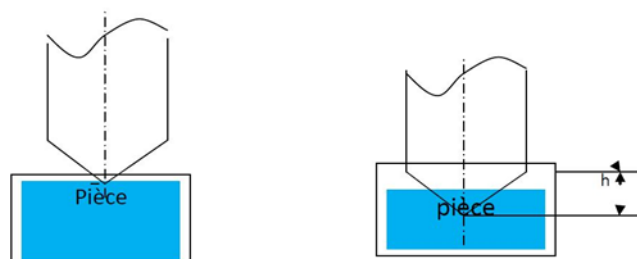
#### **IV.4. Simulation du perçage :**

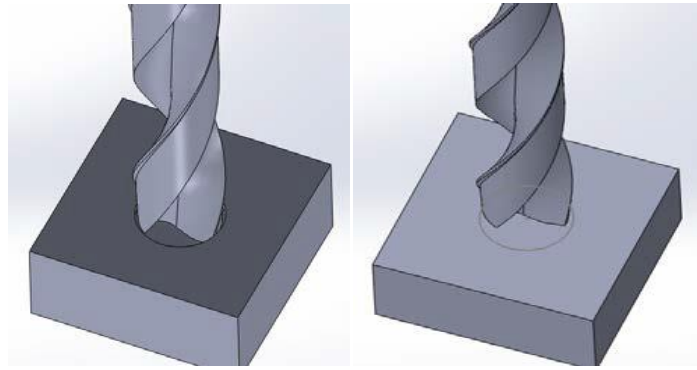
La simulation 3D de l'opération du perçage par la méthode des éléments finis est très intéressante car elle permet d'obtenir des indications sur l'écoulement des copeaux et la morphologie de ceux-ci. Elle donne accès aux champs des contraintes et des températures dans l'outil et dans la pièce.

Deux phases de l'opération de perçage peuvent être simulées (**Figure IV.3**) :

- La phase de pénétration du foret : dans ce cas le perçage est simulé depuis le contact initial du foret avec la pièce à percer.
- La phase suivante du perçage, c'est à dire la réalisation du trou à partir d'une profondeur  $h$ . Dans cette phase, la pièce est supposée déjà percée d'un trou de profondeur  $h$  et le foret commence alors à percer à partir de cette profondeur

La pièce usinée est modélisée par un cube de longueur 50mm, d'épaisseur 30mm en 3D en utilisant le logiciel Solidworks. L'outil modélisé est un foret à goujure hélicoïdale de diamètre 12 mm.





**Figure IV.3** Représentation des deux types de simulations

### **IV.5. Application au modèle numérique :**

Des modèles numériques simulant l'usinage ont déjà été réalisés avec le logiciel d'éléments finis ANSYS intégrant la loi de Johnson-Cook [21].

Il y a plusieurs paramètres importants à prendre en compte pour la modélisation de l'usinage. Nous cherchons donc à simuler en élément finis la formation du copeau. Nous avons ensuite affiné notre modèle en modifiant la dimension des composants pour avoir un résultat précis.

On donne dans ce qui suit la démarche à effectuer pour simuler l'opération de perçage en 3D de l'acier standard avec le logiciel ANSYS.

#### **IV.5.1. ANSYS explicite :**

Nous utiliserons pour notre démarche de simulation, la version explicite du logiciel ANSYS : un produit d'analyse d'élément fini qui adopte un schéma d'intégration explicite pour résoudre les problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.

Le critère de base de cette intégration permet aussi la simplification de la gestion des contacts (frottements), dans notre cas on l'adapte pour la coupe des métaux.

### **IV.6 . Lois de comportement :**

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

Pour décrire le comportement mécanique et thermomécanique de la pièce en Acier standard, la loi de type Johnson Cook [21] a été choisi.

### IV.6.1 .Comportement mécanique de la pièce :

Un modèle 3D 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 foret rigide.

Le comportement du matériau usiné est pris en compte par une loi de type Johnson-Cook. C'est un modèle semi-empirique très utilisé pour lequel les paramètres sont disponibles pour de nombreux métaux [ 21]

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

Avec :

$(\dot{\bar{\epsilon}})$  :est la vitesse de déformation plastique,

$(\dot{\bar{\epsilon}}^0)$  : 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.

$(A ,B \text{ et } n)$  :sont les paramètres représentant l'écrouissage,

$C$  : est la constante définissant la dépendance à la vitesse de déformation,

$m$  : est le paramètre définissant la dépendance à la température.

### IV.6.2. Critère d'endommagement de Johnson-Cook :

La loi d'endommagement de Johnson et Cook [21] 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).

$$\epsilon_f = \left(D_1 + D_2 \exp D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \left(1 + D_5 \left(\frac{T-T_0}{T_{amb} - T_0}\right)\right) \quad (IV.2)$$

Où :



$\varepsilon_f$ : La déformation équivalente à rupture du matériau ,

$\sigma_m$  : La contrainte moyenne ,

$\sigma_{eq}$  : La contrainte équivalente de Von Mises,

$D_1, D_2, D_3, D_4$  et  $D_5$  :sont les constantes de rupture de Johnson-Cook( les paramètres d'initiation de l'endommagement du matériau usiné à déterminer expérimentalement.

## **IV.7. Simulation du problème en ANSYS :**

### **IV.7.1. Les étapes à suivre pour la modélisation :**

Le code d'éléments finis ANSYS R.19.0 est utilisé dans cette partie pour simuler le comportement du mécanisme de contact par frottement des deux corps (pièce et foret ) lors d'une opération de perçage . Ce code possède des algorithmes de gestion du contact avec frottement basés sur la méthode des multiplicateurs de Lagrange, ou bien une méthode de Lagrangien augmentée.

