

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



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

Thème :
Etude expérimentale et modélisation
numérique du comportement
thermomécanique lors du tournage de l'acier
XC48

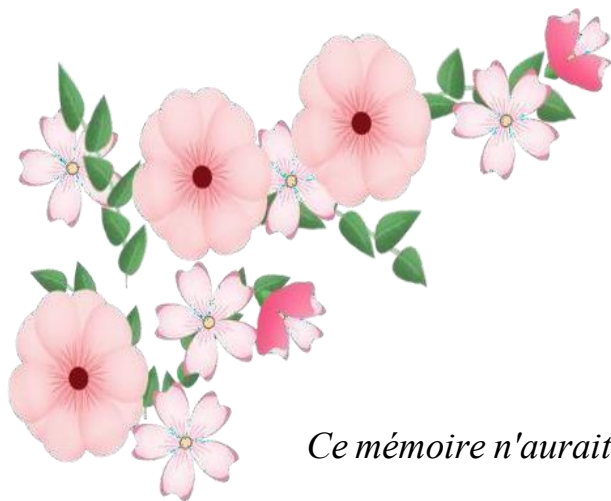
Proposé et encadré par :

N.Melzi
M.Temmar

Réalisé par :

M'harab Dounya

Année universitaire : 2024/2025



Remerciements

Ce mémoire n'aurait pu voir le jour sans le soutien inestimable de ma promotrice,

Mlle N.Melzi. Je la remercie vivement pour m'avoir transmis son savoir, pour sa patience et pour m'avoir guidé avec perspicacité dans ma démarche de recherche.

Sa rigueur et ses encouragements ont été une source de motivation constante.

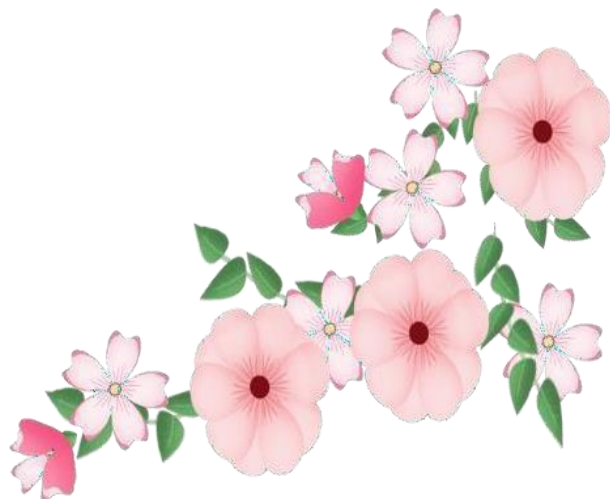
Je remercie également chaleureusement Monsieur Temmar Mustapha, mon Co- promoteur, pour son accompagnement bienveillant et ses pertinentes suggestions qui ont grandement enrichi ma réflexion.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude aux membres du jury. En acceptant d'évaluer ce mémoire, ils témoignent de l'intérêt qu'ils portent à notre travail.

Mes remerciements vont également à tout le personnel enseignant, technique et administratif du Département de Génie Mécanique de l'Université de Blida 1, pour leur présence et leur soutien indéfectibles.

Enfin, je remercie chaleureusement

Toutes les personnes qui, par leur contribution, qu'elle soit majeure ou discrète, ont permis l'achèvement de ce modeste travail.





Dédicaces

À moi-même, pour la persévérance, la résilience et la force que j'ai découvertes tout au long de ce parcours. Ce mémoire est le fruit de mes efforts et la preuve que la détermination mène à l'accomplissement.



Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie du comportement thermomécanique de l'acier XC48 lors du tournage à sec en opération de chariotage, avec une concentration particulière sur la distribution et l'évolution des températures au sein de la zone de coupe. Pour ce faire, une double approche est mise en œuvre :

D'une part, une étude expérimentale est menée à l'aide d'une caméra infrarouge UTi120T, permettant de capter et d'analyser en temps réel la distribution des températures dans la zone de coupe. Cette méthode fournit des données cruciales pour la validation des modèles numériques.

