

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



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

**THEME :**

Etude du contact Outil de coupe –Pièce à usiner en tournage en utilisant la méthode des éléments finis

**Étudiant:**

ALIOUANE ADEL

**Promoteur:**

Prof M , Temmar Mustapha

**Co-Promotrice:**

Dr. Melzi Nesrine

**Année universitaire :**

2021 / 2022

# *Remerciement*

---

A l'issue de ce travail, nous souhaitons remercier les personnes qui, de près ou de loin, nous ont aidés pour la réalisation de ce mémoire.

Notre promoteur, Monsieur Temmar Mustapha, pour nous avoir proposé ce sujet et pour nous avoir orientés tout au long de ce travail.

Notre Co-promotrice, Madame Melzi Nesrine pour ses conseils et ses remarques pertinentes.

Les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Un grand remerciement à tous nos enseignants du Département de mécanique et au responsable de notre atelier d'usinage.

Et finalement, un grand merci à tout le personnel technique et administratif de notre département.

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à ma famille ALIOUANE  
Et aux personnes les plus chères au monde ; mes chers parents

A mon père : MOHAMAD

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon  
éducation et mon bien être. Ce travail est fruit de tes sacrifices qui  
tu as consentis Pour mon éducation et ma formation.

A ma très chère mère : **BOABIDA**

Tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager  
et de Prier pour moi. Et Puisse **Dieu**, le tout puissant, te préserver  
t'accorder Santé, longue vie et bonheur.

A mes chers **sœurs** et **frères**

A mes **enseignants**

A mes **camarades**

A mes **amis**

**ALIOUNE . A .**

# *Sommaire*

---

Remerciements.....	I
Dédicace .....	II
Sommaire.....	III
Liste des tableaux .....	VI
Liste de figures.....	V
Liste des abréviations.....	VI
Introduction générale.....	VII

## **Chapitre I : Usinage par enlèvement de matière**

I.1. Introduction.	3
I.2. Usinage	4
I.2.1. Evolution Du Matériel D'usinage.	5
I.2.2. Coupe Des Métaux.	6
I.3. Etude De Fabrication.	8
I.4. Les Procédées D'usinage.	10
I.5 Copeau.	15
I.6. Lubrification	17
I.7. Les procédés d'usinage.	18

## **Chapitre II : Le procédé d'usinage de tournage**

II.1. Définition.	19
II.2. Le Tournage	19
II.3. La Machine-Outil : Tour	21
II.4. Différentes Operations De Tournage.	22
II.5. OUTIL.	24
II.6.PARAMETRES DE COUPE.	29
II.6.1. VITESSE DE COUPE.	29
II.6.2. VITESSE D'AVANCE Vf ET AVANCE PAR TOUR f.	30
II.7. MONTAGES DANS LE TOURNAGE.	30

# *Sommaire*

---

## **Chapitre III : La simulation numérique du profil de la température à l'interface outil coupeau les éléments finis**

III.1. Introduction.	31
III.2. Application au modèle numérique.	31
III.3 .Lois de comportement.	32
III.3.1. Comportement mécanique de la pièce.	33
III.3.2.Critère d'endommagement de Johnson-Cook .	33
III.4. Simulation du problème en ANSYS.	34
III.4.1. Les étapes à suivre pour la modélisation.	34
III.5. Modélisation de l'outil de coupe.	37
III.6. Géométrie sur L'ANSYS.	38
III.7.Systèmes de coordonnées.	40
III.8 : Connexions	42
III.9. Maillage	45
III.10. Dynamique explicite.	46
III.11. Solution	50
VI. Conclusion générale	56
V. Bibliographie	56

# *Liste des tableaux*

---

<b>Tableau I.1</b> : Ordre de grandeur de la vitesse de coupe.....	14
<b>Tableau III.1</b> : Géométrie des trois partie .....	40
<b>Tableau III.2</b> : Systèmes de coordonnées .....	41
<b>Tableau III.3</b> : Connexions. ....	42
<b>Tableau III.4</b> : Connexions Contacts pièce outil.....	42
<b>Tableau III.5</b> : connexion zones de contact.....	43
<b>Tableau III.6</b> : Interactions des corps tolérance .....	44
<b>Tableau III.7</b> : Interactions des corps tolérance avec frottement .....	44
<b>Tableau III.8</b> : Maillage.....	45
<b>Tableau III.9</b> : Dynamique explicite la charge .....	47
<b>Tableau III.10</b> : Dynamique explicite de le Vitesse.....	49
<b>Tableau III.11</b> : Dynamique explicite Informations sur la solution.....	50
<b>Tableau III.12</b> : Dynamique explicite Solution Résultats.....	51
<b>Tableau III.13</b> : Dynamique explicite Contrainte équivalente.....	51
<b>Tableau III.14</b> : Dynamique explicite Solution TemperaturealL .....	52

# *Liste des figures*

---

## **Chapitre 1 : Usinage par enlèvement de matière**

<b>Figure I.1</b> : Différents éléments permettant de définir le procédé d'usinage ..4	
<b>FigureI.2</b> : Machine-outil 5axes. ....6	
<b>FigureI.3</b> :Imprimante3D.....6	
<b>FigureI.4</b> : Processus d'usinage.....10	
<b>FigureI.5</b> : Coupe des métaux.....11	
<b>Figure I.6</b> : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage.....12	
<b>Figure I.7</b> : Mouvements de l'outil et de la pièce en fraisage.....13	
<b>Figure I.8</b> : Facteurs influant sur la profondeur de passe.....14	
<b>Figure I.9</b> : Surfaces de la pièce.....15	
<b>Figure I.10</b> : Copeau continu.....16	
<b>Figure I.11</b> : Copeau cisailé.....16	
<b>Figure I.12</b> : Copeau discontinu.....17	

## **Chapitre II: Le procédé d'usinage de tournage**

<b>Figure II.1</b> : Procédure de tournage (opération de chariotage).....20	
<b>Figure II.2</b> : Procédure de tournage (opération de dressage).....20	
<b>Figure II.3</b> : Constitutiond'un tour parallèle.....21	
<b>Figure II.4</b> : Opérations de base en tournage.....23	
<b>Figure II.5</b> : Angle de coupe latéral.....24	
<b>Figure II.6</b> : Rayon du bec.....25	
<b>Figure II.7</b> : Influence du rayon du bec sur la rugosité de la surface.....25	
<b>Figure II.8</b> : Etat de surface.....26	
<b>Figure II.9</b> : Outil à plaquette carbure.....27	
<b>Figure II.10</b> : Outils de coupe du procédé de tournage.....27	
<b>Figure II.11</b> : Vitesse de coupe.....29	
<b>Figure II.12</b> : Vitesse de coupe $V_c$ , diamètre $D$ et vitesse de rotation $N$ .....29	
<b>Figure II.13</b> : Vitesse d'avance $V_f$ et avance par tour $f$ .....30	
<b>Figure II.14</b> : Montage en lunette.....30	

# *Liste des figures*

---

## **Chapitre III : La simulation numérique du profil de la température a l'interface outil coupeau les éléments finis**

<b>Figure III.1</b> : Pièce simulée en Solidworks.....	35
<b>Figure III.2</b> : Outil de coupe.....	36
<b>Figure III.3</b> : assemblage pièce et l'outil.....	37
<b>Figure III.4</b> : géométrie d'outil partie 1.....	38
<b>Figure III.5</b> : géométrie d'outil partie 2.....	38
<b>Figure III.6</b> : géométrie d'outil partie .....	39
<b>Figure III.7</b> : Système de coordonnées.....	41
<b>Figure III.8</b> : connexion contact.....	43
<b>Figure III.9</b> : zones de contact.....	44
<b>Figure III.10</b> : intersections des corps.....	45
<b>Figure III.11</b> : Maillage.....	46
<b>Figure III.12</b> : Déplacement.....	48
<b>Figure III.13</b> : Graphe de Déplacement.....	48
<b>Figure III.14</b> : Vitesse.....	49
<b>Figure III.15</b> : Graphe de Vitesse.....	49
<b>Figure III.16</b> : déplacement par distance.....	50
<b>Figure III.17</b> : Contrainte équivalentes.....	52
<b>Figure III.18</b> : Graphe des contraintes équivalentes.....	52
<b>Figure III.19</b> : Températures.....	53
<b>Figure III .20</b> : Graphe de température.....	54



# *Liste des Abréviations*

---

Symbole	Unité	Désignation
VC	(m/min)	Vitesse de coupe
$\Omega$	(rad/ min)	vitesse angulaire
Me		Mouvement de coupe
Mf		Mouvement d'avance
Mp		Mouvement de profondeur
D	(mm)	Diamètre de la pièce
N	(tr/min)	Vitesse de broche
F	(mm/tr)	Avance par tour
Vf	(mm/min)	La vitesse d'avance
A	(mm)	Profondeur de passe
$\alpha$	Rad	Angle de dépouille
$\beta$	Rad	Angle de taillant
$\gamma$	Rad	Angle de coupe
L	(mm)	Longueur totale de déplacement de l'outil
Rt		Rugosité
Pf		l'angle de coupe
Rm	(Mpa)	Acier
t	(s)	temps
T	(c)	Température

# ***Introduction Générale***

---

## **Introduction Générale**

La coupe des métaux occupe une place importante dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière. Quel que soit le type de procédé d'usinage utilisé, il est toujours nécessaire d'obtenir une pièce finie conforme au dessin de définition. Celle-ci doit être de bonne qualité et doit avoir une bonne précision dimensionnelle des formes géométriques. Cette précision est liée directement à la rugosité définie lors de la conception. Aussi, la qualité des états de surfaces est importante et surtout lors des opérations de finition.

Cette coupe des métaux a fait l'objet de nombreuses études du fait qu'elle est restée en constante évolution. Le but est de répondre aux exigences de l'industrie comme aux problèmes de la qualité, la productivité, l'environnement, etc.....

Ainsi, la coupe des métaux est toujours d'actualité malgré l'arrivée et le développement de procédés concurrents. On peut citer l'électroérosion ou les procédés de fabrication par ajout de la matière.

Pour pallier aux différents problèmes rencontrés en pratique, l'amélioration et l'optimisation des moyens de production existants sont devenus une exigence capitale. On peut maintenant modéliser et numériser un procédé d'usinage. On peut aussi prévoir tous les phénomènes pouvant intervenir lors de l'usinage, avant la mise en production de la pièce, en un minimum de temps, et de la manière la plus automatisée possible. Ainsi, on peut prédire les efforts de coupe, le comportement dynamique de la machine-outil ou de la pièce à usiner, la température émise dans le broyeur, les contraintes résiduelles et autres. On peut maintenir les performances des différents procédés au plus haut niveau pour répondre finalement aux exigences de l'industrie mécanique,

# ***Introduction Générale***

---

Notre étude s'est basée sur une étude du contact outil de coupe –Pièce à usiner en usinage en utilisant la méthode des éléments finis. Le procédé d'usinage utilisé est le tournage.

## **Notre plan de travail est le suivant :**

Notre travail se divise en trois chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les travaux existants sur l'usinage par enlèvement de matière.

Le chapitre II sera consacré au procédé de tournage ou nous allons procéder aux outils de coupe, aux machines-outils et aux pièces à usiner.

Le chapitre III sera consacré à notre étude. Il consistera à étudier des opérations d'usinage expérimentales et de développer un modèle en utilisant la méthode des éléments finis nous permettant de bien comprendre ce phénomène lors de l'usinage.

Les résultats seront interprétés par des approches numériques modélisant ce comportement.

**Chapitre I :**  
**Usinage par enlèvement de**  
**matière**

**I.1. Introduction :**

L'usinage avec ou sans enlèvement de matière a fait l'objet de nombreuses études depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Le but est de :

- Maintenir les performances des différents procédés au plus haut niveau,
- Répondre aux exigences de l'industrie mécanique,
- Améliorer la productivité,
- Réduire les couts de production,
- Etre en conformité avec les normes actuelles de l'environnement.

Malgré l'introduction et le développement de plusieurs procédés concurrents dans l'industrie mécanique, le procédé d'usinage par enlèvement de matière est toujours d'actualité et il est toujours utilisé. Il assure le bon déroulement des opérations d'usinage et la qualité des pièces à usiner. Afin de garantir la qualité des pièces usinées, une démarche de modélisation globale de l'impact du procédé de fabrication est nécessaire. Toutes les étapes, à savoir depuis l'obtention du brut jusqu'à la finition de la pièce, doivent être respectées et étudiées.

La modélisation de la coupe est particulièrement importante, car les opérations de finition, qui confèrent à la surface la majorité de ses propriétés, sont généralement des opérations d'usinage.

Toute pièce usinée est représentée par l'intégrité de sa surface à usiner par un ensemble de caractéristiques permettant de qualifier une surface vis à vis d'une application donnée.

**I.2. Usinage :**

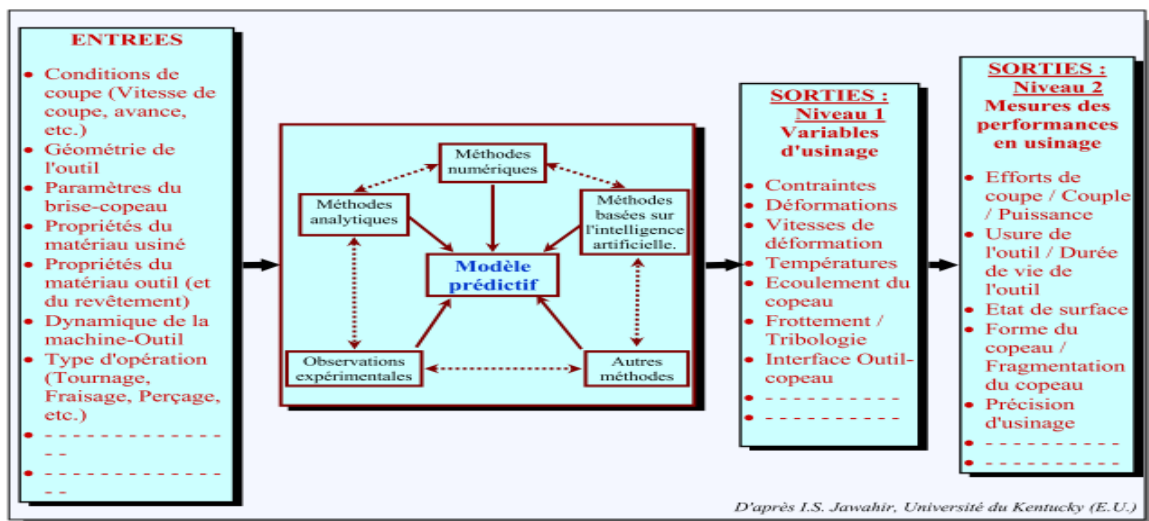
Le but de l'usinage est de donner aux pièces brutes la forme, les dimensions nécessaires, et la pression exigée par le concepteur. Cet usinage doit être conforme au dessin de définition.

En fonction de la forme à donner et du type de la machine-outil, on distingue plusieurs types de procédés de d'usinage dont : le tournage, le perçage, la rectification, le fraisage, le rabotage, etc...

La figure (I.1) représente les différents éléments permettant de définir un procédé d'usinage.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse des travaux existants sur l'usinage par enlèvement de matière, et particulièrement le procédé de tournage et l'usinage à grande vitesse.

Aussi, nous allons introduire les notions d'un comportement d'un système POM (Pièce/Outil de coupe/Machine-outil). De ce comportement, on peut citer les différents types de vibrations ayant trait au phénomène de broutement régénératif. Une dernière partie concernera 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. [1].



**Figure I.1 :** Différents éléments permettant de définir le procédé d'usinage

**I.2.1. Evolution du matériel d'usinage :**

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

De 1850 à 1914, les machines-outils prennent une place sans cesse accrue dans les ateliers. Il s'agit de machines simples (tour, fraiseuse, perceuse, raboteuse) nécessitant un grand nombre d'opérations manuelles. L'ouvrier équipe le porte-pièce et le porte-outil ; il sélectionne les éléments de coupe  $n$ ,  $a$ ,  $p$  prend les passes successives et effectue les mesures.

Depuis 1914, les machines-outils automatiques se substituent de plus en plus souvent aux machines classiques. Les progrès sont lents au début et obtenus le plus souvent par dispositifs mécaniques.

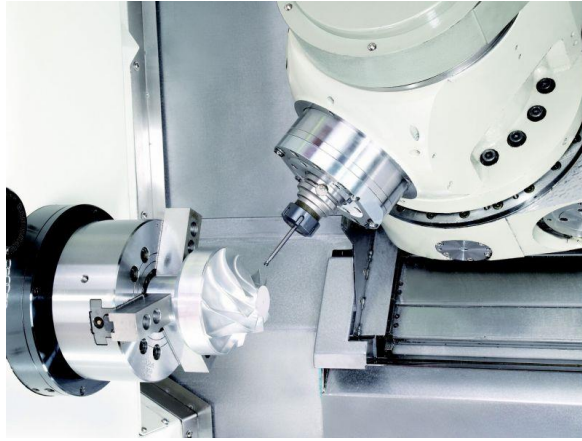
Depuis 1946, les dispositifs électromécaniques, hydromécaniques, puis électroniques nous amènent dans la période actuelle.