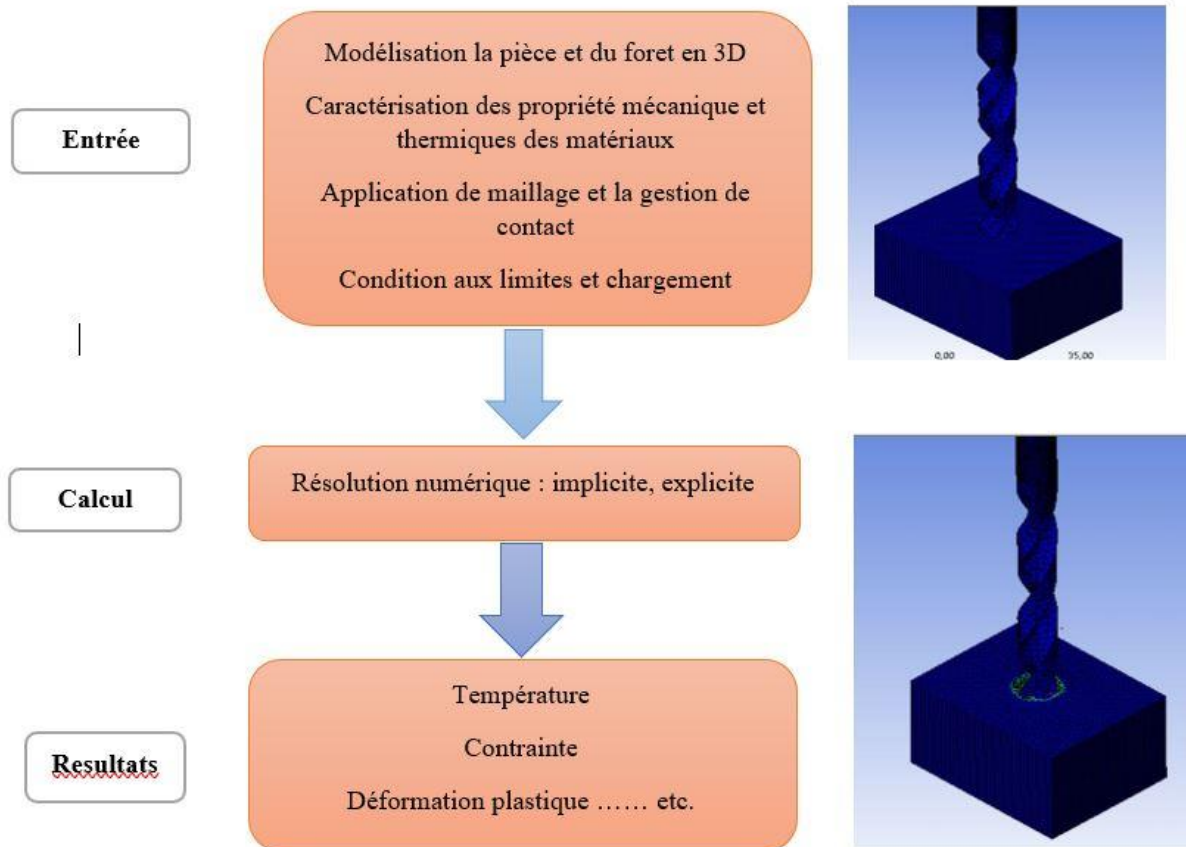
Pour commencer l'étude, la création du modèle sur ANSYS Workbench est une étape très importante. Il faut sélectionner l'analyse explicite dynamique pour spécifier le type de résolution. Cette dernière représente la modélisation de la pièce et de l'outil (foret ) .

La deuxième étape consiste à définir le matériau. Les matériaux vont être sélectionnés dans la bibliothèque de logiciel en caractérisant pour chaque pièce les propriétés mécaniques et physiques.

Dans la troisième étape, on choisit le type de maillage. Plus les mailles sont petites, plus la précision est grande. La prochaine étape est de définir les conditions aux limites et chargement.

La dernière étape de cette analyse est l'obtention des résultats, le logiciel nous donne des solutions schématiques selon le type de résolution.

La figure suivante montre les procédures à suivre pour la modélisation de la température sur ANSYS Workbench explicite dynamique.



**Figure IV.4:** Procédure de la modélisation numérique de la formation des copeaux lors de l'utilisation de logiciel ANSYS Workbench explicite dynamique

#### **IV.8. Modélisation de l'outil de coupe :**

Durant l'analyse, l'outil de coupe est assimilé à un corps indéformable (rigide), aucun champ de déformation sur le corps, mais avec une conduction de la chaleur; les variables géométriques de l'outil sont données

#### **IV.9. Modélisation de la pièce à usiner :**

L'étude s'est focalisée sur un acier standard du fait de sa forte utilisation dans l'industrie. Il est fourni en barre carrée de dimensions (diamètre 50 x 50 x 30 mm).

Cet acier est très utilisé dans les domaines du secteur automobile et machinerie pour confectionner de nombreux produits.

Le logiciel ANSYS met à la portée des utilisateurs des données sur le comportement de quelques matériaux, sous forme de tableaux contenant des valeurs de contrainte et de déformation en fonction de différentes températures et vitesses de déformation. En outre, il est

possible de déterminer les paramètres de certaines lois de comportement notamment celle de Johnson – Cook[21].

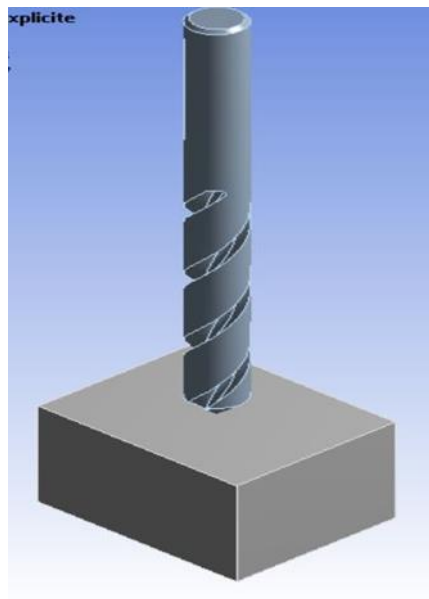
Les tableaux (IV.1) et (IV.2) donnent respectivement les critères et les paramètres de la loi de Johnson Cook du matériau standard [26]

$A[MPa]$	$B[MPa]$	$C(-)$	$n(-)$	$m(-)$	$T_0(^{\circ}C)$
792	510	0,26	0,014	1,03	1427

**Tableau IV.1:**Paramètres de la loi de comportement de l'acier standard

D1	D2	D3	D4	D5
0.05	344	-2.12	0.002	0.61

**Tableau IV.2 :** Critère d'endommagement Johnson-Cook de l'acier standard



**Figure IV.5:** Création du modèle sur ANSYS Workbench

#### **IV.10. Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce et le foret :**

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




Propriétés	Acier standard	Foret en carbure métallique
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	7850	7830
Module de Young (GPa)	200	530
Coefficient de Poison	0.3	0.31
Chaleur spécifique (J/kg k)	434	477
Module de cisaillement	7.6923 x10 <sup>^10</sup>	8.18 x 10 <sup>^10</sup>