D'autre part, une modélisation numérique par éléments finis est développée sous ANSYS Explicit. Cette simulation vise à reproduire fidèlement le processus d'usinage, en mettant l'accent sur la prédiction de la distribution thermique ainsi que sur la formation du copeau, les contraintes et les déformations associées.

La confrontation des résultats expérimentaux et numériques permettra de valider le modèle développé et d'offrir une compréhension détaillée des mécanismes thermomécaniques influençant la durée de vie de l'outil, l'intégrité de la surface usinée et l'efficacité du procédé de tournage à sec de l'acier XC48.

Mots clés : Procédé de tournage, Outils de coupe, paramètres de coupe, coupe des métaux, température de coupe, modélisation, éléments finis.

Abstract

This master's thesis presents an in-depth study of the thermomechanical behavior of XC48 steel during dry turning in a facing operation, with a particular focus on the distribution and evolution of temperatures within the cutting zone. To achieve this, a dual approach is implemented:

On one hand, an experimental study is conducted using a UTi120T infrared camera, enabling real-time capture and analysis of temperature distribution in the cutting zone. This method provides crucial data for the validation of numerical models.

On the other hand, a numerical finite element modeling is developed using ANSYS Explicit. This simulation aims to faithfully reproduce the machining process, emphasizing the prediction of thermal distribution, as well as chip formation, associated stresses, and deformations.

The comparison of experimental and numerical results will allow for the validation of the developed model and offer a detailed understanding of the thermomechanical mechanisms influencing tool life, machined surface integrity, and the efficiency of the dry turning process for XC48 steel.

Keywords: Turning process, cutting tools, cutting parameters, Metal cutting, Cutting temperature, Modeling, Finite elements.

ملخص

يقدم هذا البحث دراسة معمقة للسلوك الحراري-الميكانيكي لفولاذ XC48 أثناء عملية الخراطة الجافة في مرحلة التسوية، مع تركيز خاص على توزيع وتطور درجات الحرارة داخل منطقة القطع. ولتحقيق هذا الهدف، تم اعتماد نهج مزدوج، من جهة أُجريت دراسة تجريبية باستخدام كاميرا حرارية من نوع UT1120T، ما مكن من التقاط وتحليل التوزيع اللحظي لدرجات الحرارة في منطقة القطع. توفر هذه الطريقة بيانات حاسمة تُستخدم في التحقق من صحة النماذج العددية. ومن جهة أخرى، تم تطوير نمذجة عددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة في برنامج ANSYS Explicit بهدف محاكاة عملية التشغيل بدقة. مع التركيز على التنبؤ بالتوزيع الحراري، وتكوين الراسب، والإجهادات والتشوهات المرتبطة به. إن مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج العددية ستمسهم في التحقق من صحة النموذج المطور، وتوفير فهم عميق للآليات الحرارية-الميكانيكية التي تؤثر على عمر الأداة، وجودة السطح المشغل، وكفاءة عملية الخراطة الجافة لفولاذ XC48.

الكلمات المفتاحية: عملية الخراطة، أدوات القطع، معلمات القطع، قطع المعادن، درجة حرارة القطع، النمذجة، العناصر المحدودة.

Table des matières

Remerciements	2
Dédicaces.....	3
Résumé.....	4
INTRODUCTION GENERALE	1
<i>Chapitre I : Généralités sur le procédé de tournage</i>	<i>2</i>
I.1 Introduction	3
I.2 Le tournage : un procédé d’usinage conventionnel majeur	3
I.2.1 Surfaces de la pièce.....	4
I.2.2 Le tour.....	4
I.2.3 Types de tours	5
I.2.4 Outils de tournage	7
I.2.5 Types de matériaux d’outils.....	10
I.2.6 Opérations de tournage	13
I.2.7 Modes de travail.....	14
I.2.8 Paramètres liés au tournage.....	14
I.3 Conclusion	18
<i>Chapitre II : Étude du processus de coupe et modélisation thermique.....</i>	<i>19</i>
II.1 Introduction.....	20
II.2 Les phénomènes thermiques pendant la coupe	20
II.3 Coupe orthogonale.....	20
II.3.1 Copeau	20
II.4 Types de copeaux	21
II.4.1 Le copeau continu.....	21
II.4.2 Le copeau discontinu	21
II.4.3 Le copeau fragmenté	21
II.5 Lubrification.....	23
II.6 Usinage à sec	24