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

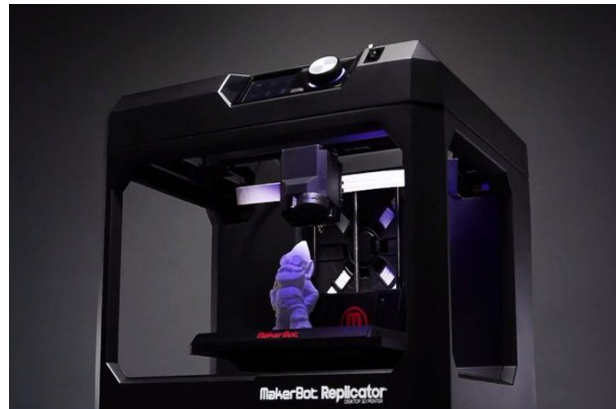
Par contre avec l'usage des machines-outils automatiques, le rôle des techniciens s'accroît et se diversifie pour la préparation des travaux et des outillages spéciaux.

Actuellement, une nouvelle génération de machines est introduite dans le processus de fabrication. On peut citer la machine-outil 5 axes.

Dans le futur, l'imprimante 3D peut devenir une technique d'usinage concurrente. [2].



**Figure I.2 :**Machine-outil 5 axes



**Figure I.3 :** Imprimante 3D

### **I.2.2. Coupe des Métaux.**

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière à l'aide d'une machine-outil destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans un intervalle de tolérance donné. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance non négligeable puisqu'il produit environ 2,5 % du produit national brut d'un pays développé.



L'usinage concerne en premier lieu les matériaux métalliques et la plupart des objets métalliques d'utilisation courante qui ont subi déjà une ou plusieurs opérations de mise en forme. La mise en forme par usinage concerne également, mais de manière moins conséquente en général, toutes les autres classes de matériaux (céramiques, polymères, bois et matériaux dérivés, matériaux composites, verres, semi-conducteurs, etc.), selon des modalités spécifiques, dépendant des caractéristiques du procédé et du matériau.

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la combinaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance. Il existe deux manières pour générer la surface recherchée : soit par le travail de forme, soit par le travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme, c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface finalement obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la trace de l'arête de l'outil qui travaille (le point générateur) qui donne la surface finale.

➤ **Exigences liées à l'usinage :**

Les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de répondre aux exigences industrielles imposées, qu'elles soient économiques ou écologiques, etc. Aujourd'hui, le technicien de fabrication se doit donc de pouvoir répondre à une multitude de questions afin de réaliser rapidement des pièces mécaniques avec la qualité demandée et à moindre coût.

Par exemple, parmi les questions qui se pose dans le cas de l'usinage :

- Quel type de machine faut-il utiliser et suffira-t-elle en termes de puissance et de précision ?
- Quelles sont les conditions de coupe à utiliser pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?

- Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et dans quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ?
- Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? ...

Il y aurait encore un nombre considérable de questions à poser, dont il est difficile d'établir une liste exhaustive. L'état d'avancement des connaissances sur le plan fondamental ne peut pas apporter de réponse à toutes ces questions. En revanche, la technologie et les techniques d'usinage ont permis de faire évoluer et d'optimiser la production.

Depuis la révolution industrielle du début du siècle dernier, les machines-outils ont considérablement évoluées afin de répondre à des exigences telles qu'un meilleur rendement, une plus grande sécurité, une meilleure rigidité, de plus grandes vitesses de déplacement, une puissance accrue, une amélioration de la productivité, une diminution de l'usure des outils, etc.

En contrepartie, l'amélioration de toutes ces performances fait ressortir un ensemble de phénomènes dont l'ignorance ne remettait pas en cause la fabrication traditionnelle des pièces mais dont l'importance ne peut être ignorée pour des conditions d'Usinage à Grande Vitesse (UGV) où les vitesses de rotation, des outils de fraisage par exemple, deviennent très importants.

### **I.3. Etude de fabrication :**

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

Elle doit, compte tenu des moyens disponibles :

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

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

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

Une opération est tout ensemble de travail, mettant en œuvre un seul des moyens dont est doté le poste de travail, qui a pour but de rapprocher le produit de son état final. [3].

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

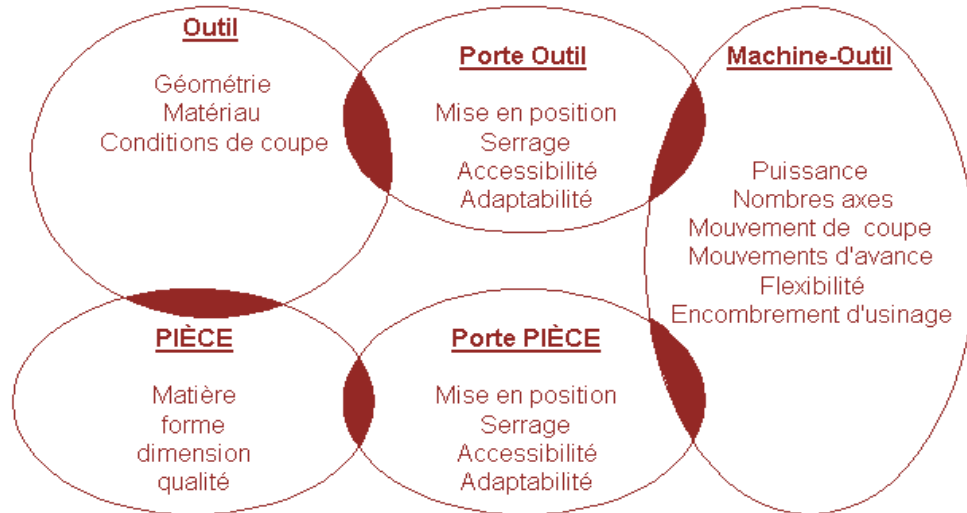
- Le dessin de définition du produit,
- Le nombre de pièces à fabriquer,
- La cadence demandée,
- La main d'œuvre disponible,
- La disposition des machines,
- Le standard des machines,
- Le standard des outillages,
- La charge des machines.

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

Le document comporte essentiellement :

- La désignation des sous phases,
- Les opérations et les éléments de travail successifs,
- La désignation des outillages et des montages employés,
- Les vérificateurs à utiliser,
- Les éléments de coupe et les éléments de passe,

- Le temps de fabrication,
- Les croquis de phase.



**Figure I.4 : Processus d'usinage**

Il existe donc des liaisons :

- Entre la pièce et le porte-pièce,
- Entre la pièce et l'outil,
- Entre l'outil et le porte-outil,
- Entre le porte-pièce et la machine-outil,
- Entre le porte-outil et la machine-outil.

#### **I.4. Les Procédés d'usinage :**

Les procédés d'usinage sont extrêmement variés et leur distinction se fait suivant trois critères essentiels :

- La date de leurs apparitions ; les procédés traditionnels et les non traditionnels.
- Les phénomènes physiques correspondant ; procédés de coupe, par abrasion, et procédés physico-chimiques.
- Le type des machines et des outils utilisés.

En fonction des outils et des machines utilisées, on distingue différents procédés d'usinage. Les procédés les plus répandus sont le tournage, fraisage, perçage, rectification, rabotage, etc. La fabrication débute avec ce que l'on appelle un matériau brut, elle le modifie jusqu'à ce qu'il soit conforme au dessin de détail, donc aux exigences techniques du bureau d'études.

La coupe des métaux (ou usinage) consiste à enlever une couche de métal pour obtenir une pièce finie conforme au dessin de définition. Cette coupe est effectuée sur des machines à l'aide d'outils tranchants de dimensions et de formes diverses.

Lors de l'usinage, on trouve :

- Une lame d'outil qui pénètre dans la matière et enlève un copeau,
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil. [4].

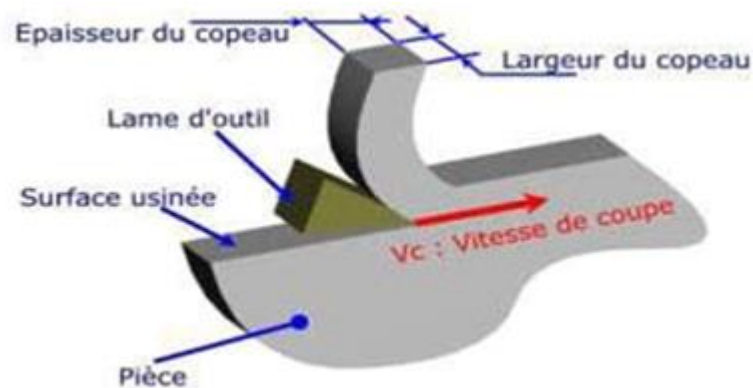


Figure I.5 : Coupe des métaux

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

Ces 3 mouvements sont :

- Le mouvement de coupe, **Mc**
- Le mouvement d'avance, **Ma**
- Le mouvement de profondeur, **Mp**

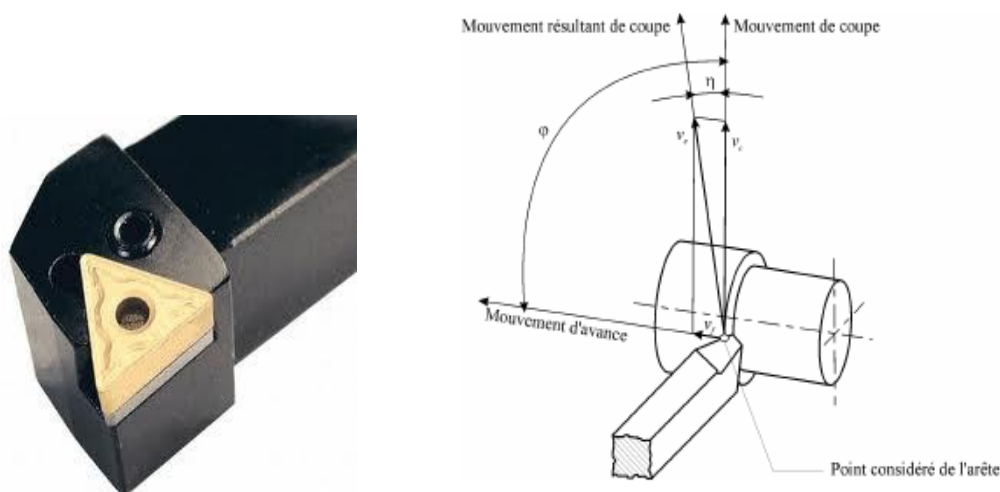
➤ **Mouvement de coupe  $M_c$  :**

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

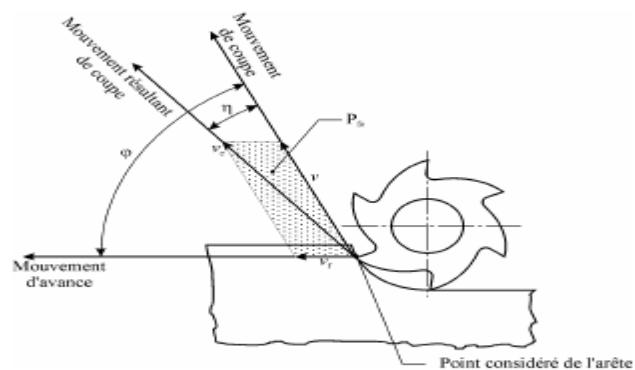
$$V_c = \pi D n / 1000 \text{ m/min} \quad (\text{I.1})$$

➤ **Mouvement d'avance  $M_a$  :**

Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance est caractérisé par la vitesse d'avance  $v_f$  qui est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en mm/min soit en mm/tour. [5].



**Figure I.6 :** Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage



**Figure I.7 :** Mouvements de l'outil et de la pièce en fraisage

➤ **Mouvement de profondeur  $M_p$  :**

Les paramètres d'usinage sont des grandeurs qui caractérisent les mouvements de l'outil et de la pièce à usiner ainsi que les valeurs de la surépaisseur d'usinage et de la section de coupe. Le mouvement de profondeur  $M_p$  est un mouvement perpendiculaire aux mouvements de coupe et d'avance. Il détermine la pénétration de l'outil dans la pièce (l'épaisseur du copeau à enlever). [6].

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

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil,...), on doit régler les paramètres de coupe. Plusieurs critères permettent de définir les paramètres de coupe :

➤ **Ordre de grandeur de la vitesse de coupe :**

La vitesse de coupe est fonction à la fois de la matière à usiner et de la matière de l'outil. Il existe une méthode nommée « couple outil-matière » qui permet de déterminer la vitesse de coupe correcte pour usiner le matériau. La vitesse de coupe est supérieure quand il y a lubrification par rapport à la coupe « à sec ».

Le tableau I.1 suivant illustre cet ordre de grandeur :

Matériau à usiner	Outil en acier rapide supérieur	Outil en carbure	Outil en céramique	Usinage à grande vitesse (UGV)
Acier (résilient)	15 – 18	60 – 70		-
Acier doux	30 – 38	110 – 140		-
Fonte (moyenne)	18 – 24	70 – 85		-
Bronze	24 – 45	100 – 140		-
Laiton (recuit)	45 – 60	100 – 200		-
Aluminium	75 – 400	150 - 1000		2000
Titane	30	60 - 70		-
Super alliage base Nickel (Inconel)		30 - 50	200 – 300 (tournage) 700 – 1000 (fraisage)	

Tableau I.1 : Ordre de grandeur de la vitesse de coupe m/min

➤ **Facteurs influant sur la profondeur de passe :**

La figure suivante I.7 suivante illustre ces facteurs : [7]

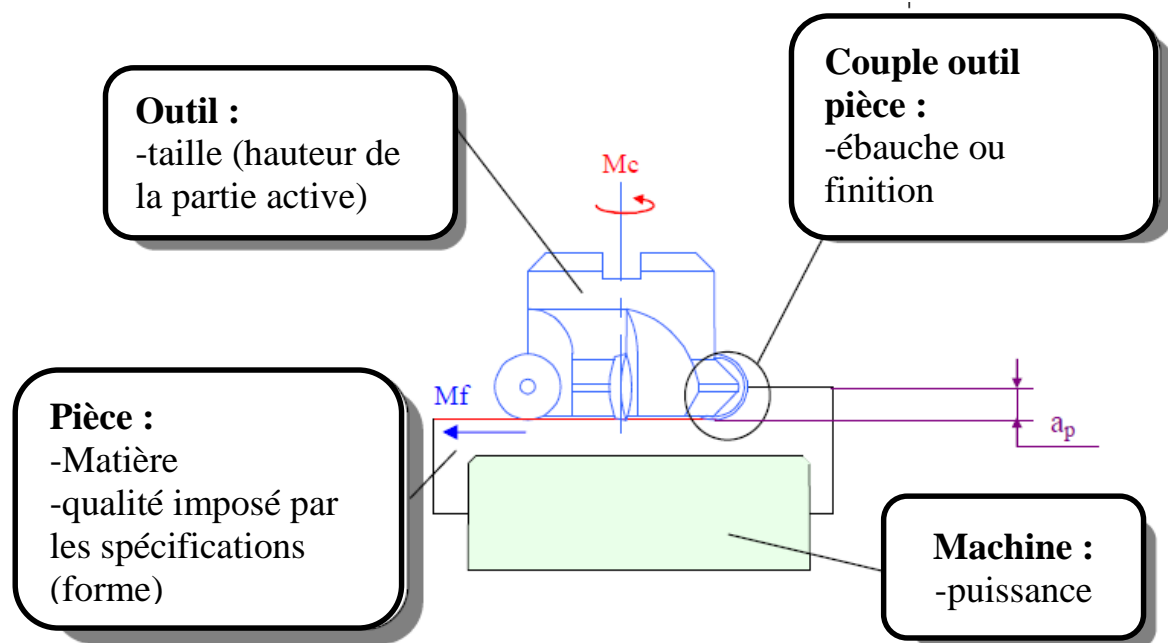
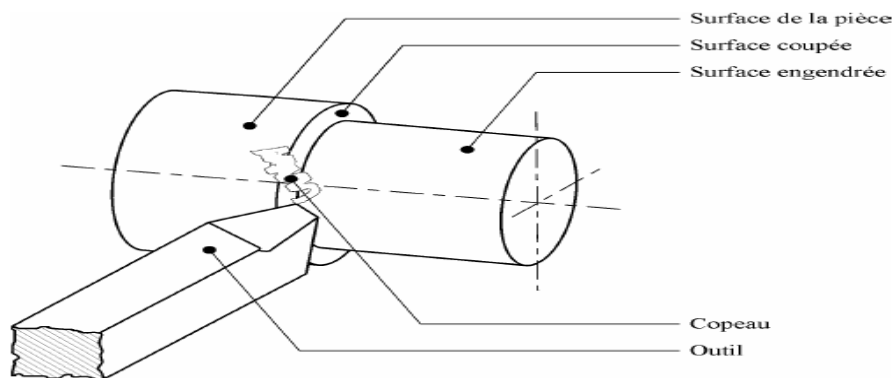


Figure I.8 : Facteurs influant sur la profondeur de passe.



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



**Figure I.9 :** Surfaces de la pièce

### I.5 Copeau :

La coupe (formation du copeau) est un processus physique complexe qui s'accompagne de déformations plastiques et élastiques ; elle donne lieu à un frottement important (outil-pièce), au dégagement de chaleur, à la formation d'une arête 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).