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

#### IV.11. Conditions aux limites et chargement :

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

Le modèle ci-dessous représente une opération de perçage, Pour les conditions de coupe, on a pris trois cas :

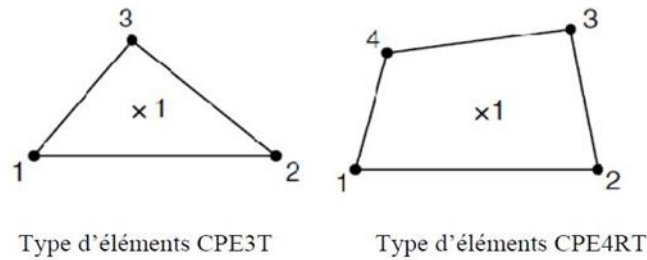
-  : **1<sup>er</sup> cas** :  $V_c = 420 \text{ m/min}$  et  $f = 0,4 \text{ mm/tr}$ .
-  : **2<sup>ème</sup> cas** :  $V_c = 460 \text{ m/min}$  et  $f = 0,2 \text{ mm/tr}$ .
-  : **3<sup>ème</sup> cas** :  $V_c = 900 \text{ m/min}$  et  $f = 0,4 \text{ mm/tr}$ .

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

#### IV. 12. Types d'éléments et domaine du maillage :

Pour la simulation du processus de coupe, les codes commerciaux les plus utilisés sont, ANSYS, et DEFORM. ABAQUS est un outil très important pour résoudre les problèmes linéaires et non linéaires statiques et dynamiques, contact entre solides et la capacité de modéliser de larges changements dans les solides. Plusieurs auteurs développent différents modèles et techniques pour des cas spécifiés dans la simulation du champ de coupe.

Le domaine des mailles à différentes conditions aux limites, géométriques et régions pour l'analyse, tous les modèles dépendent des conditions d'usinage, la géométrie de l'outil, la morphologie des copeaux. Chaque modèle employé a le même type d'éléments, généralement quadrilatéral avec des propriétés thermomécaniques couplées (CPE3T, CPE4RT).



**Figure (IV-7) :** Types d'éléments pour le maillage de la pièce à usiner[15]

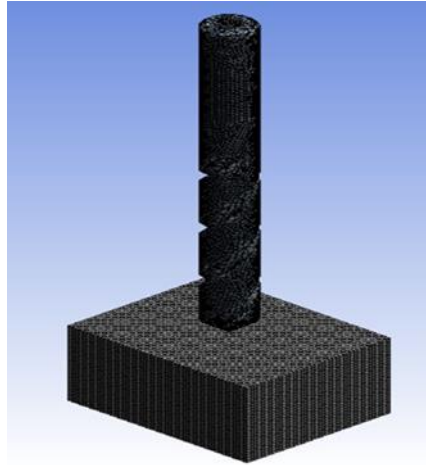
#### **IV.12.1. Le maillage et la gestion de contact :**

Une fois la structure créée, on procède au maillage. Le modèle pièce/foret a été maillé par des éléments volumiques tétraédriques et quadratiques.

L'outil de coupe est modélisé en générant 121768 éléments, et 78315 nœuds. Le couplage thermomécanique est introduit. La distribution des mailles est uniforme sur toute la surface de l'outil, 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 20°C.

La gestion du contact est basée sur la stratégie de la surface maîtresse et de nœuds esclaves. On définit une surface maîtresse (corps rigide) et une surface esclave (corps déformable) en sélectionnant les ensembles de corps concernés par le contact.

La figure montre respectivement le maillage par élément finis et la méthode de contact (foret /pièce) utilisé.



**Figure IV.8:** Méthode appliquée pour le contact (Foret / pièce)

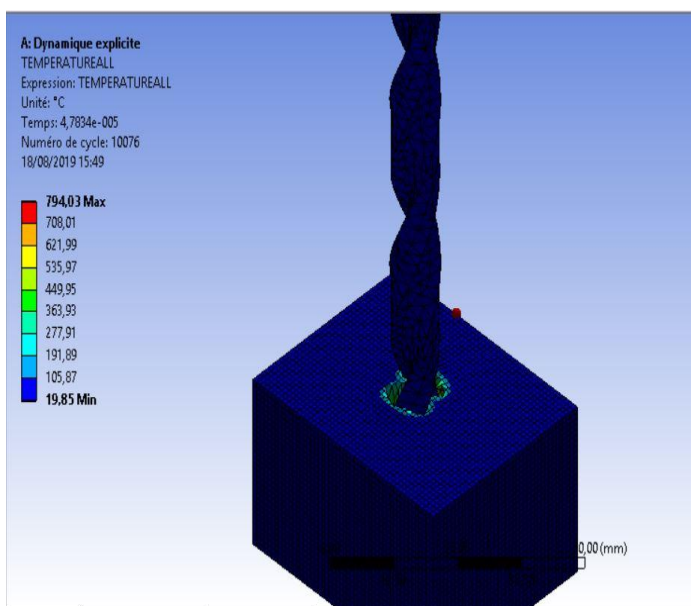
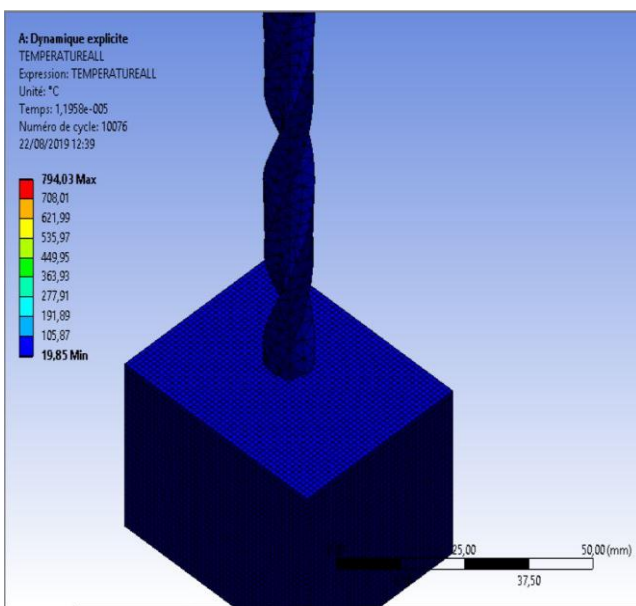
### **IV.13. RESULTATS DE LA SIMULATION :**