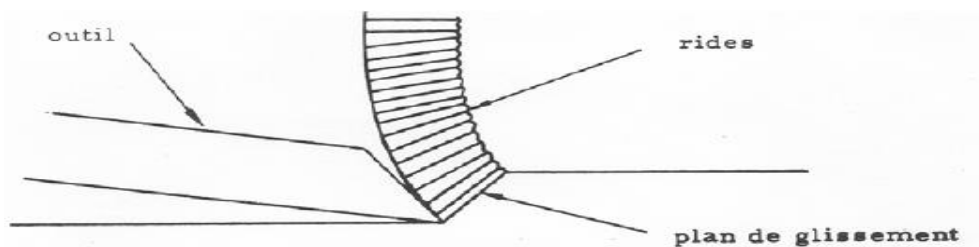
La formation du copeau joue un rôle important sur la rugosité de la surface usinée. Elle est un phénomène de déformation élastique et plastique (compression) de la couche cisailée.

La déformation plastique consiste dans le glissement de certaines couches par rapport à d'autres suivant des plans de glissement qui se confondent en général avec la direction des contraintes de cisaillement maximales. Les glissements des

couches du métal provoquent la modification de la forme des grains, de leurs dimensions et positions relatives. Elle s'accompagne d'un échauffement important et d'une modification des propriétés du métal. Cette modification rend le métal plus dur.

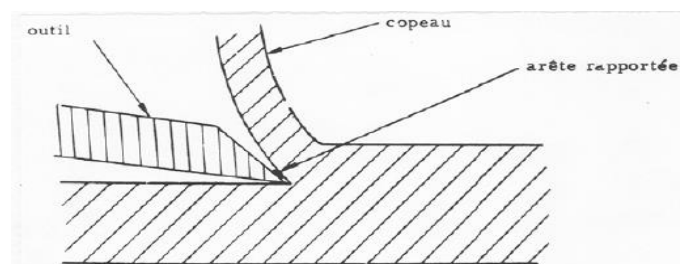
Les formes du copeau varient suivant les conditions d'usinage. L'usinage des métaux plastiques (aciers) donne lieu à trois types de copeaux : continu, cisailé et discontinu. On obtient aussi le copeau fragmenté produit par l'usinage de métaux peu plastiques (fontes, bronzes,...).

- **Le copeau continu** : Il apparaît lorsque l'acier est usiné à une grande vitesse. Il s'écoule alors en forme d'une bande longue. [8].



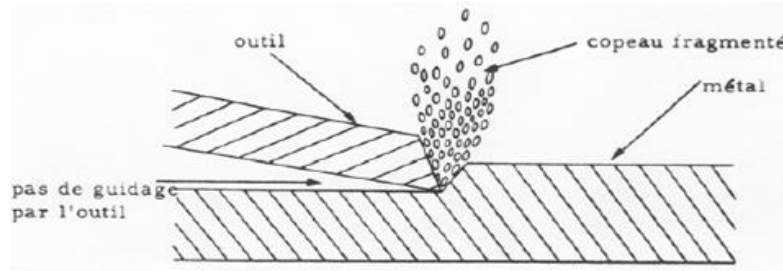
**Figure I.10** : Copeau continu

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



**Figure I.11** : Copeau cisailé

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



**Figure I.12 :** Copeau discontinu

### **I.6. Lubrification :**

La formation du copeau s'accompagne d'un important dégagement de chaleur dû au frottement du copeau glissant sur la face de coupe et au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil. [9].

L'échauffement de la partie active est fonction de la vitesse de coupe. Lors de l'usinage, cette partie active de l'outil doit être réduite pour ne pas entraîner sa perte de dureté.

Aussi, les conséquences de l'augmentation de la température sur la pièce provoquent une dilatation de la pièce et des contraintes résiduelles en surface. En effet, dans la zone de formation du copeau, la température tend à augmenter la plasticité du métal et par conséquent, elle permet une diminution notable des efforts de coupe.

Pour éviter tous les phénomènes de chaleur, il est recommandé d'utiliser lors de l'usinage des lubrifiants ou des agents de refroidissement.

Ils agissent :

- En diminuant le coefficient de frottement copeau-outil et outil-pièce, c'est l'effet lubrifiant,
- En refroidissant l'outil et la pièce pour évacuer la chaleur produite, c'est l'effet réfrigérant.

En pratique, le débit doit être abondant et fonction de la puissance absorbée. La pression doit être suffisante pour évacuer les débris métalliques et pénétrer entre

la face de coupe et le copeau. C'est essentiellement la partie active de l'outil qui doit être refroidie.

Un fluide de coupe convenablement choisi a une influence sur :

- L'usure de l'outil (réduction),
- Le choix de la vitesse de coupe,
- La rugosité de la surface usinée.

Parmi les produits lubrifiants, on peut citer :

- Les huiles minérales, elles sont issues de la distillation du pétrole,
- Les huiles solubles, ce sont des mélanges d'huiles minérales, d'émulgateurs et d'inhibiteurs de corrosion ajoutés à de l'eau.
- Les fluides synthétiques pour travaux spéciaux.

### **I.7. Les procédés d'usinage :**

Lors de l'usinage par enlèvement de matières, on utilise plusieurs procédés.

Les procédés d'usinage les plus répandus sont :

- Tournage,
- Fraisage,
- Perçage,
- Rectification,
- Rabotage,
- Usinage sur l'étau-limeur,
- Etc.....

**CHAPITRE II :**  
**Le procédé d'usinage de**  
**tournage**

**II.1. Définition :**

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

De 1850 à 1914, les machines-outils prennent une place sans cesse accrue dans les ateliers. Il s'agit de machines simples (tour, fraiseuse, perceuse, raboteuse) nécessitant un grand nombre d'opérations manuelles. L'ouvrier équipe le porte-pièce et le porte-outil ; il sélectionne les éléments de coupe  $n$ ,  $a$ ,  $p$  prend les passes successives et effectue les mesures.

Depuis 1914, les machines-outils automatiques se substituent de plus en plus souvent aux machines classiques.

Depuis 1946, les dispositifs électro-mécaniques, hydro-mécaniques, puis électroniques nous amènent dans la période actuelle. L'intervention de l'opérateur se réduit à un rôle de surveillance dans le cas de certaines machines actuelles capables de mesurer la qualité des pièces produites et s'autoréguler.

Par contre avec l'usage des machines-outils automatiques, le rôle des techniciens s'accroît et se diversifie pour la préparation des travaux et des outillages spéciaux. De cette spécialisation, on peut classer les machines-outils de la manière suivante : Machines semi-automatiques, machines automatiques et machines automatiques spéciales.

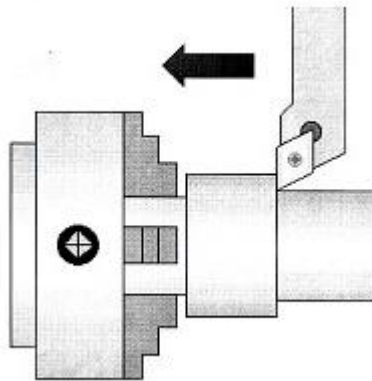
De cette étape, les procédés d'usinage ont pris de l'importance et leur domaine d'application est devenu très spécifique. Actuellement, et grâce à la technologie, n'importe quelle forme de pièce mécanique peut être réalisée.

**II.2. Le Tournage :**

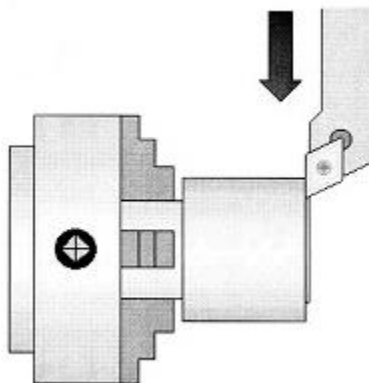
Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un

mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé. [10].

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes).



**Figure II.1 :** Procédure de tournage (opération de chariotage)



**Figure II.2 :** Procédure de tournage (opération de dressage)

En pratique, le tournage longitudinal est la technique de tournage la plus pratiquée. L'outil se déplace parallèlement à l'axe longitudinal de la pièce à usiner et réduit à cette occasion son diamètre.

Lors du tournage transversal, la surface à usiner se trouve la plupart du temps à la verticale de l'axe longitudinal de la pièce à usiner. À cette occasion, le travail de l'outil s'opère l'extérieur vers le centre ou inversement.

Les figures II.2 et II.3 illustrent ce procédé.

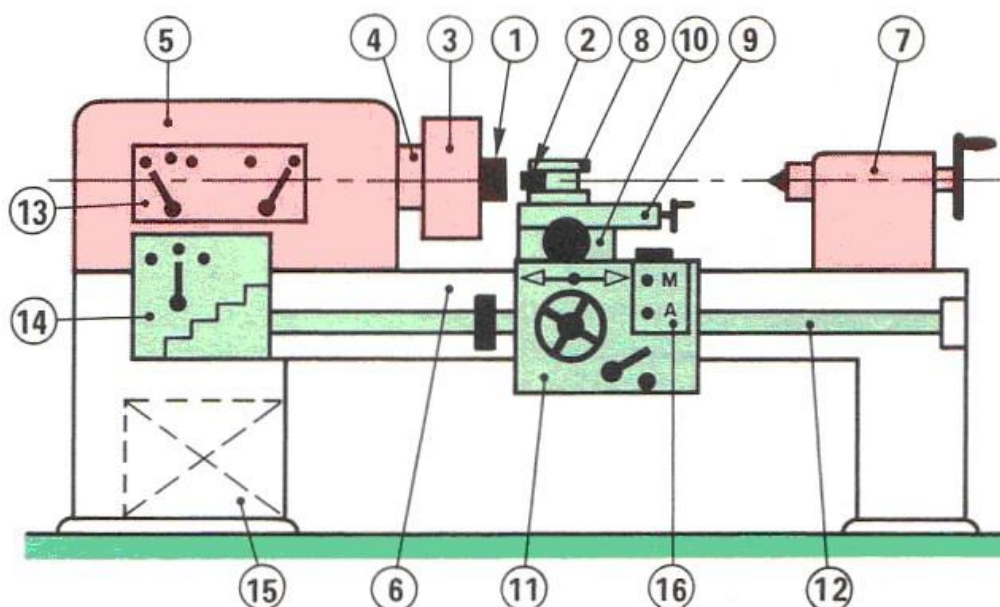
**II.3. La Machine-Outil :** Le type de machine utilisé en tournage est le tour.

On peut classer les tours en deux catégories :

- **Les tours parallèles :** réservés aux travaux unitaires et en petite série,
- **Les tours spéciaux automatiques et semi-automatiques :** destinés au travail en série.

On distingue deux classes : tours monobroches et tours multibroches. Chaque broche comporte généralement deux chariots porte-outils radiaux et un porte-outil axial. Les outils travaillent simultanément.

On trouve : tour semi-automatique à décolleter, tour revolver, tour à copier, tour à commande numérique,...



**Figure II.3 :** Constitution d'un tour parallèle. [11]



**Avec :**

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

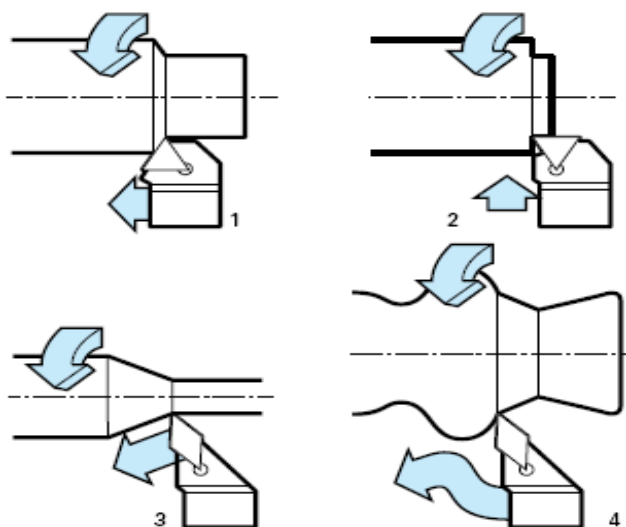
Les tours les plus courants utilisés sont :

- Les tours parallèles à charioter et à fileter,
- Les tours à copier,
- Les tours semi-automatiques,
- Les tours automatiques,
- Les tours automatiques multibroches,
- Les tours à commande numérique.

#### **II.4. Différentes opérations de tournage :**

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe. Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer en tournage quatre opérations de base :

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



**Figure I1.4 :** Opérations de base en tournage

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

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

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

Enfin, en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque (profil contournée), on peut obtenir une forme de révolution quelconque. Ces différentes opérations correspondent à un usinage dit « de génération » ou « d'enveloppe » :

la forme obtenue, à l'échelle macro géométrique, ne doit rien à la forme de l'outil qui l'a générée.

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

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

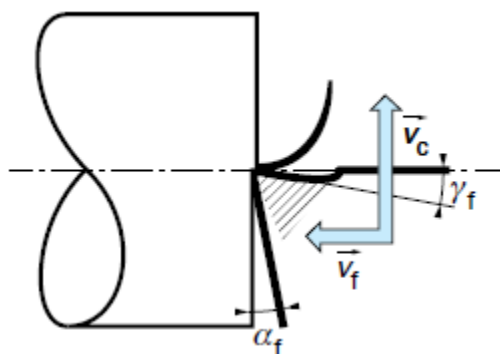
### II.5. Outil :

L'outil est l'intermédiaire entre la machine et la pièce à usiner. La partie active d'un outil est foncée dans la pièce et se déplace mécaniquement par rapport à celle-ci de façon à éliminer la surépaisseur sous forme de copeau.

Les angles caractéristiques de l'outil sont : angle de dépouille, angle de taillant, angle de coupe, angle d'inclinaison de l'arête, angle de direction de l'arête, angle de direction complémentaire et l'angle de pointe.

A titre d'exemple, l'angle de coupe latéral est défini dans le plan latéral (Pf) défini par la vitesse d'avance  $V_f$  et la vitesse de coupe  $V_c$ .

Cet angle est représenté dans la figure II.5.



**Figure II.5 :** Angle de coupe latéral

Aussi, et toujours dans le plan latéral  $\vec{V}_f, \vec{V}_c$ , on constate qu'un angle de dépouille,  $\alpha_f$ , est nécessaire pour éviter le frottement de la face en dépouille sur la pièce.

Comme pour l'angle de coupe, sur les outils à pastille rapportée, l'angle de dépouille résulte de la géométrie de plaquette et de l'inclinaison conférée par le porte-plaquette.

Ce phénomène est illustré dans la figure II.6

La forme du bec influence l'état de surface.

Les principales formes sont :

- L'intersection vive,
- Le rayon,
- Le plat.

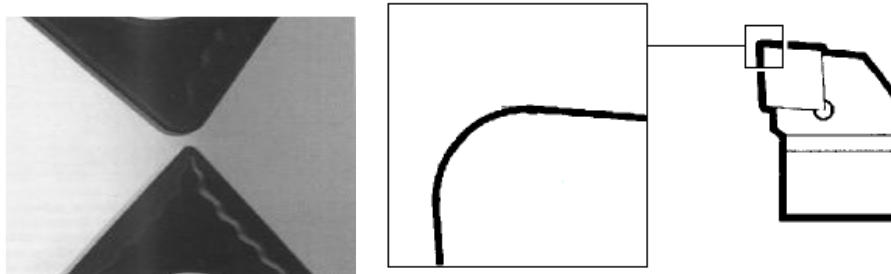


Figure II.6 : Rayon du bec.

Le choix du rayon de bec est fonction de l'opération à effectuer : ébauche ou finition.

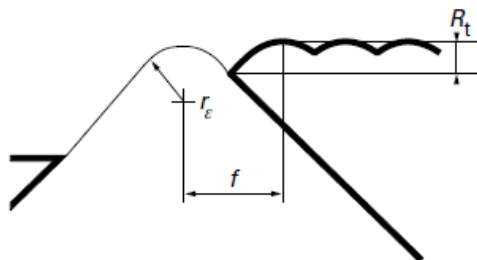


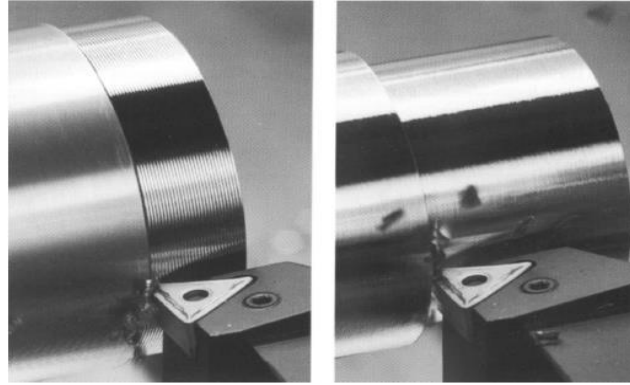
Figure II.7 : Influence du rayon du bec sur la rugosité de la surface

Avec :

$R_t$  = Rugosité

Un trop grand rayon du bec détermine sur une partie de l'arête de coupe des copeaux très minces, dont l'épaisseur ne permet plus la coupe réelle. En

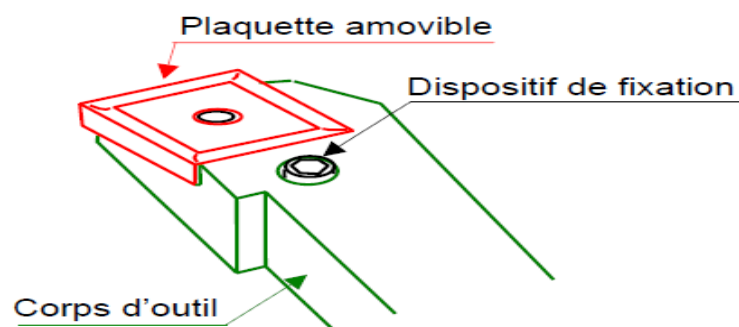
conséquence, il y aura une formation d'un copeau gratté avec une usure prématuré de l'outil.



**Figure II.8 :** Etat de surface

Les outils les plus courants sont normalisés. Les parties actives sont des mises rapportées en :

- **Acier rapide** (NF E 66-361 à 373),
- **En carbure :**
  - ✓ Les plaquettes brasées (les outils les plus courants sont normalisés) (NF E 66-331 à 343),
  - ✓ Les plaquettes amovibles à jeter (les principales formes et dimensions sont normalisées),
- **En céramique**, les plaquettes sont brasées ou à jeter.

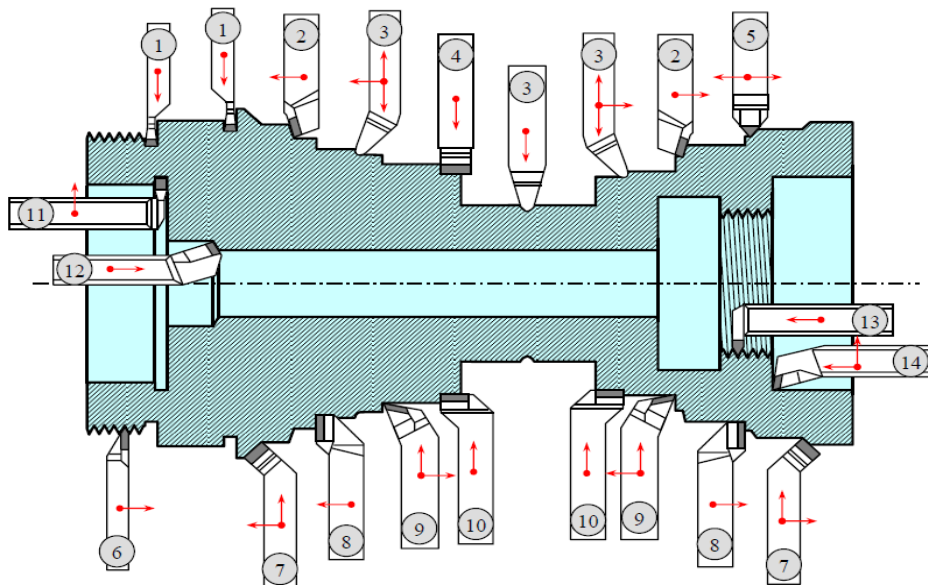


**Figure II.9 :** Outil à plaquette carbure

Les outils à plaquettes amovibles sont généralement constitués d'un corps en acier (XC48) avec des surfaces de référence pour la mise en position de la plaquette par rapport aux surfaces de référence du corps de l'outil, d'une plaquette préaffûtée en carbure ou en céramique, et d'un dispositif de maintien en position de la plaquette dans son logement.

En tournage, les différents outils sont représentés dans la figure II.10 suivante :

[12]



**Figure II.10 :** Outils de coupe du procédé de tournage.

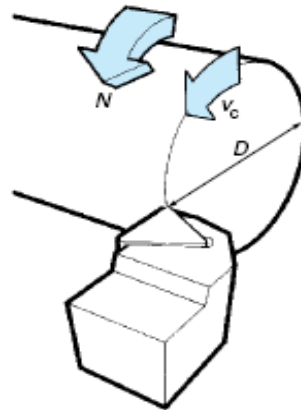
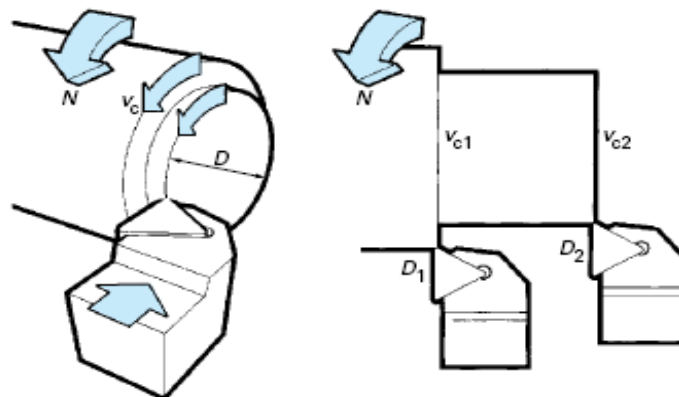
Avec :

- (1) Outil à saigner
- (2) Outil à charioter droit
- (3) Outil à retoucher
- (4) Outil pelle
- (5) Outil à retoucher
- (6) Outil à fileter
- (7) Outil coudé à charioter
- (8) Outil couteau
- (9) Outil à dresser les angles

- (10) Outil à dresser les faces
- (11) Outil à chambrer
- (12) Outil à aléser
- (13) Outil à tarauder
- (14) Outil à aléser

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

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

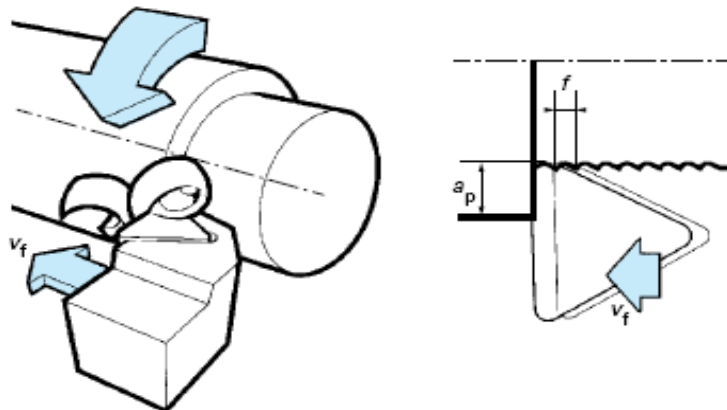
**II.6. Paramètres de coupe :****II.6.1. Vitesse de coupe :****Figure II.11 :** Vitesse de coupe**Figure II.12 :** Vitesse de coupe  $V_c$ , diamètre  $D$  et vitesse de rotation  $N$ 

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

Pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante.

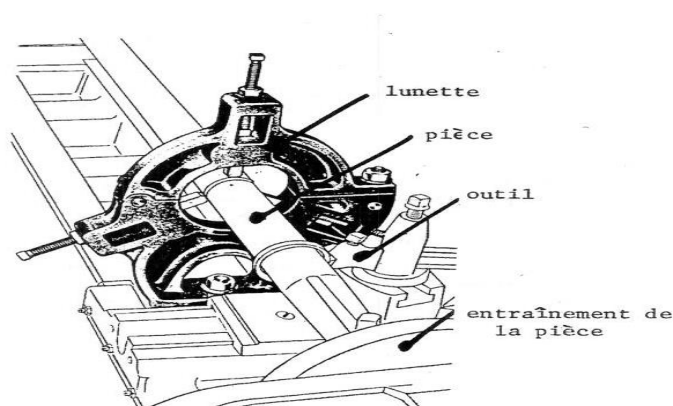
Cette vitesse est choisie en fonction, notamment des matériaux de la pièce et de l'outil, la lubrification et de la durée de vie souhaitée pour l'outil.



**II.6.2. Vitesse d'avance  $v_f$  et avance par tour  $f$  :****Figure II.13 :** Vitesse d'avance  $V_f$  et avance par tour  $f$ **II.7. Montages dans le tournage :**

Les différents montages sont :

- Montage en l'air sur mandrin à trois mors qui convient pour le tournage extérieur ou intérieur des pièces courtes ( $L < 2\varnothing$ ),
- Montage entre pointes ou tournage en lunettes qui convient pour le tournage extérieur des pièces longues et flexibles ( $L > 2\varnothing$ ). On utilise des lunettes qui sont des supports auxiliaires. Dans ce montage, l'axe de la pièce doit coïncider en permanence avec l'axe de la broche du tour,
- Montage mixte.

**Figure II.14.** Montage en lunette

**CHAPITRE III :**  
**LA SIMULATION**  
**NUMERIQUE DU PROFIL**  
**DE LA TEMPERATURE**  
**AL'INTERFACE OUTIL-**  
**COPEAU PAR LA**  
**METHODE DES**  
**ELEMENTS FINIS**

**III.1. Introduction.**

Le but de toute simulation est de reproduire le processus réel le plus fidèlement possible. Pour cela, le modèle numérique doit prendre en compte 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. L'une des méthodes les plus répandues est la méthode des éléments finis. Elle est capable de résoudre les problèmes couplés sans avoir recours à l'expérimentation. [13].

Elle propose une résolution numérique approchée des systèmes d'équations aux dérivés partielles. 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 dressage de procédé de tournage à sec de l'acier XC48. 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 outil/pièce sachant que la température qui se forme suite au frottement dans le couple outil/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.

**III.2. 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. [14].

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 en trois dimensions et son détachement du bloc de matière. 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 la coupe orthogonale 3D de l'acier XC48 avec le logiciel ANSYS.

### **III.2.1. ANSYS explicit :**

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.

### **III.3. 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 XC48 afin la coupe orthogonale 3D, la loi de type Johnson Cook a été choisi. [15].

**Remarque :** XC 48 est utilisé généralement en mécanique pour sa bonne usinabilité et ses excellentes caractéristiques mécaniques idéales comme pour les pièces soumises aux chocs et nécessitant une bonne résistance

**III.3.1. Comportement mécanique de la pièce :**

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

Le comportement du matériau usiné est pris en compte par une loi de type Johnson-Cook. C'est un modèle semi-empirique très utilisé pour lequel les paramètres sont disponibles pour de nombreux métaux. [17].

$$\sigma = (A + B(\varepsilon)^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_f - T_r} \right)^m \right] \quad (3.1)$$

Avec :

$\sigma$  est la contrainte d'écoulement du matériau.

$\bar{\varepsilon}^p$  est la déformation plastique équivalente.

$\dot{\varepsilon}$  est la vitesse de déformation plastique.

$\dot{\varepsilon}_0$  est le seuil à partir duquel la vitesse de déformation est prise en compte .

$T_r$  est la température ambiante ou de référence.

$T_f$  est la température de fusion.

T la température du matériau .

(A , B 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.

**III.3.2. Critère d'endommagement de Johnson-Cook :**

La loi d'endommagement de Johnson et Cook est utilisée comme critère de rupture ductile. Ce critère fait apparaître les trois mêmes termes :

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

$$\varepsilon_f = \left( D_1 + D_2 \exp D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \left( 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left( 1 + D_5 \left( \frac{T - T_r}{T_f - T_r} \right) \right) \quad (3.2)$$

Avec :

$\varepsilon_f$ : 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).

### III.4. Simulation du problème en ANSYS :

#### III.4.1. Les étapes à suivre pour la modélisation :

Le code d'éléments finis ANSYS workbench 2019 est utilisé dans cette partie pour simuler le comportement du mécanisme de contact par frottement des deux corps (pièce et outil) lors d'une opération de dressage de procédé de tournage. 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.

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.

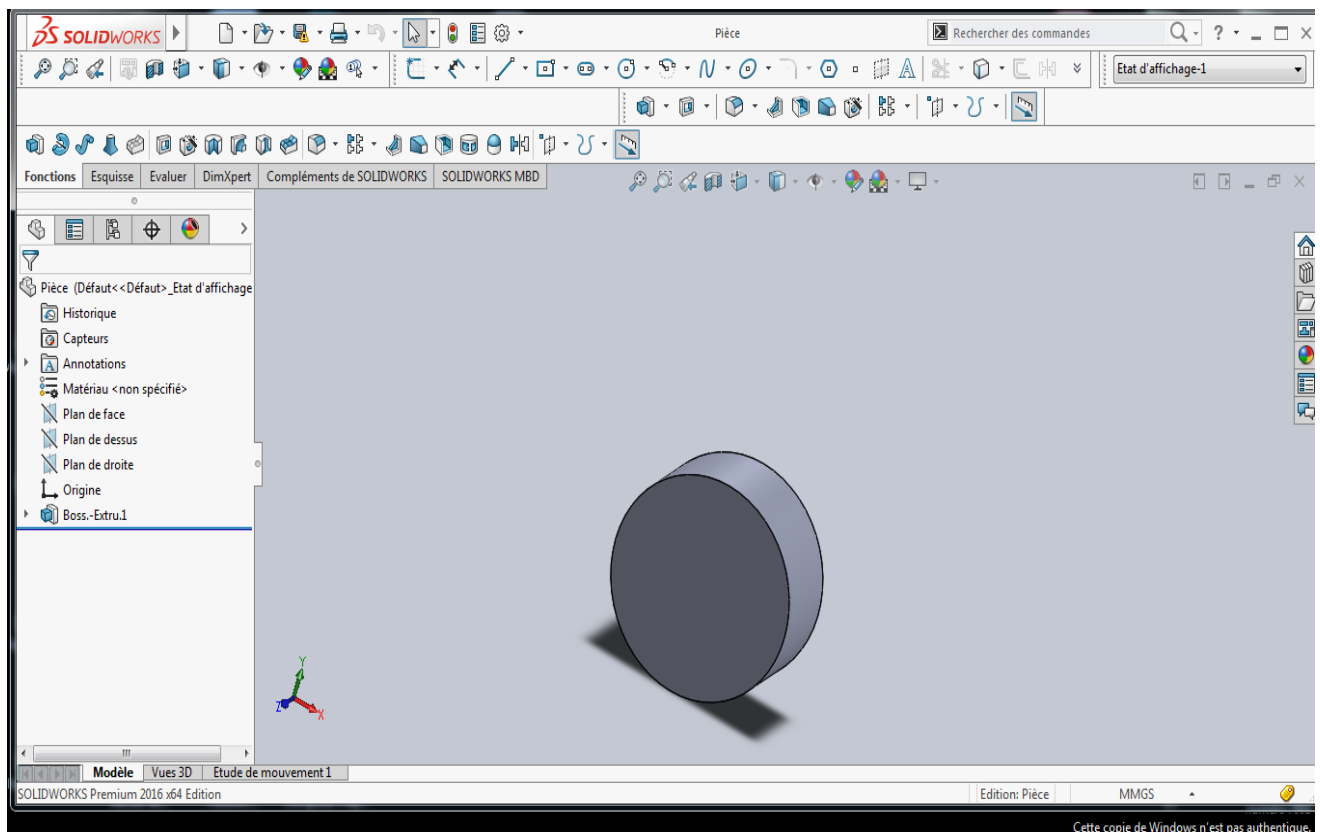
Dans la troisième étape, on choisit le type de maillage. Plus les mailles sont petites, plus la précision est grande. La prochaine étape est de définir les conditions aux limites et chargement.

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

Mais avant de faire cette réalisation, on doit tout d'abord dessiner cette pièce sur solidworks et l'importer du logiciel ANSYS pour faciliter le travail.

On va dessiner cette pièce avec trois étapes :