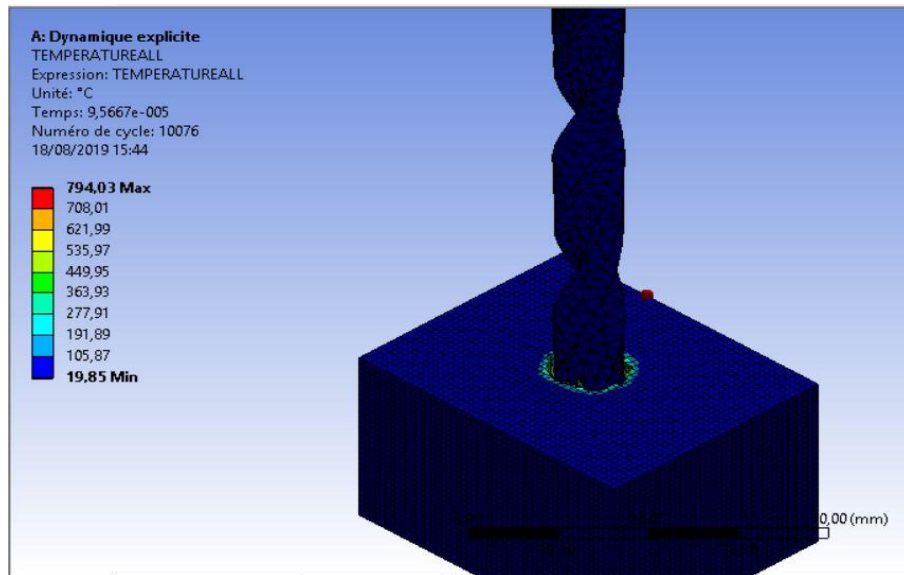
#### **IV .13.1. Distribution de la température à l'interface outil/pièce/copeau:**

Dans notre modèle numérique d'usinage en 3D, nous arrivons à obtenir la formation d'un copeau et à définir l'influence de la vitesse de coupe sur le profil de la température à l'interface foret /copeau. On observe convenablement le déchirement de la matière formant un copeau.

Les distributions de la température à l'interface outil/pièce/copeau sont présentées dans notre simulation pour les trois cas étudiés.

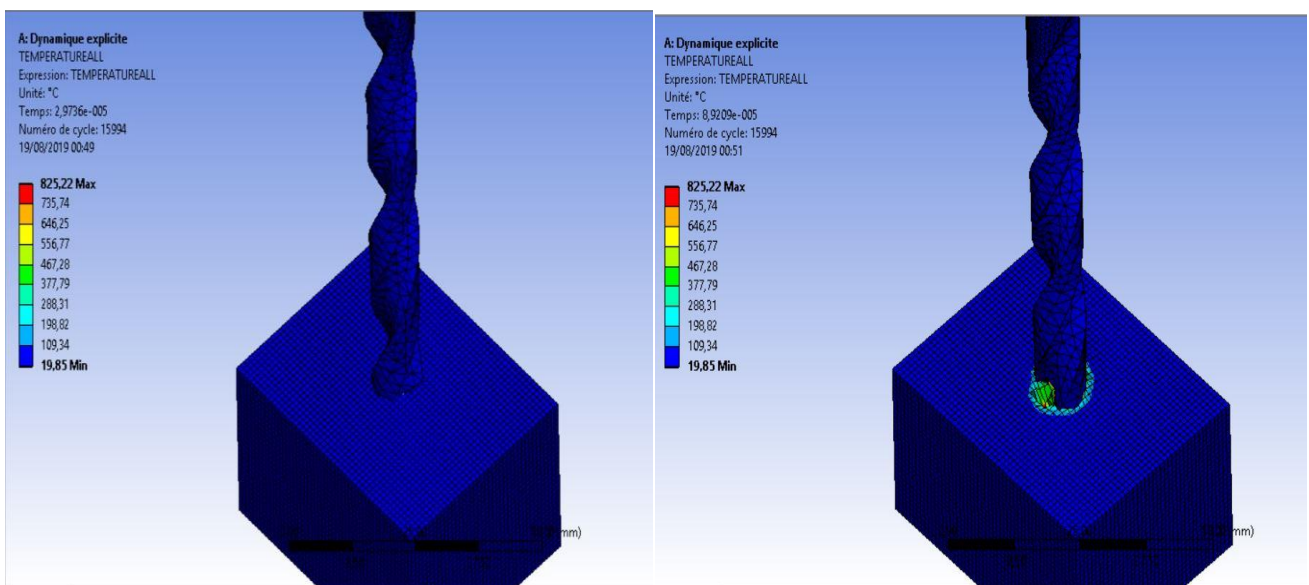
- **1<sup>er</sup> cas :**  $V_c = 420\text{m/min}$  and  $f = 0,4\text{mm/tr}$ :

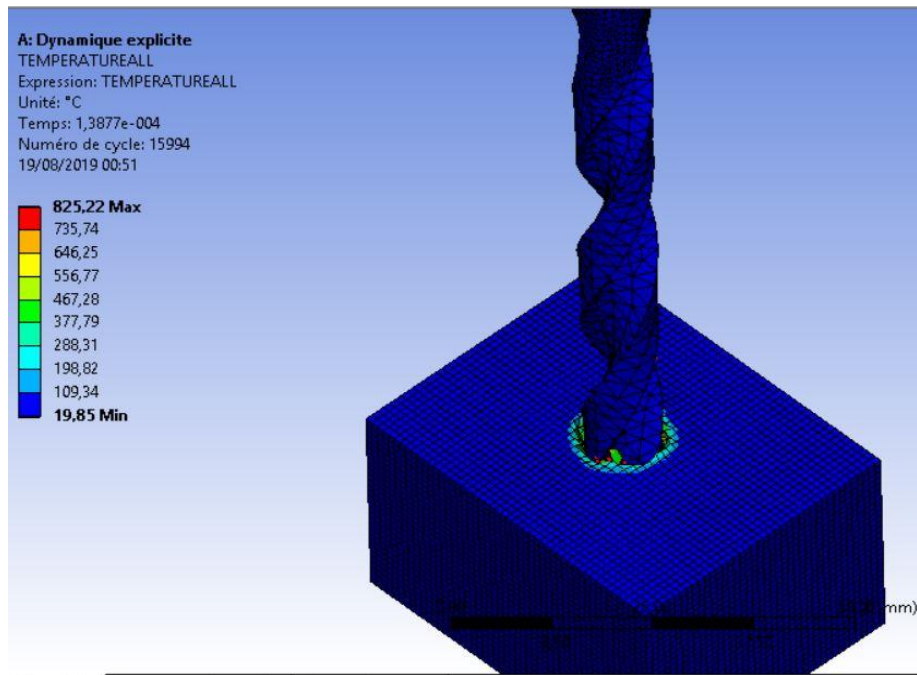




**Figure IV.9:** la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier standard ( $V_c= 420m/min$  and  $f=0,4mm/tr$ )

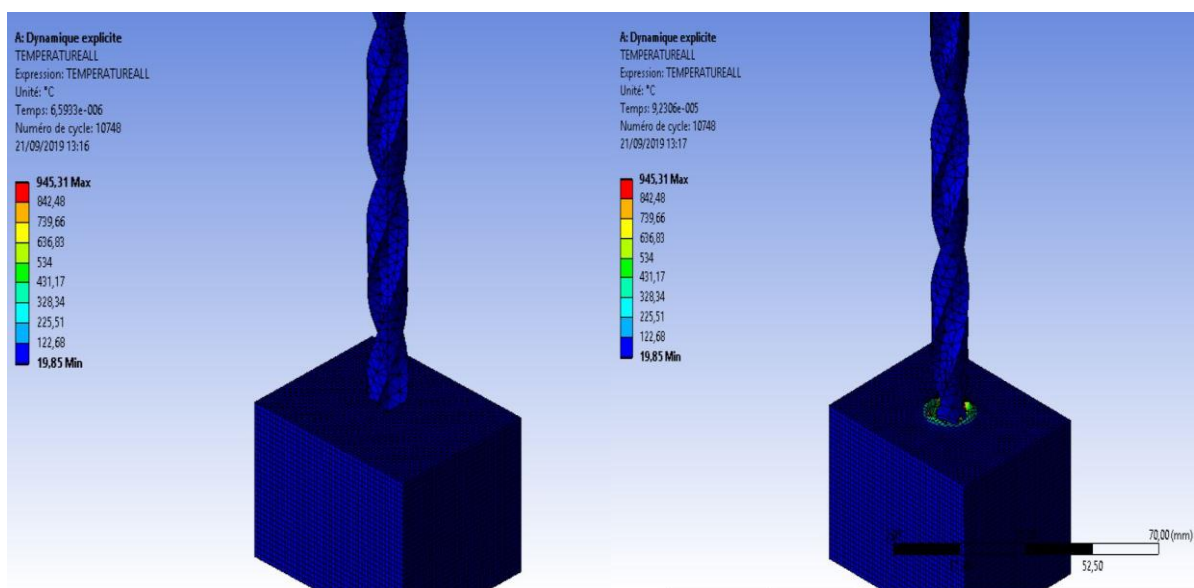
- 2<sup>ème</sup> cas :  $V_c= 460m/min$  and  $f=0,4mm/tr$ ;



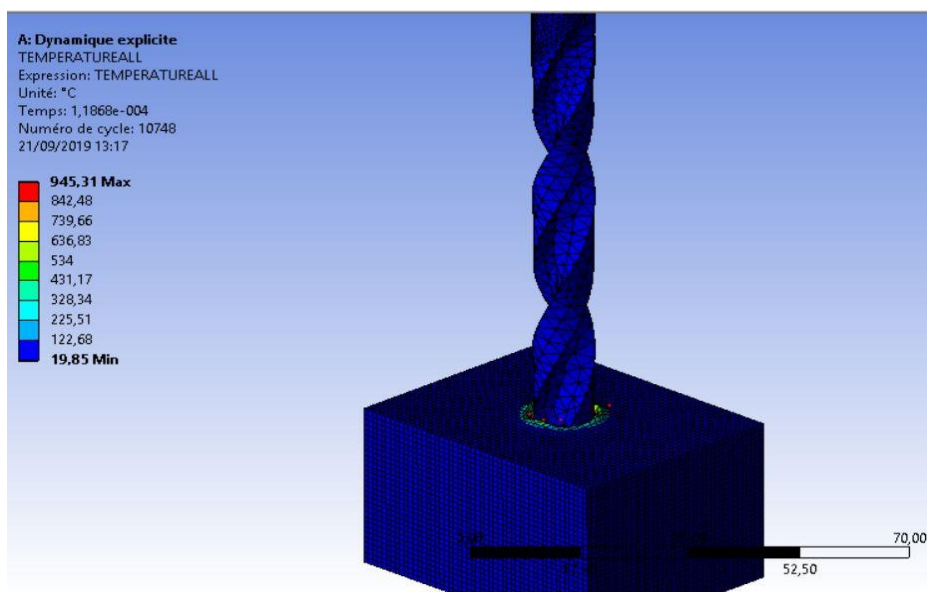


**Figure IV.10:** la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier standard ( $V_c = 460\text{m/min}$  and  $f = 0,4\text{mm/tr}$ )

- **3<sup>ème</sup> cas :**  $V_c = 900\text{m/min}$  et  $f = 0,4\text{mm/tr}$ ;