Premier étapes : on ramène la matière brute



**Figure III.1 :** Pièce simulée en Solidworks.

Deuxième étape : c'est d'obtenir l'outil de coupe avec deux étapes

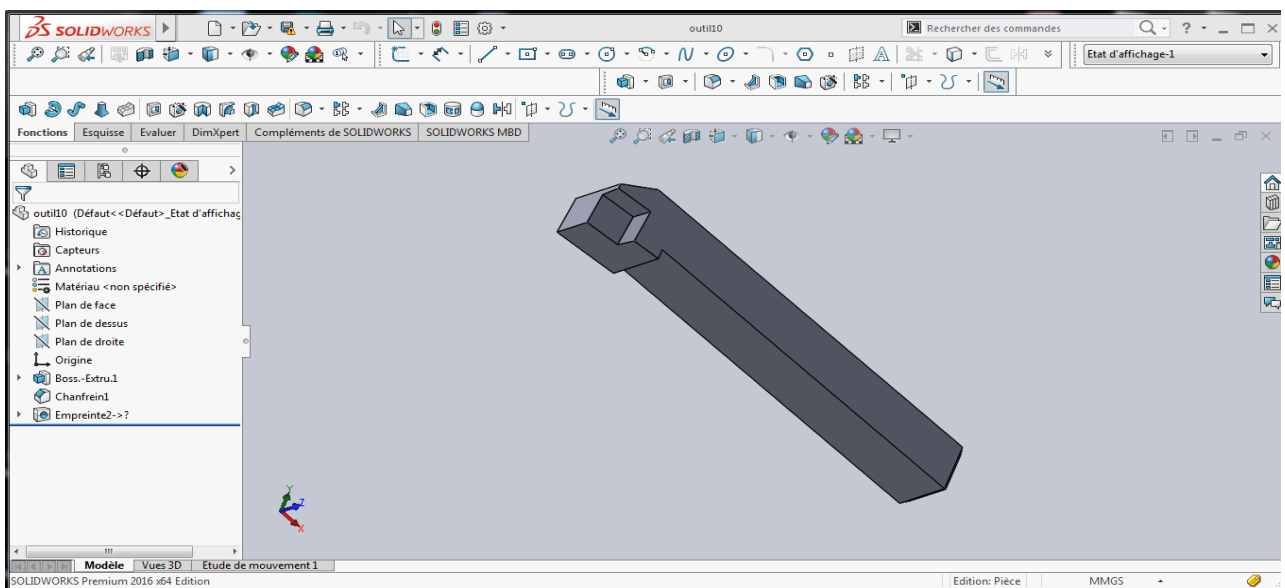
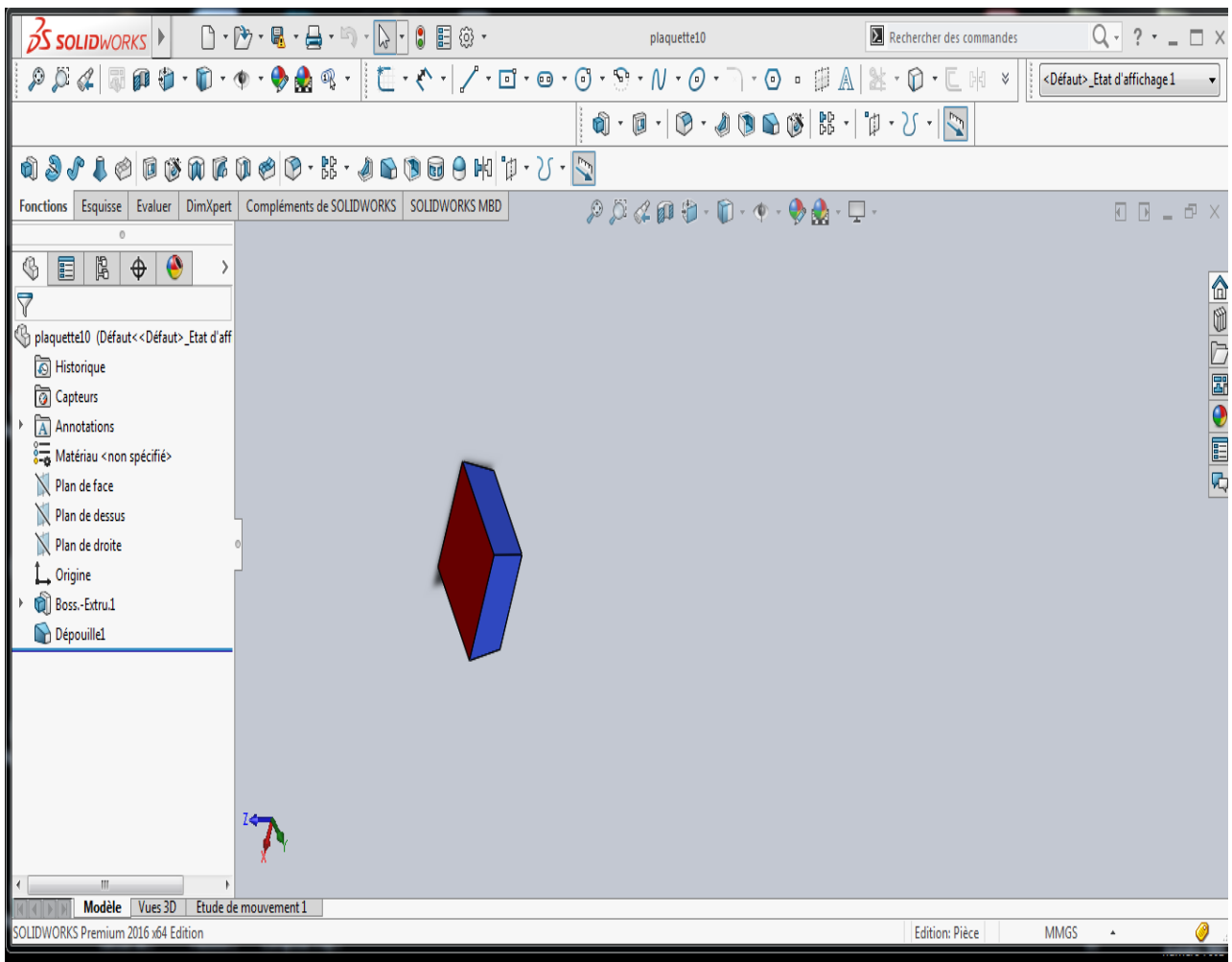
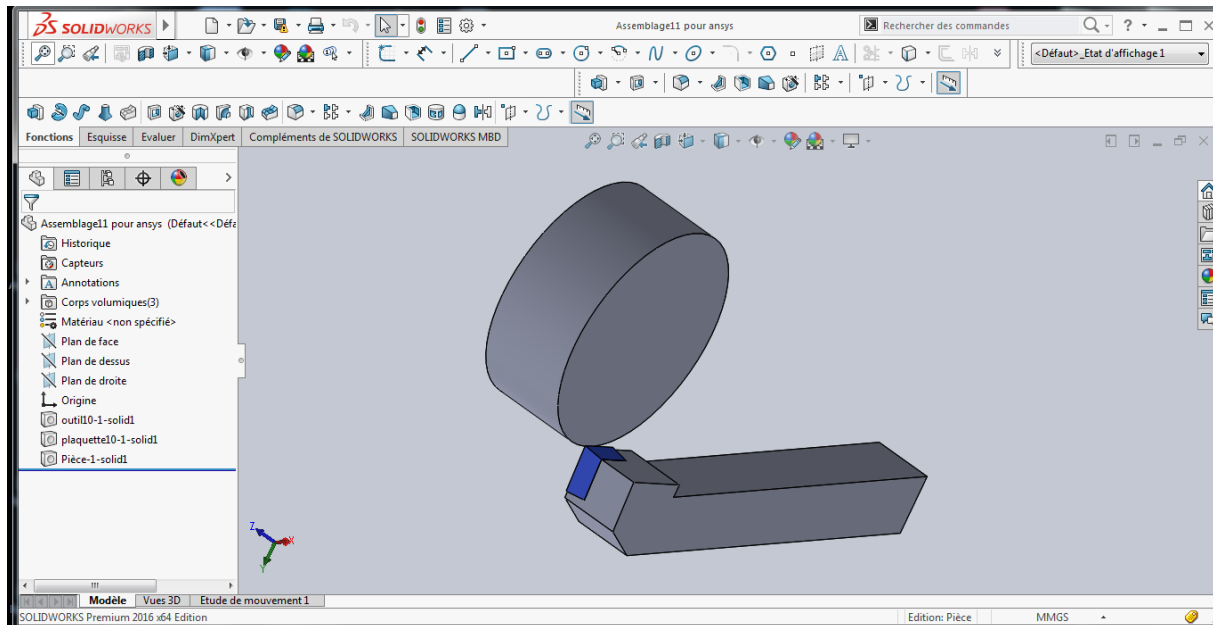


Figure III.2 : Outil de coupe.



Troisième étape : l'assemblage pièce / outil



**Figure III.3 :** assemblage pièce et l'outil.

Une fois la pièce dessinée, la prochaine étape consiste à copier ce travail de Solidworks vers le logiciel ANSYS. Par la suite, nous transférons ce travail pour étudier le contact outil de coupe et la pièce à usiner tout en utilisant la méthode des éléments finis avec ce logiciel ANSYS.

### III.5. Modélisation de l'outil de coupe :

Durant l'analyse, l'outil de coupe est assimilé à un corps indéformable (rigide) avec aucun champ de déformation sur le corps, mais avec une conduction de la chaleur. Les variables géométriques de l'outil sont angle de coupe  $\gamma = -10^\circ$  et l'angle de dépouille  $\alpha = 6^\circ$

III.6. Géométrie sur L'ANSYS :

Les trois figures suivantes représentent le résultat de simulation de notre travail :