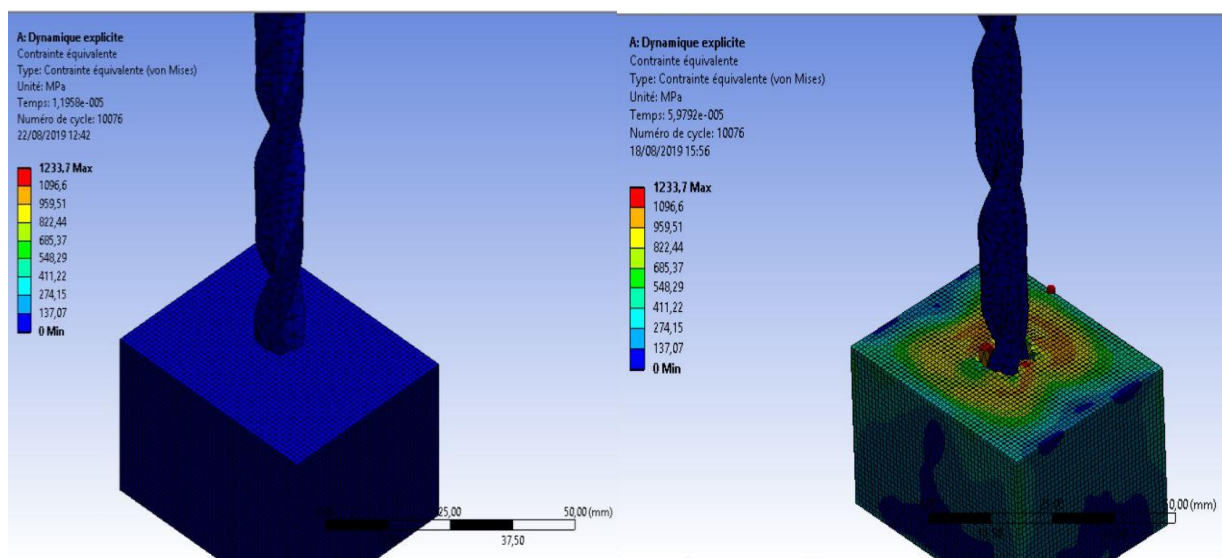


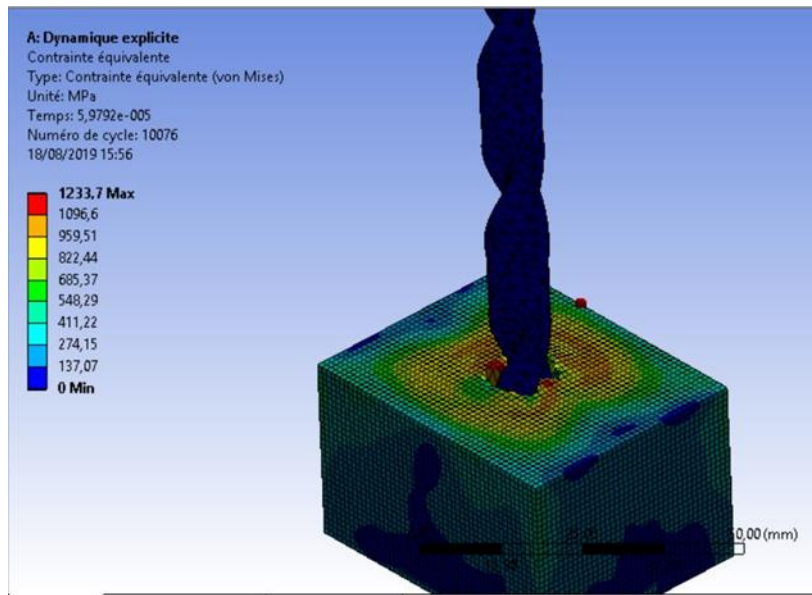


**Figure IV.11:** la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier standard ( $V_c= 900m /min$  et  $f=0,4mm/tr_;$ )

#### IV .13.2. Distribution des contraintes équivalentes à l'interface outil/pièce/copeau :

- **1<sup>er</sup> cas :**  $V_c= 420m/min$  et  $f=0,4mm/tr$

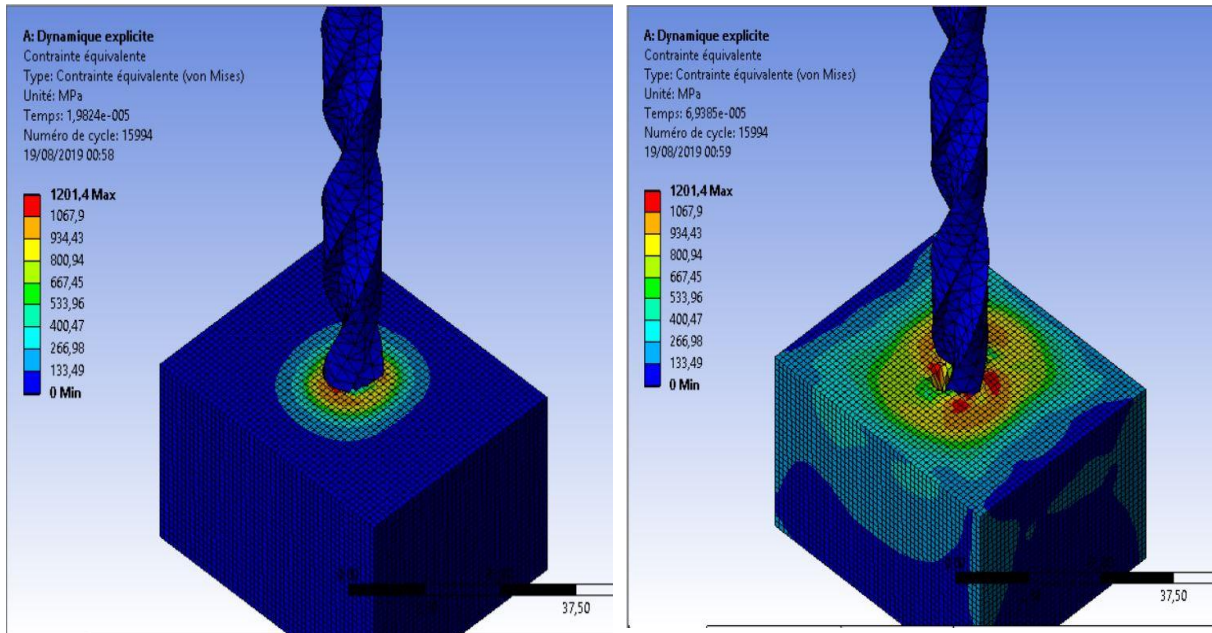


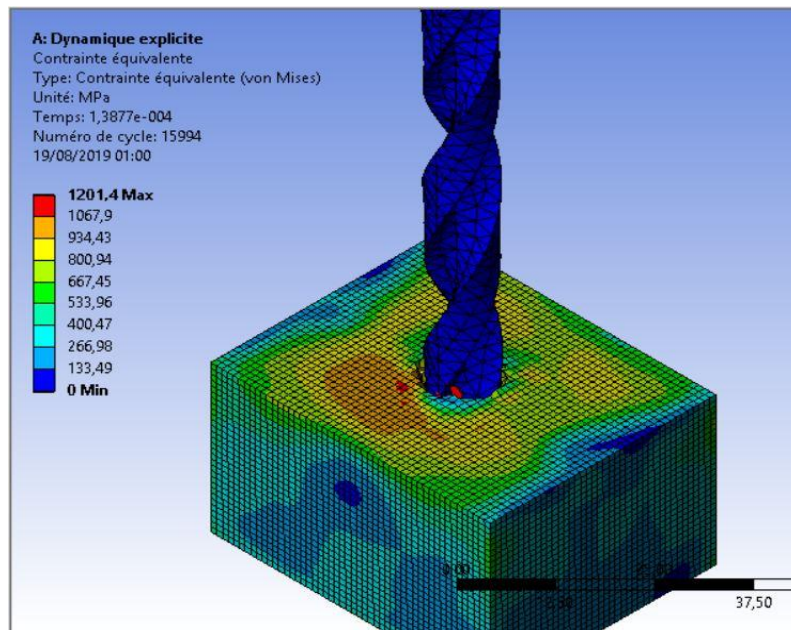


**Figure IV.12:** Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises

*( $V_c = 420\text{m/min}$  et  $f = 0,4\text{mm/tr}$ )*

2<sup>ème</sup> cas :  $V_c = 460\text{m/min}$  and  $f = 0,4\text{mm/tr}$ ;

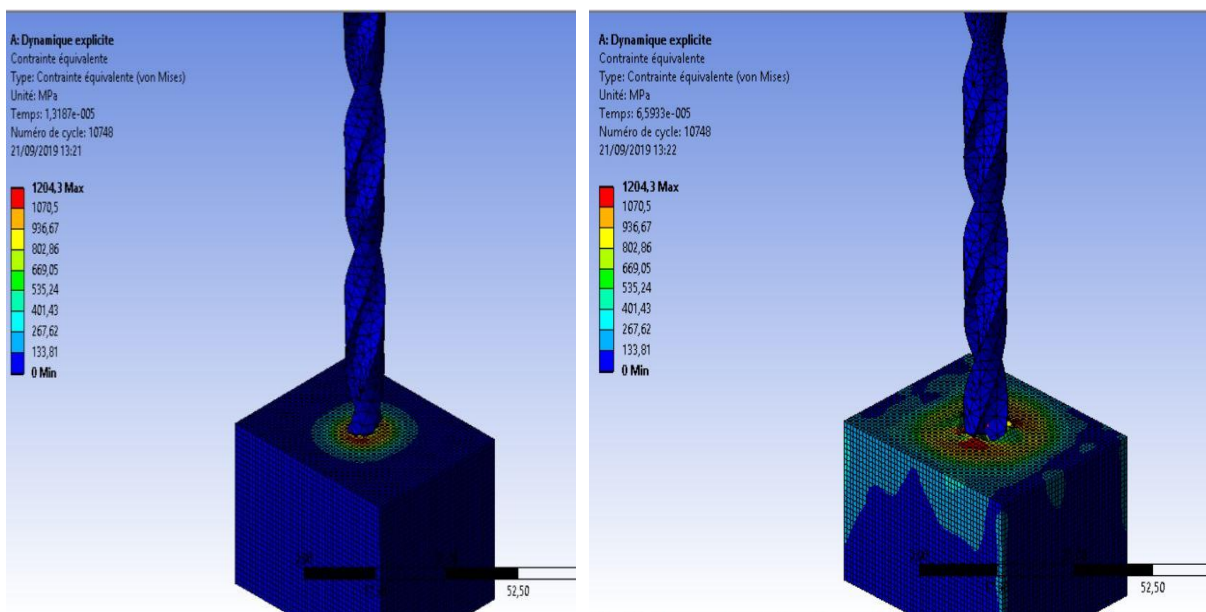


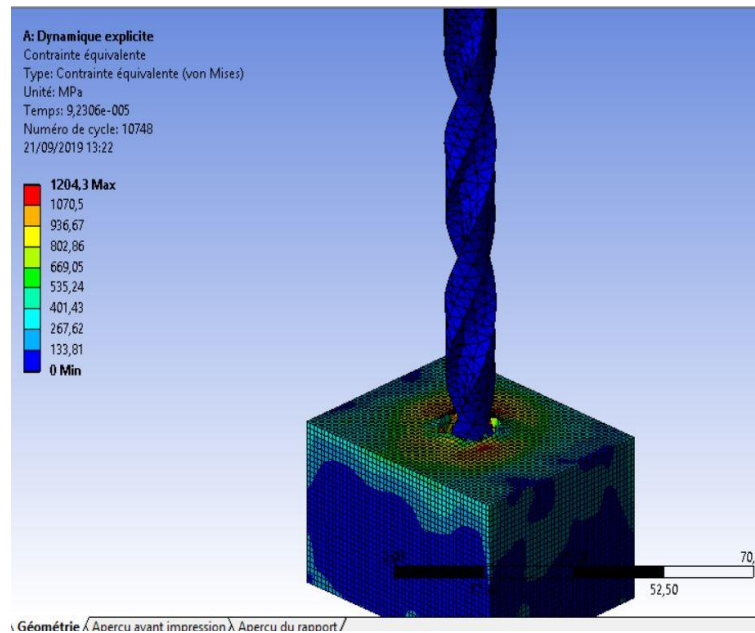


**Figure IV.13:** Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises

*( $V_c = 460\text{m/min}$  and  $f = 0,2\text{mm/tr}$ )*

3<sup>ème</sup> cas :  $V_c = 900\text{m/min}$  et  $f = 0,4\text{mm/tr}$ ;





**Figure IV.14:** Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises

*( $V_c = 900\text{ m/min}$  et  $f = 0,4\text{ mm/tr}$ )*

#### **IV.14 . DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE :**

Les résultats des simulations numériques de l'opération de perçage en 3D sont illustrés sur les figures (IV.9) (IV.10) (IV.11) (IV.12) (IV.13) et (IV.14)

On voit sur les figures (IV.9) (IV.10) et (IV.11) que la température de la pièce varie au contact avec l'outil. Pour une vitesse de coupe de 460 m/min, la température atteint une valeur maximale de  $T_{\max} = 825,22^\circ\text{C}$ . Par contre,  $T_{\max} = 794,03^\circ\text{C}$  pour une vitesse de coupe de 420 m/min (flamme rouge). 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. Ces résultats montrent que la température dans la zone de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

En adoptant la méthode Lagrangienne, la température est uniformément distribuée sur les surfaces et la morphologie du copeau est meilleure dans la figure (IV.11).