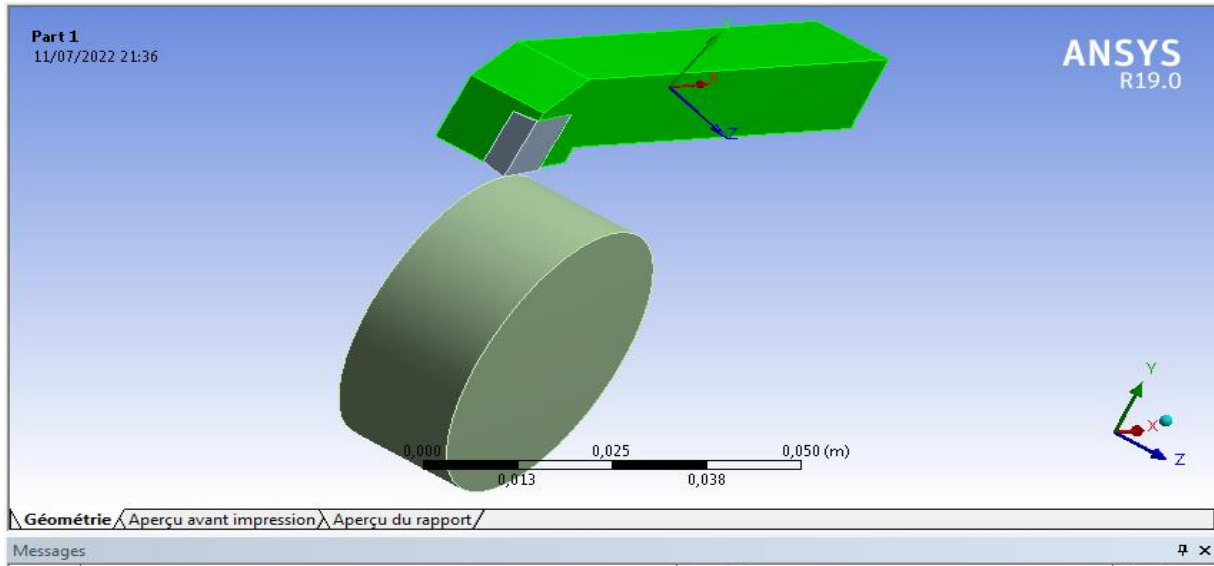


Figure III.4 : géométrie d'outil partie 1

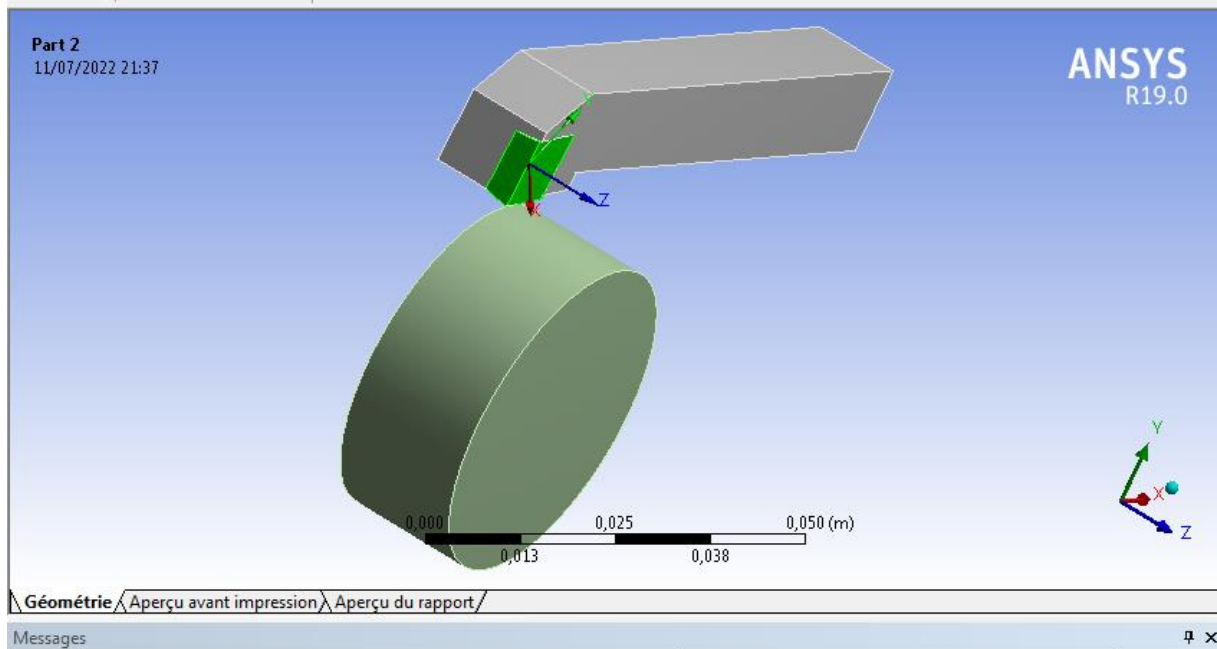


Figure III.5 : géométrie d'outil partie 2

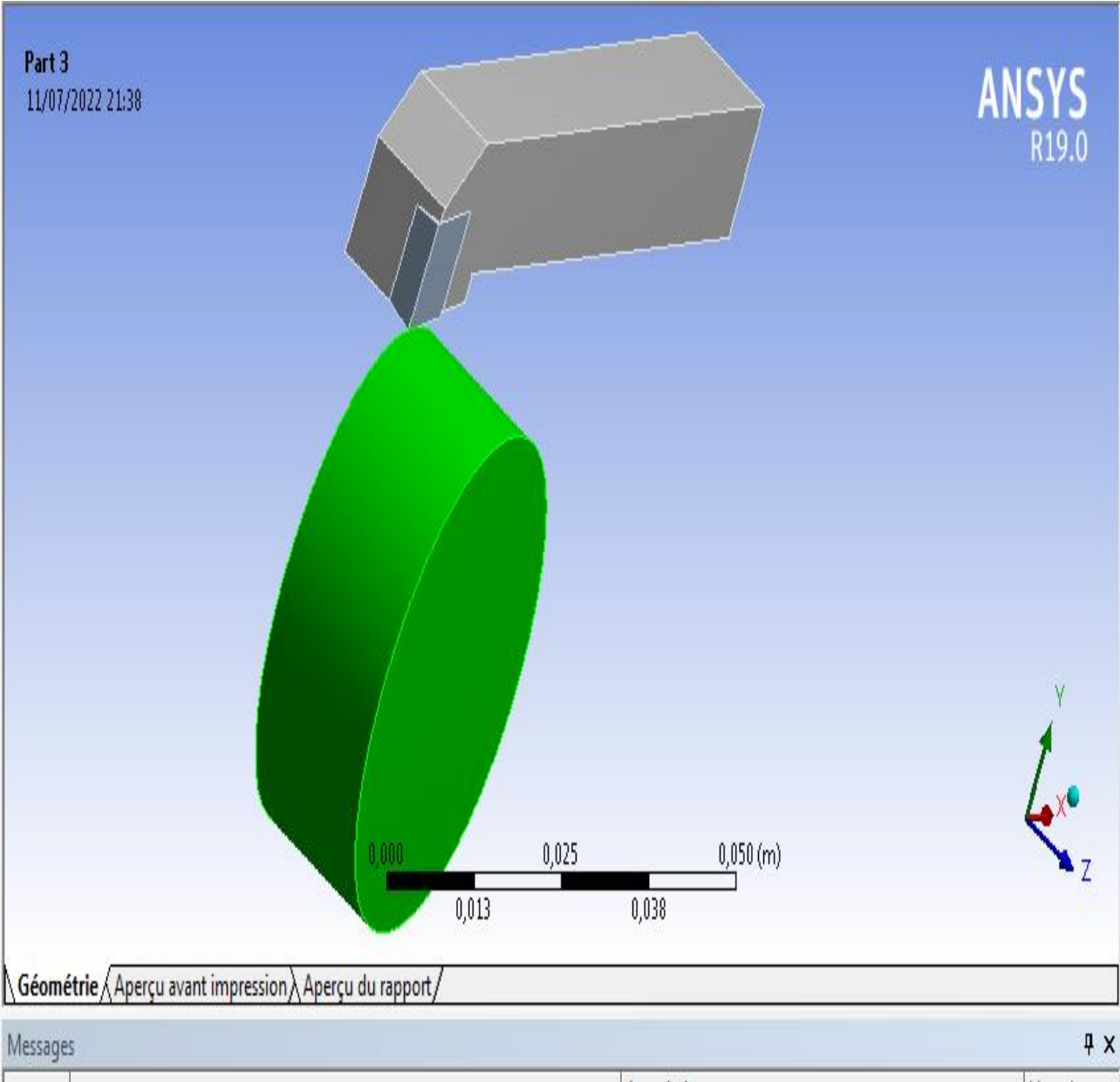


Figure III.6 : géométrie d’outil partie

Tableau III.1 : Géométrie des trois parts

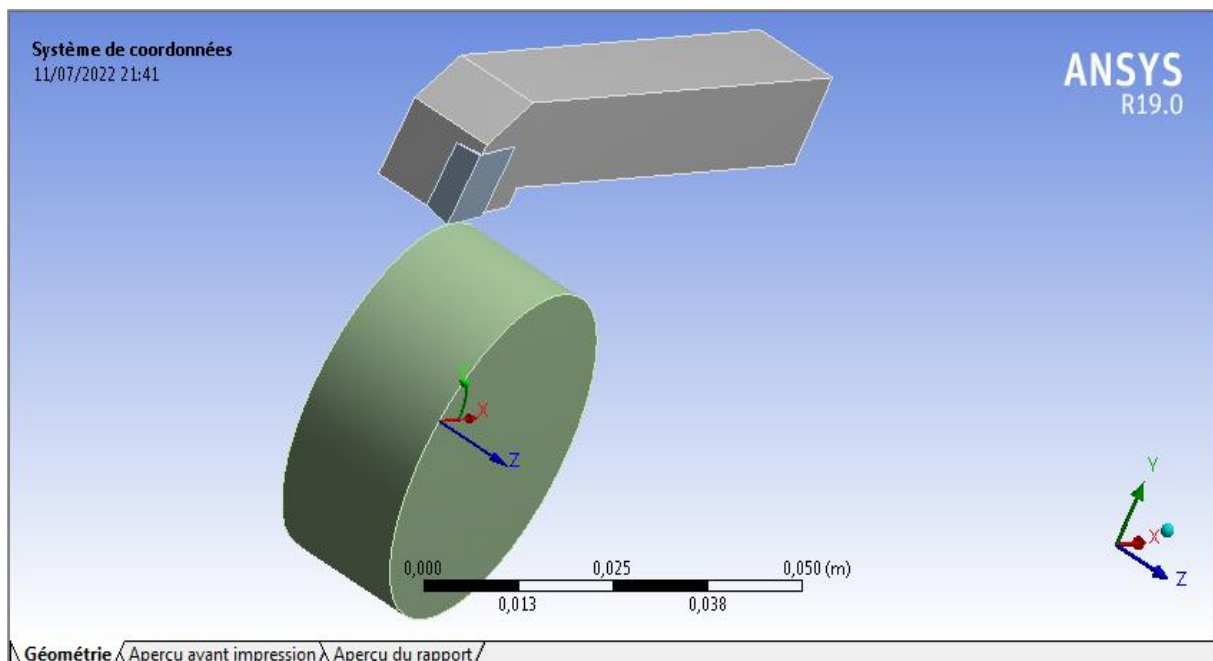
Nom de l'objet	Part 1	Part 2	Part 3
Etat	Maillé		
<b>Propriétés graphiques</b>			
Visible	Oui		
Transparence	1		
<b>Définition</b>			
Désactivé	Non		
Comportement de raideur	Rigide	Flexible	
Température de référence	Par environnement		
Repère de référence	Lagrangien		
Système de coordonnées			Système de coordonnées par défaut
<b>Matériau</b>			
Affectation	outil de coupe		Acier standard
<b>Boîte englobante</b>			
Longueur suivant X	1,e-001 m	1,0484e-002 m	4,5e-002 m
Longueur suivant Y	1,6e-002 m	1,0484e-002 m	4,5e-002 m
Longueur suivant Z	1,2e-002 m	3,97e-003 m	1,8e-002 m
<b>Propriétés</b>			
Volume	1,4295e-005 m <sup>3</sup>	3,2994e-007 m <sup>3</sup>	2,8627e-005 m <sup>3</sup>
Masse	0,21443 kg	4,9492e-003 kg	0,22472 kg
Coord. X du centre de gravité	-3,5199e-002 m	-8,0846e-002 m	-8,3488e-002 m
Coord. Y du centre de gravité	3,587e-002 m	3,0887e-002 m	3,4277e-003 m
Coord. Z du centre de gravité	-2,7621e-002 m	-2,3446e-002 m	-1,2533e-002 m
Moment d'inertie Ip1	5,3594e-006 kg·m <sup>2</sup>		
Moment d'inertie Ip2	1,7603e-004 kg·m <sup>2</sup>		
Moment d'inertie Ip3	1,7635e-004 kg·m <sup>2</sup>		
Moment d'inertie Ip1		4,7483e-008 kg·m <sup>2</sup>	
Moment d'inertie Ip2		3,5349e-008 kg·m <sup>2</sup>	
Moment d'inertie Ip3		6,9872e-008 kg·m <sup>2</sup>	
Moment d'inertie Ip1			3,4265e-005 kg·m <sup>2</sup>
Moment d'inertie Ip2			3,4273e-005 kg·m <sup>2</sup>
Moment d'inertie Ip3			5,6449e-005 kg·m <sup>2</sup>
<b>Statistiques</b>			
Nœuds	767	864	3582
Éléments	2777	605	2936
Paramètres de maillage	Aucun		

### III.7. Systèmes de coordonnées :

Ce système de coordonnées est un référentiel dans lequel on peut représenter des éléments dans l'espace. Ce tableau permet de donner la projection à un point fixe sur l'origine (X, Y, Z).

**Tableau III.2 :** Système de coordonnées

nom de l'objet	Système de coordonnées global	Système de coordonnées
<b>Origine</b>		
Coord. X de l'origine	0, m	
Coord. Y de l'origine	0, m	
Coord. Z de l'origine	0, m	
Défini par		Sélection de géométrie
Géométrie		Défini(e)
Coord. X de l'origine		-8,3488e-002 m
Coord. Y de l'origine		3,4277e-003 m
Coord. Z de l'origine		-1,2533e-002 m
<b>Vecteurs directionnels</b>		
Données de l'axe X	[ 1, 0, 0, ]	
Données de l'axe Y	[ 0, 1, 0, ]	
Données de l'axe Z	[ 0, 0, 1, ]	
Données de l'axe X		[ 1, 0, 0, ]
Données de l'axe Y		[ 0, 1, 0, ]
Données de l'axe Z		[ 0, 0, 1, ]
<b>Axe principal</b>		
Axe		X
Défini par		Axe X global
<b>Orientation autour de l'axe principal</b>		
Axe		Y
Défini par		Par défaut
<b>Transformations</b>		
Configuration de base		Absolue
Configuration transformée		[ -8,3488e-002 3,4277e-003 -1,2533e-002 ]



**Figure III.7 :** Système de coordonnées

III.8 : Connexions

Il permet d'établir des connexions entre la situation intérieure et les évènements extérieures et permet de réunir provisoirement le contact pièce/outil.

Tableau III.3 : Connexions

Nom de l'objet	Connexions
Etat	Défini complètement
<b>Détection automatique</b>	
Générer automatiquement les connexions à l'actualisation	Oui
<b>Transparence</b>	
Activé	Oui

Tableau III.4 : Connexions Contacts pièce outil

Nom de l'objet	Contacts
Etat	Défini complètement
<b>Définition</b>	
Type de connexion	Contact
<b>Champ d'application</b>	
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie
Géométrie	Tous les corps
<b>Détection automatique</b>	
Type de tolérance	Curseur
Curseur de tolérance	0,
Valeur de tolérance	3,4602e-004 m
Utiliser la plage	Non
Face/face	Oui
Tolérance de recouvrement de face	Désactivé
Faces cylindriques	Inclure
Face/arête	Non
Arête/arête	Non
Priorité	Tout inclure
Grouper par	Corps
Rechercher sur	Corps
<b>Statistiques</b>	
Connexions	2
Connexions actives	2

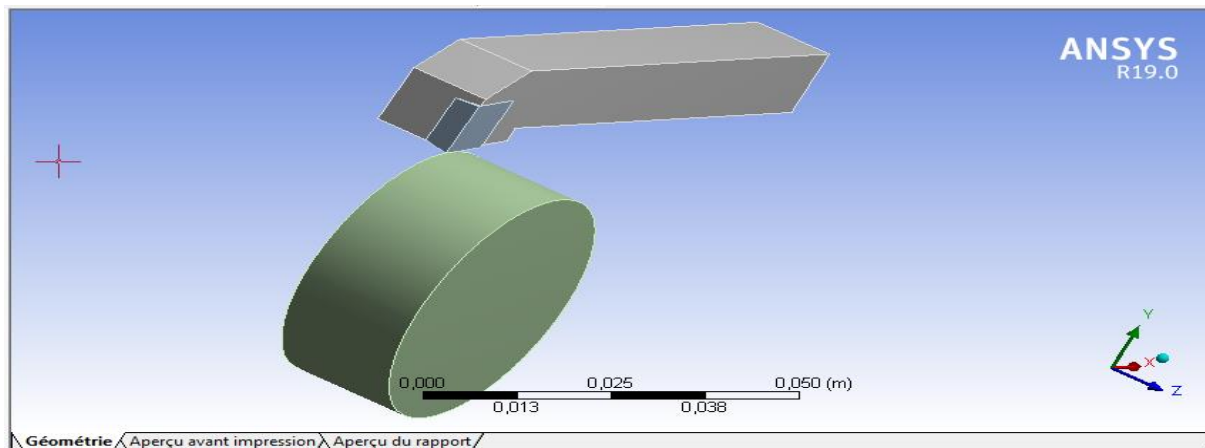


Figure III.8 : connexion contact

Tableau III.5 : Connexions Zones de contact

Nom de l'objet	<i>Avec frottement - Part 1 à Part 2</i>	<i>Avec frottement - Part 3 à Part 2</i>
Etat	Défini complètement	
<b>Champ d'application</b>		
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie	
Contact	3 Faces	
Cible	3 Faces	
Corps de contact	Part 1	
Corps cibles	Part 2	
Protégé	Non	
<b>Définition</b>		
Type	Avec frottement	
Coefficient de frottement	0,4	
Coefficient dynamique	0,	0,1
Constante de dégradation	0,	
Mode Champ d'application	Automatique	
Comportement	Contrôlé par le programme	
Ajuster le contact	Contrôlé par le programme	
Tolérance d'ajustement	3,4602e-004 m	
Désactivé	Non	
Mode Champ d'application		Manuel
<b>Champ d'application</b>		
Méthode de champ d'application		Sélection de géométrie
Contact		2 Faces
Cible		2 Faces
Corps de contact		Part 3
Corps cibles		Part 2
Protégé		Non

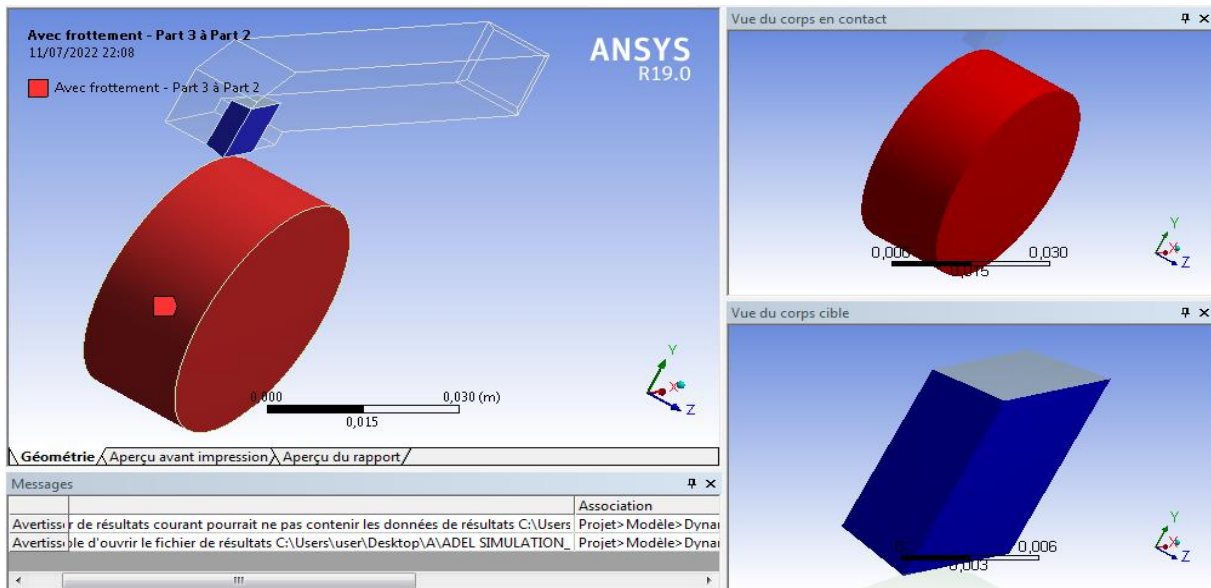


Figure III.9 : Zones de contact

Tableau III.6 : Interactions des corps tolérance

Nom de l'objet	Interactions des corps
Etat	Défini complètement
<b>Avancés</b>	
Détection de contact	Trajectoire
Formulation	Pénalité
Contact glissant	Surface discrète
Auto-contact de corps	Contrôlé par le programme
Auto-contact d'élément	Contrôlé par le programme
Tolérance	0,2

Tableau III.7 : Interaction Corps tolérance avec frottement

Nom de l'objet	Interaction Corps
Etat	Défini complètement
<b>Champ d'application</b>	
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie
Géométrie	Tous les corps
<b>Définition</b>	
Type	Avec frottement
Coefficient de frottement	0,4
Coefficient dynamique	0,
Constante de dégradation	0,
Désactivé	Non



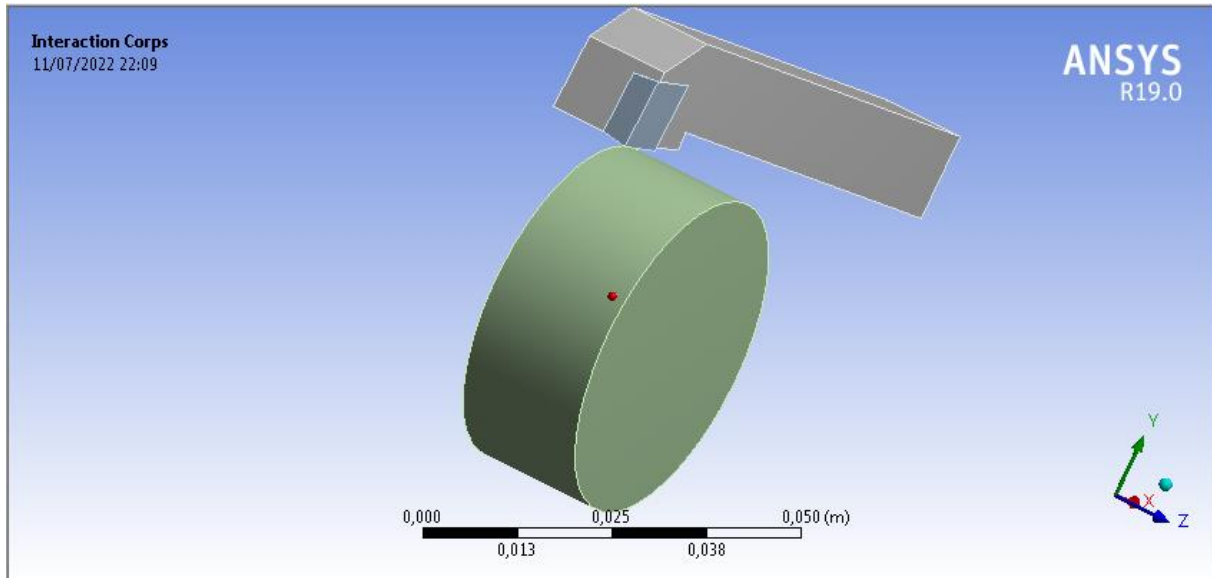


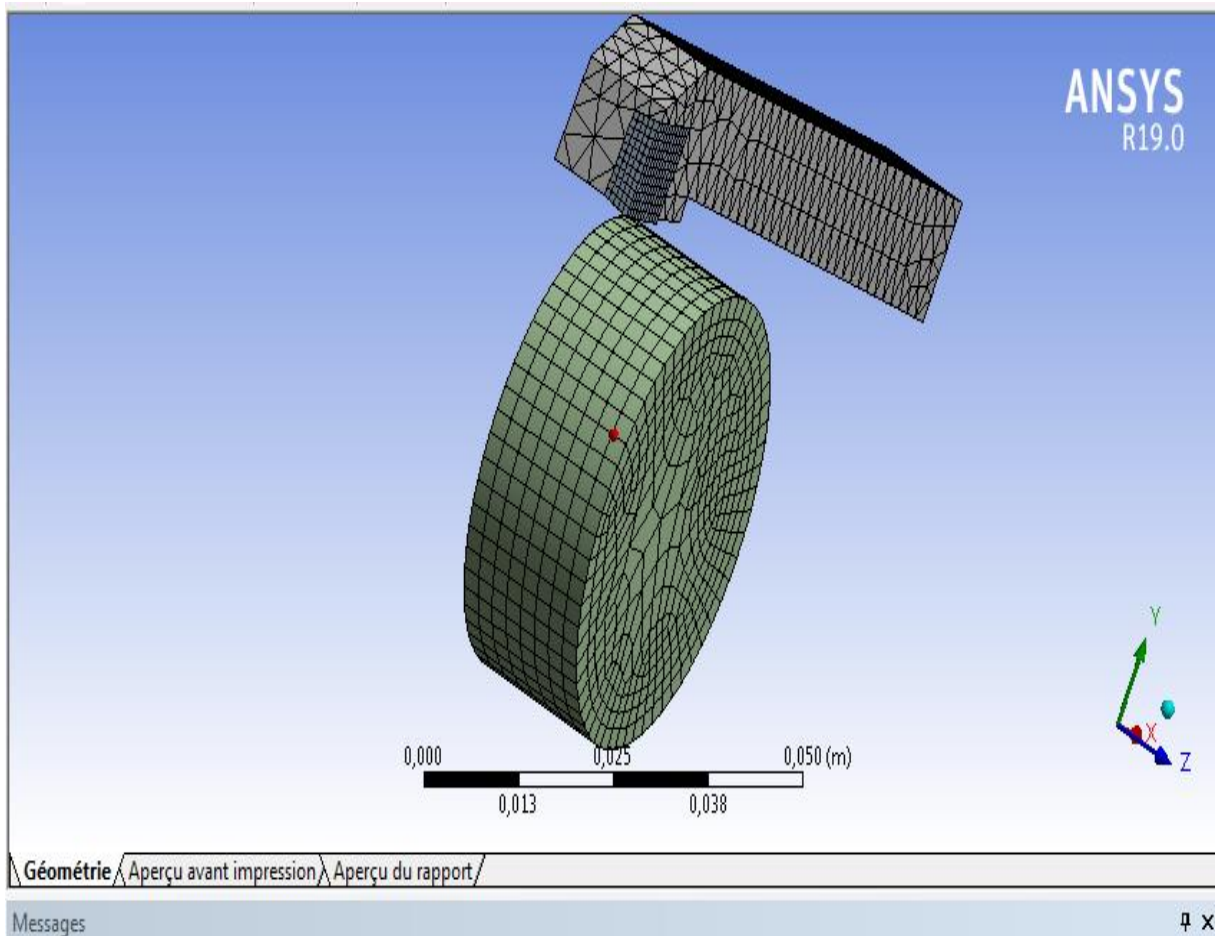
Figure III.10 : intersections des corps

**III.9. Maillage :**

Un maillage est une structure de données géométrique permettant de représenter des subdivisions de surface à l’aide d’un ensemble de polygones. Le maillage est utilisé pour représenter des surfaces.

Tableau III.8 : Maillage.

Nom de l'objet	Maillage
<b>Dimensionnement</b>	
Diagonale de la boîte englobante	0,138410 m
Aire de surface moyenne	4,4542e-004 m <sup>2</sup>
Longueur d'arête minimale	1,365e-003 m
<b>Qualité</b>	
Vérifier la qualité du maillage	Oui, Erreurs
Qualité cible	Par défaut (0.050000)
Lissage	Elevé
Paramètres de maillage	Aucun
<b>Inflation</b>	
Utiliser l'inflation tétr. automatique	Aucun
Option Inflation	Transition progressive
Rapport de transition	0,272
Maximum couches	5
Taux de croissance	1,2
Algorithme d'inflation	Pré
Afficher les options avancées	Non
<b>Statistiques</b>	
Nœuds	5213
Eléments	6318



**Figure III.11 : Maillage**

### **III.10. Dynamique explicite :**

La dynamique explicite est une méthode d'intégration temporelle utilisée pour effectuer des simulations dynamiques lorsque la vitesse est importante

Elle tient compte des conditions qui changent rapidement lors des événements discontinus comme les chutes libres, les impacts à grande vitesse et les charges appliquées. Elle est le choix préféré pour simuler des phénomènes physiques hautement transitoires.

Tableau III.9 : Dynamique explicite la charges

Nom de l'objet	<i>Déplacement</i>	<i>Vitesse</i>	<i>Déplacement distant</i>
Etat	Défini complètement	Désactivé(e)	Défini complètement
<b>Champ d'application</b>			
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie		
Géométrie	2 Corps		
<b>Définition</b>			
Type	Déplacement	Vitesse	Déplacement distant
Défini par	Composantes		
Système de coordonnées	Système de coordonnées global		
Composante X	0, m (exprimé sous forme de rampe)	Données tabulaires	
Composante Y	-4,e-003 m (exprimé sous forme de rampe)	Données tabulaires	
Composante Z	0, m (exprimé sous forme de rampe)	Données tabulaires	
<b>Champ d'application</b>			
Méthode de champ d'application		Sélection de géométrie	
Géométrie		1 Corps	
<b>Champ d'application</b>			
Méthode de champ d'application		Sélection de géométrie	
Géométrie		1 Face	
Système de coordonnées		Système de coordonnées global	
Coordonnée X		-8,3488e-002 m	
Coordonnée Y		3,4277e-003 m	
Coordonnée Z		-2,1533e-002 m	
Emplacement		Défini(e)	
<b>Avancés</b>			
Sphère de contact		Tout	

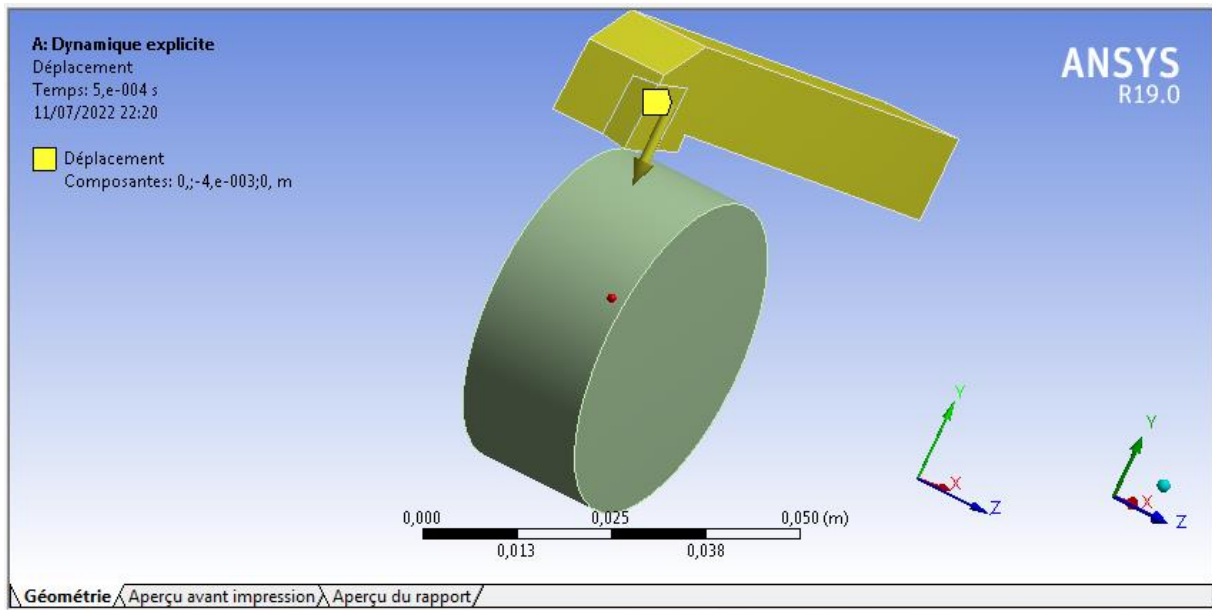


Figure III.12 : Déplacement

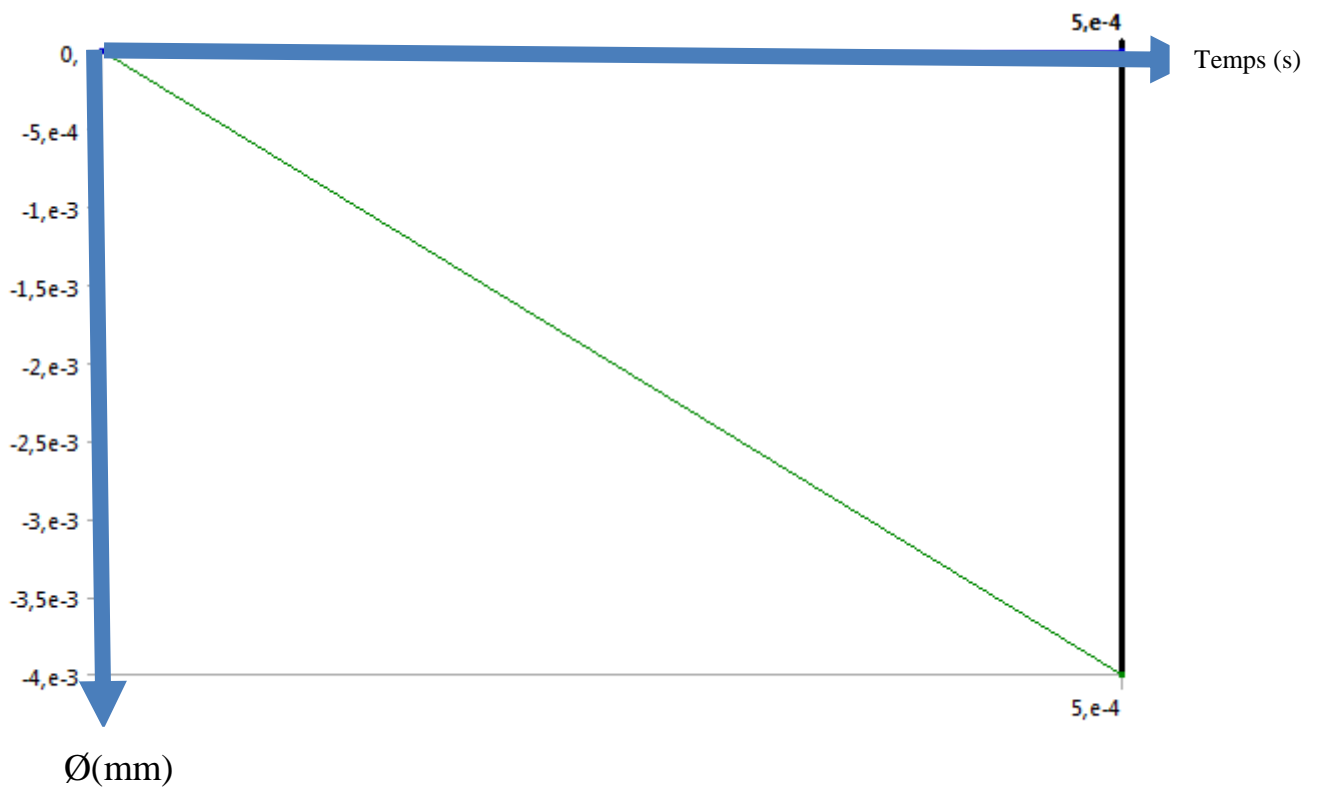


Figure III.13 : Graphe de Déplacement

TABLEAU III.10 : Dynamique explicite la Vitesse

Etapes	Temps [s]	X [m/s]	Y [m/s]	Z [m/s]
1	0,	0,	0,	0,
	5,e-004			460,

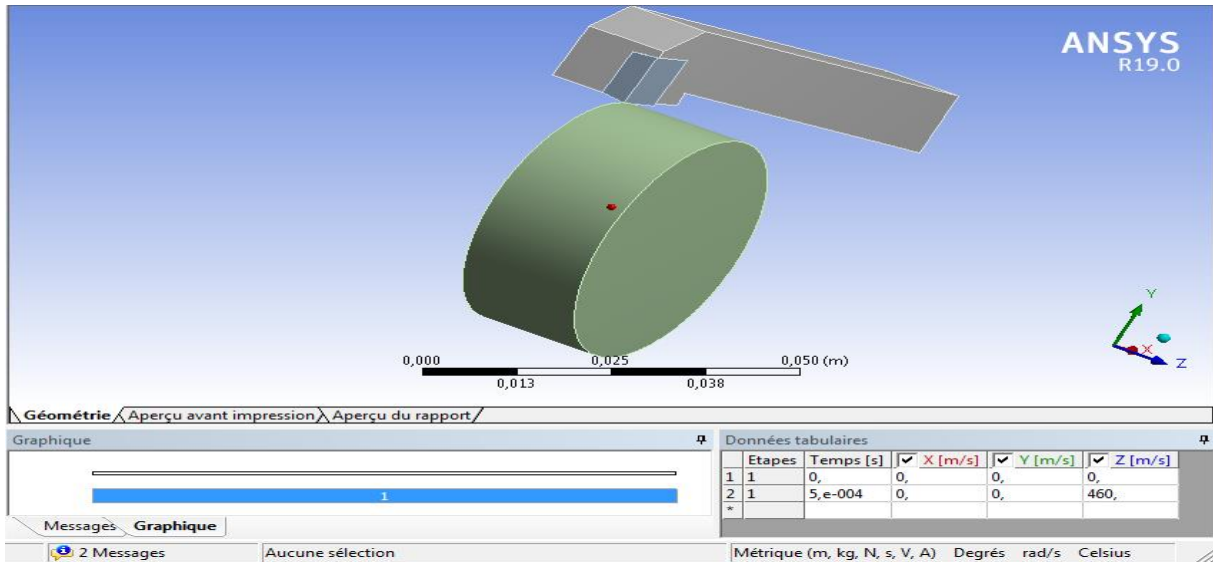


Figure III.14 : Vitesse

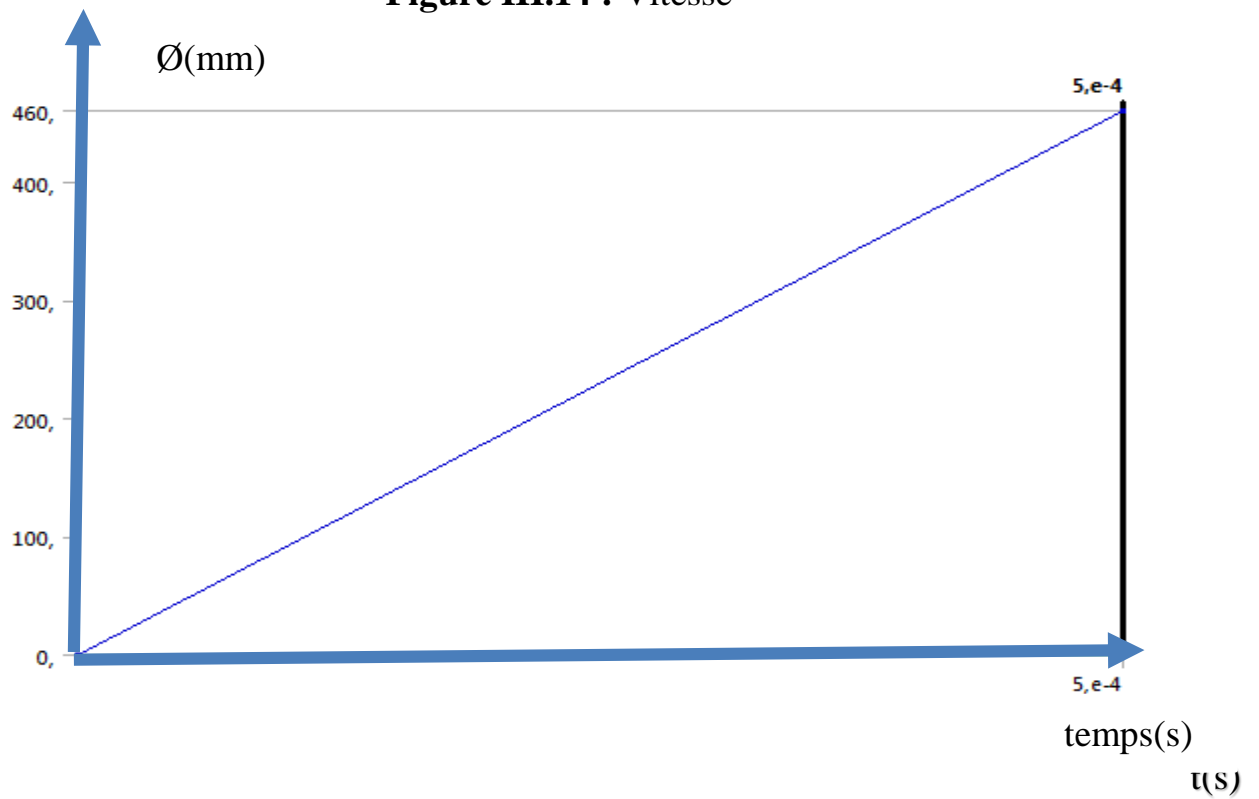


Figure III.15 : Graphe de Vitesse.

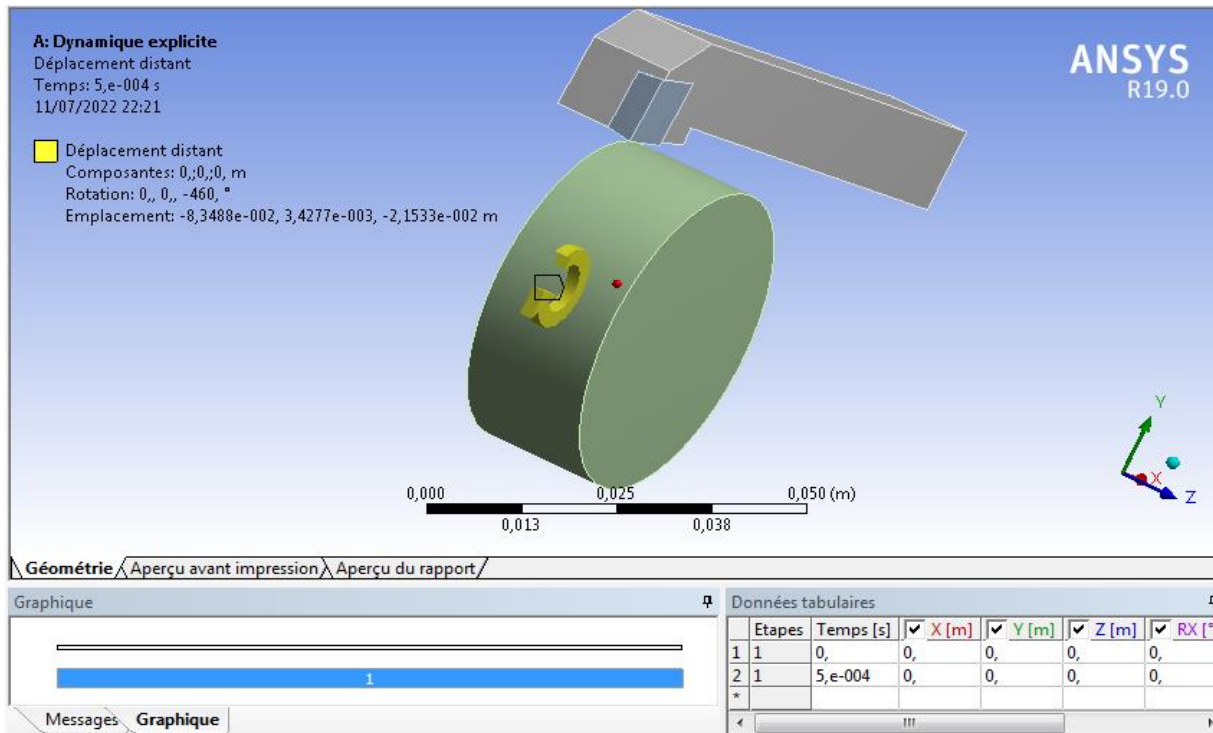


Figure III.16 : déplacement par distance

III.11. Solution :

Les tableaux ci-dessous permettent de donner les informations sur notre solution. Ils représentent aussi nos résultats.