Le phénomène de conduction est représenté en rouge , par contre les dégradations des couleurs correspondent au phénomène de convection. La partie éloignée de la surface de contact qui est complètement refroidie est colorée en bleue. Plus la conductivité thermique du matériau est faible, plus la température est élevée.

Les figures **(IV.12)** **(IV.13)** et **(IV.14)** présentent la répartition de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction du temps de simulation.

On remarque l'apparition de la zone de séparation du métal en pointe de l'outil. Dans cette région, l'outil exerce un effort de compression sur le matériau qui se sépare en deux parties : le copeau et la pièce usinée. On remarque aussi l'apparition de la zone de cisaillement primaire (en rouge) et secondaire (en orange).

## Conclusion générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux simulations numériques de la coupe des pièces mécaniques. Celle-ci occupe une place importante dans l'industrie mécanique.

La simulation numérique des efforts de coupe a déjà fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques. Pour notre cas, il a été constaté que parmi les paramètres étudiés lors de notre travail : la modélisation et la simulation numérique du procédé d'usinage.

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution de l'usinage.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré que lors de l'usinage, les essais thermiques et les modèles numériques associés à la coupe des métaux sont indispensables lors du contact de l'outil de coupe avec la pièce à usiner. En effet et lors de ce contact, une température de coupe est générée à l'interface de l'outil et du copeau.

Dans le dernier chapitre, il a été procédé à réaliser une opération d'usinage et à l'utilisation par la suite une modélisation et une simulation numérique en 3D. Celles-ci ont concerné la formation du copeau d'une opération de perçage et de prévoir la distribution de la température à l'interface outil/copeau.

De ce travail, on peut conclure que :

- L'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la température,
- La méthode par élément fini permet de diminuer le besoin d'expérimentation.

## **Références :**

- [1] **Mohamad JRAD**, Modélisation du perçage à grande vitesse : Approches analytique, numérique et expérimentale. Thèse doctorat. Metz le 9 Novembre 2007.
- [2] **A. S. Varadarajan, P. K. Philip and B. Ramamoorthy**, Investigations on hard Turning with minimal cutting fluid application (HTMF) and its comparison with dry and wet turning ;Tools .January 2002
- [ 3] **Jinsoo Kim, Sangkee Min , David A. Dornfeld** , Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts; Tools ; 2001
- [4] **Sandvik Coromant** ; “Perçage”;Techniques de l’ingénieur ; 2001
- [5]<http://www.sciences-technologies.net/genie-mecanique/fabrication-mecanique/6-le-percage.html>( **machine de percage** )
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Usinage\\_grande\\_vitesse](https://fr.wikipedia.org/wiki/Usinage_grande_vitesse)
- [7] <http://www.si.ens-cachan.fr/ressource/r23/r23b.htm>
- [8] <http://leslubrifiants.unblog.fr/2017/11/01/etude-des-copeaux-obtenus-en-usinage/>
- [9] **T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane**, Metal machining, theory and applications, Arnold Publishers ,2000
- [10] **Shaw M.C.Metal cutting principles**. Oxford Science Publications, Oxford, 1984
- [11] **Jérémy Jallageas** , Optimisation du perçage de multi-matériaux sur Unité de Perçage Automatique (UPA). thèse doctorat .Bordeaux. le 22 janvier 2013.
- [12] **E. Ceretti, L. Filice, D. Umbrello, and F. Micari**. ALE Simulation of Orthogonal Cutting: a New Approach to Model Heat Transfer Phenomena at the Tool-Chip Interface. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 56(1):69–72, 2007.
- [13] **ASM International Handbook Committee**, Machining. Vol. 16, March 1997 by ASM International P 1089.

- [14] : **KAGNAYA, Tchadja**. Contribution à l'identification des mécanismes d'usure d'un WC-6% Co en usinage et par une approche tribologique et thermique. MINES Paris Tech, 2009.. Officers and Trustees of ASM International (2003–2004)
- [15] **F.Benabid**, Etude des Transferts Thermiques au Cours D'une Opération D'usinage, Influence sur l'Usinage a Grande Vitesse, Thèse de Doctorat, Université de Banta, 2015.
- [16] **M.Habak**, Etude de l'influence de la Microstructure Et des Paramètres de Coupe Sur le Comportement en Tournage Dur de l'Acier a Roulement 100Cr, Thèse de Doctorat, Laboratoire Procédés-Matériaux-Instrumentations ENSAM, CER d'Angers, 2006.
- [17] T.D. Marusich, M. Ortiz, Modeling and simulation of high-speed machining ,International Journal for Numerical Methods in Engineering 38 (1995) 3675-3694.
- [18] : **KIM K. W. , LEE W. Y. , SIN H.-C.** – A finite-element analysis of machining with the tool edge considered – Journal of Materials Processing Technology. 1999, vol. 86, pp. 45–55.
- [19] **Halil Bilin**, Simulation of orthogonal metal cutting by finite element analysis. Thèse de Master en Science naturelle et science appliquée, 2003.
- [20] ] **Kiliçaslan, C.**, Modelling and simulation of metal cutting by finite element method. Thèse de Master. Institut de Technologie. Ysmir. Turkey,2009.
- [21] **JOHNSON, Gordon R.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In : Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlands, 1983.
- [22] : **KOVAC, Pavel, SAVKOVIC, Borislav, SERDAR, Branislav, et al.** MODELING MECHANICAL AND THERMAL LOAD OF GUTTING TOOL. Acta Technica Corviniensis -Bulletin of Engineering, 2011, vol. 4, no 4, p. 77.
- [23] **NIESŁONY, P., GRZESIK, W., LASKOWSKI, P., et al.** Numerical 3D FEM simulation and experimental analysis of tribological aspects in turning Inconel 718 Alloy. Journal of Machine Engineering , vol. 15, no 1,2015.
- [24] [**Girion, M., Valiorgue, F., Rech, J., & Feulvarch, E. (2017, May)**]. Simulation Eulérienne thermomécanique 3D du perçage.
- [25] **BENBEKHTI Ahmed**, Etude de réalisation d'un support pour affutage des forets sur une machine à commande numérique. Thèse de master, octobre 2013



[26] [**Mabrouki, J.-F. Rigal**, A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning, *Journal of Materials Processing Technology* 176 (2006)] .

[27] [**M. Abouridouane, F. Klocke and B. Döbbeler**. Characterisation and modelling of the machinability of ferriticpearlitic steels in drilling operations. *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 79-84, 2017.]