Tableau III.11 : Dynamique explicite Solution Informations sur la solution

Nom de l'objet	Informations sur la solution
Etat	Résolu
<b>Informations sur la solution</b>	
Données de sortie de la solution	Sortie du solveur
Intervalle de mise à jour	2,5 s
Points d'affichage	Tout
Afficher le filtre pendant la résolution	Oui

Tableau III.12 : Dynamique explicite solution de résultats

Résultats	
Minimum	7,53e+008 Pa
Maximum	1,1949e+010 Pa
Nodal moyenné	3,5375e+009 Pa
Valeur minimale sur	Part 3
Valeur maximale sur	Part 3
Valeur minimale dans le temps	
Minimum	0, Pa
Maximum	1,4471e+009 Pa
Valeur maximale dans le temps	
Minimum	0, Pa
Maximum	1,9747e+010 Pa
Informations	
Temps	5,0002e-004 s
Définir	21
Numéro de cycle	3975

Tableau.III.13 : Dynamique explicite solution contrainte équivalente

Temps [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Nodal moyenné [Pa]
1,1755e-038	0,	0,	0,
2,5062e-005	2,1011e+008	1,5304e+010	4,0333e+009
5,0035e-005	6,1354e+008	1,9747e+010	6,9878e+009
7,5024e-005	1,246e+009	1,6192e+010	8,619e+009
1,0005e-004	1,4471e+009	1,6318e+010	8,3053e+009
1,2508e-004	5,6623e+008	1,1914e+010	5,668e+009
1,5003e-004	2,1132e+008	9,6173e+009	2,716e+009
1,7502e-004	4,1753e+008	4,1585e+009	2,4439e+009
2,0012e-004	7,7709e+008	1,4252e+010	5,2698e+009
2,2506e-004	4,4571e+008	1,8458e+010	7,142e+009
2,5012e-004	1,021e+009	1,5152e+010	7,7476e+009
2,7508e-004	6,1008e+008	1,1814e+010	6,4109e+009
3,0006e-004	7,3472e+008	7,1686e+009	3,7383e+009
3,2502e-004	2,798e+008	4,3202e+009	1,8476e+009
3,5e-004	5,5205e+008	7,4175e+009	4,0799e+009
3,7507e-004	4,1698e+008	1,4955e+010	6,2663e+009
4,0009e-004	5,8216e+008	1,684e+010	7,1232e+009
4,2511e-004	1,1256e+009	1,2961e+010	6,473e+009
4,5009e-004	7,4035e+008	9,8519e+009	4,411e+009
4,7511e-004	1,6672e+008	1,0255e+010	1,8681e+009
5,0002e-004	7,53e+008	1,1949e+010	3,5375e+009

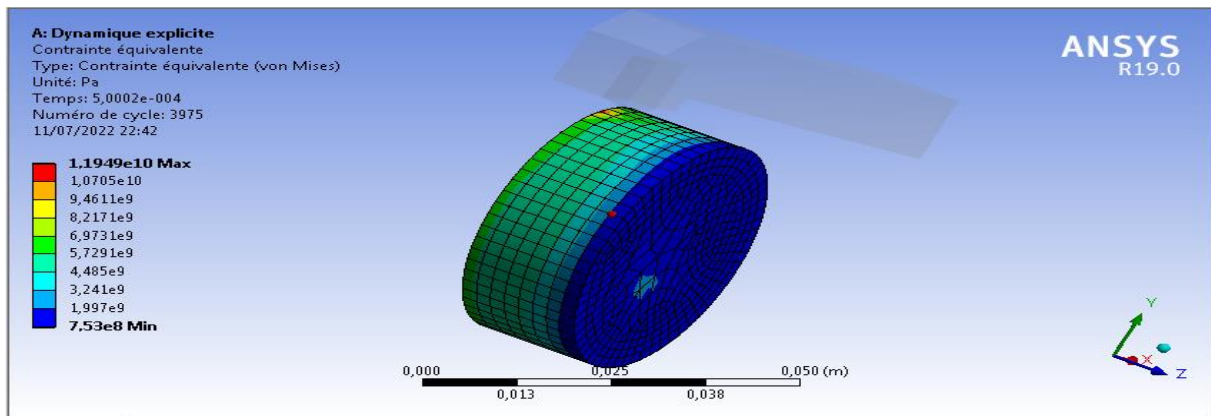


Figure III.17 : Contraintes équivalentes

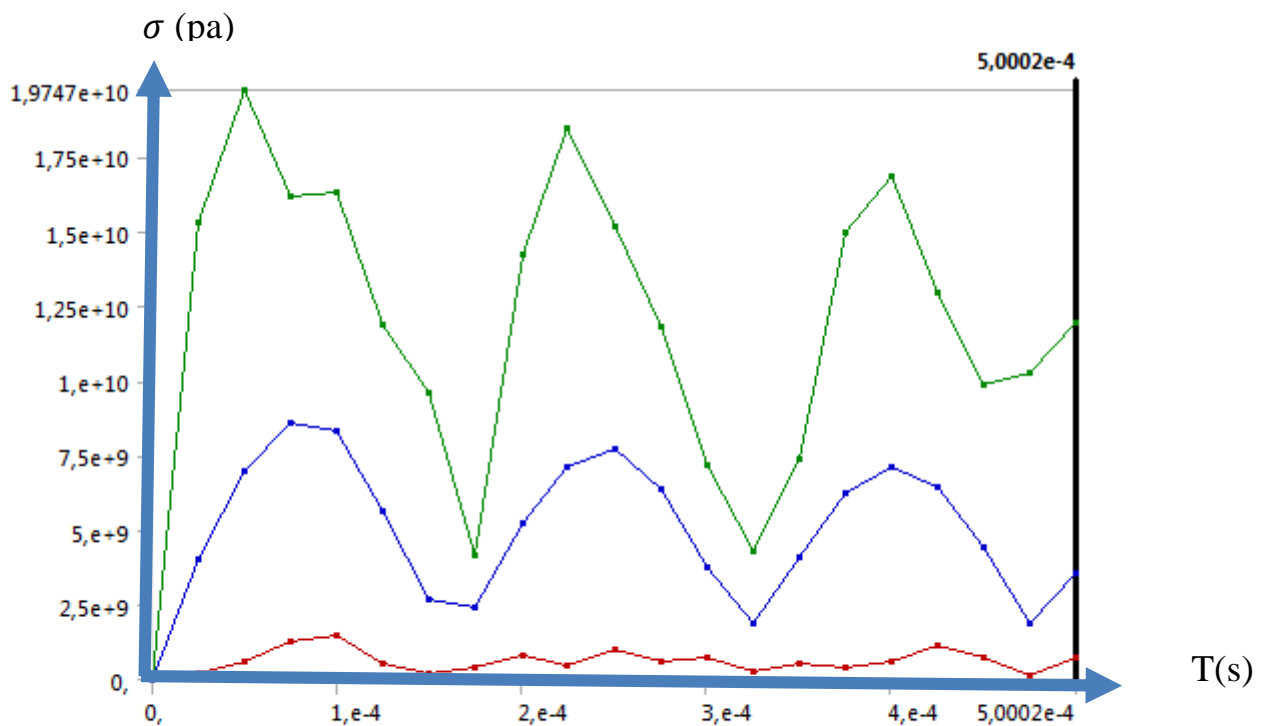


Figure III.18 : Graphe des contraintes équivalentes.

- Le courbe vert représente les contraintes maximales
- Le courbe bleu représente les contraintes moyennes
- Le courbe rouge représente les contraintes minimales



Tableau III.14 : Dynamique explicite solution de température

Résultats	
Minimum	19,85 °C
Maximum	653,93 °C
Nodal moyenné	22,804 °C
Valeur minimale sur	Part 1
Valeur maximale sur	Part 3
Valeur minimale dans le temps	
Minimum	0, °C
Maximum	0, °C
Valeur maximale dans le temps	
Minimum	0, °C
Maximum	0, °C
Informations	
Temps	5,0002e-004 s
Définir	21
Numéro de cycle	3975

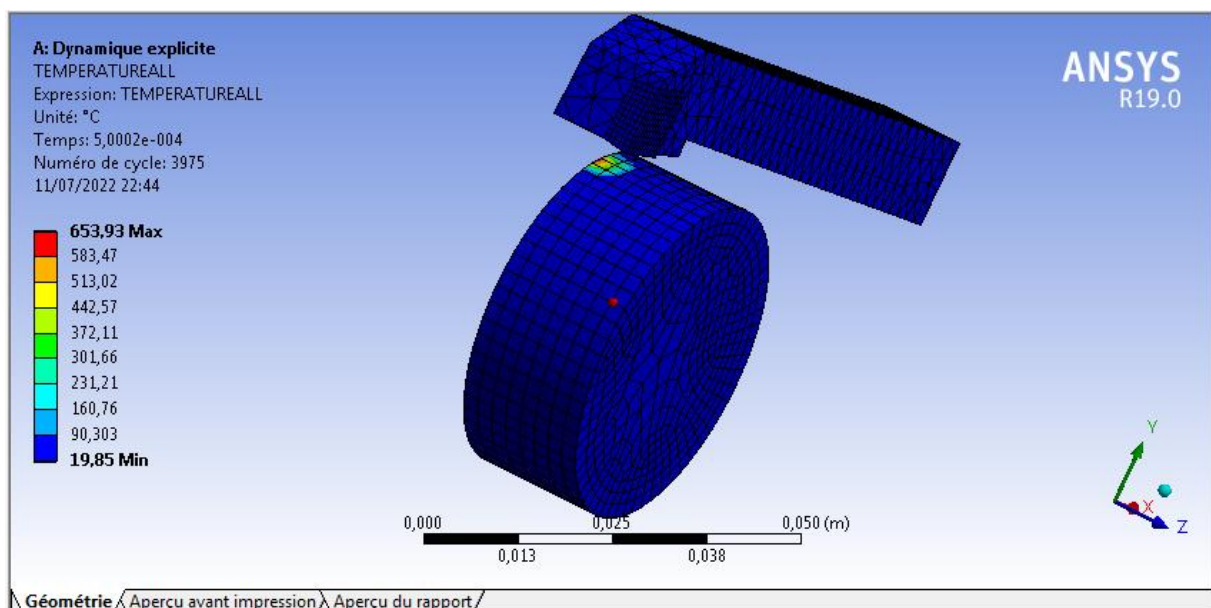


Figure III.19 : Températures

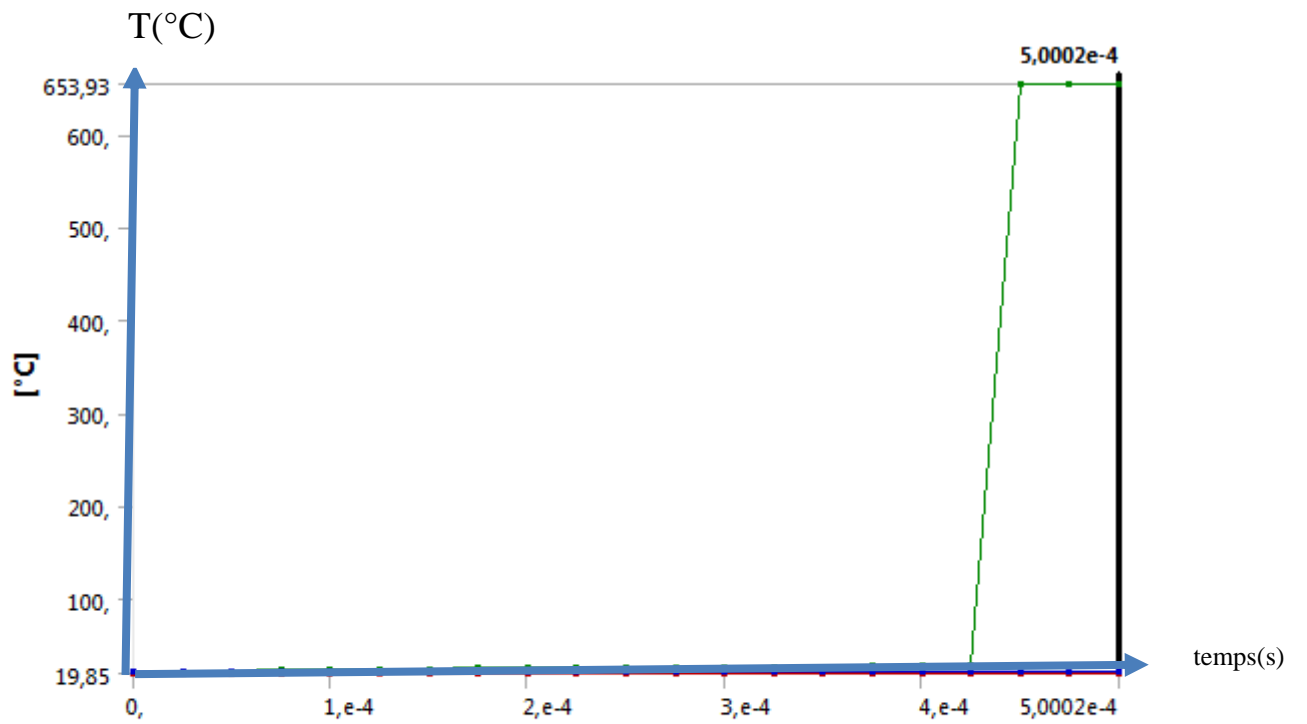


Figure III.20 : Graphe de température

Cette figure montre l'effet de la température sur la pièce en fonction de temps

On remarque que la température maximale est de 635.93°. Cette température est loin d'atteindre la température de fusion de notre matériau.

# **Conclusion générale**

### VI. Conclusion générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à étudier une opération du procédé de tournage sur une pièce d'acier standard et nous nous sommes aussi intéressés à l'étude du contact Outil de coupe – Pièce à usiner en utilisant la méthode des éléments finis

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

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a été consacré au procédé de tournage qui figure parmi les procédés d'usinage avec enlèvement de matières.

La troisième partie a montré l'importance de la coupe des métaux qui parfois est difficilement réalisable car d'une part, elle est sujette aux conditions de coupe et d'autre part, les paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage influent d'une manière importante sur l'état de surface.

Notre travail nous a permis :

- D'étudier le phénomène de coupe des métaux (outil).
- Grâce aux paramètres de coupe tournage, il est possible d'étudier l'évolution du système outil-pièce.

On conclut que :

- Afin de faciliter l'outil de coupe lors du contact, nous devons choisir les conditions idéales lors du fonctionnement.
- La vitesse de coupe est le facteur le plus influant lors de l'usinage.
- Pour augmenter la durée de vie de l'outil de coupe, nous devons fournir les conditions nécessaires comme les propriétés du matériau et la température.
- Les différentes approches de simulation de la coupe des métaux sont complémentaires.
- L'augmentation de la vitesse de coupe a provoqué une augmentation de la température tout en évitant la température de fusion.

# **Bibliographie**

## V. Bibliographie

- [1] M.G.Vigier, Pratique des plans d'expérience, les éditions d'organisation, pp 190, 1988.
- [2] E .J.Armarego forces and predictive cutting models in machining operations, Journal of Engineering Manufacture, n° 216, pp. 347-356, 2002., S.Verezub et P.Samaranayake, The effects of coatings on the cutting process, friction,
- [3] G. Paquet, Guide de l'usinage, les Guides Industriels Edition Delagrave, France, 2000.
- [4] Avevor, Yao et Moufki, Abdelhadi. Influence de la vitesse de coupe sur les conditions thermomécaniques à l'interface outil-copeau. S09d Procédés d'usinage, 2015.
- [5] :B. Benmohammed, Identification des lois d'effort de coupe de tournage en régime dynamique, Thèse de Doctorat de Mécanique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - France, 1996.
- [6] N.S. Atcherkane, Les machines travaillant par enlèvement de métal, Société des publications mécaniques Paris, France.
- [7] : A. L. Defretin, G. Levailant, Usinage à grande vitesse, Techniques de l'Ingénieur, BM 7180, 1999.
- [8] Delalondre, Fabien. Modélisation et étude 3D des phénomènes de cisaillement adiabatiques dans les procédés de mise en forme à grande vitesse. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris,2008.
- [9] Alain Passeron, « Tournage » Article BM 7086, Technique de l'ingénieur, 1998
- [10] :K. Bekelbab, Modélisation et simulation du comportement dynamique de l'ensemble pièce-outil-machine en usinage à l'outil coupant. Thèse de Doctorat, ENSAM - France, 1995.

- [11] Kamel Mehdi ,Etude du comportement dynamique des pieces a parois minces au cours d'une opération d'usinage en tournage et en fraisage de profil & systèmes experts et langages a objets : outils pour la conception mécanique assistée par ordinateur, Université de Sfax École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2008.
- [12]:B. Benmohammed, rapport d'un projet de recherche CNEPRU, Modélisation et Simulation de l'Usinage à Grande Vitesse, Université de BATNA, 2008.
- [13] d'usinage, influence sur l'usinage à grande vitesse. 2015. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [14] Kiliçaslan, C., Modelling and simulation of metal cutting by finite element method. Thèse de Master.Institut de Technologie. Ysmir. Turkey,2009.
- [15]: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.