Sommaire

II.7 Différence entre UGV et usinage conventionnel.....	24
II.8 Les effets thermiques et les modèles numériques associés à la coupe des métaux	24
II.8.1 Effets de la Température de coupe.....	24
II.8.1.1 Sur l'outil de coupe	24
II.8.1.2 Sur la pièce	25
II.8.2 Détermination de la température de coupe.....	25
II.8.2.1 Mesure par thermocouple.....	25
II.8.2.2 Mesure de la température par la méthode optique	25
II.8.2.3 Mesure par les méthodes analytiques	26
II.9 Formulation des modèles.....	27
II.9.1 Approche Lagrangienne.....	27
II.9.2 Approche Eulérienne.....	27
II.9.3 Approche Eulérienne-Lagrangienne Arbitraire.....	28
II.10 La méthode des éléments finis (MEF).....	28
II.10.1 Types de tests d'analyse par éléments finis.....	28
II.11 Le maillage.....	28
II.12 Conclusion	30
<i>Chapitre III : Méthodologie expérimentale et modélisation numérique.....</i>	<i>31</i>
III.1 Introduction	32
III.2 Etude expérimentale	32
III.2.1 Equipements utilisés.....	32
III.2.1.1 Matière usinée.....	33
III.2.1.2 ANSYS explicite	34
III.2.2 Lois de comportement	35
III.2.3 Comportement mécanique de la pièce	35
III.2.4 Critère d'endommagement de Johnson-Cook	36
III.3 Présentation générale du modèle de simulation de la coupe orthogonale	36
III.3.1 Le modèle 3D	36
III.3.2 Modélisation de l'outil de coupe	37

Sommaire

III.3.3 Modélisation de la pièce à usiner	37
III.3.4 Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce et de l'outil	37
III.3.5 Conditions aux limites et chargement	38
III.4 Les étapes à suivre pour la modélisation	38
III.4.1 Les données techniques	39
III.4.2 Géométrie (modélisation de l'outil de coupe et de la pièce)	39
III.4.3 Modèle	39
III.4.4 Gestion de contact.....	40
III.4.5 Le maillage	40
III.4.6 Configuration	41
III.5 Conclusion	42
<i>Chapitre IV : Analyse des résultats expérimentaux et numériques</i>	43
IV.1 Introduction.....	44
IV.2 Distribution de la température à l'interface outil/pièce/copeau.....	44
IV.3 Distribution des contraintes équivalentes à l'interface outil/pièce/copeau	47
IV.5 Conclusion	50
<i>Conclusion générale</i>	51
<i>Références bibliographiques</i>	53

Liste des figures

Chapitre I	
Figure I.1 : Les mouvements de tournage	3
Figure I.2 : Surfaces de la pièce	4
Figure I.3 : Terminologie des organes principaux du tour	4
Figure I.4 : Tour parallèle à charioter, fileté et tour à copier	5
Figure I.5 : Tour semi-automatique et tour automatique	6
Figure I.6 : Tour automatique multibroches et tour à commande numérique	6
Figure I.7 : Outil de coupe	7
Figure I.8 : Outils utilisés en tournage	8
Figure I.9 : Outil réglé correctement	9
Figure I.10 : Outil mal réglé	9
Figure I.11 : Types de montage	9
Figure I.12 : Outils en acier rapide	10
Figure I.13 : Outils en carbure métallique	10
Figure I.14 : Outils en céramique	10
Figure I.15 : Outils en diamant	11

Figure I.16 : Outils à plaquette	11
Figure I.17 : Travail d'enveloppe et travail de forme	14
Figure I.18 : Paramètres de coupe	15
Figure I.19 : Schéma illustrant la longueur totale de déplacement de l'outil en tournage	16
Figure I.20 : Visualisation des efforts F_c , F_t et F_a , et des paramètres d'usinage	17
Chapitre II	
Figure II.1: Coupe orthogonale	20
Figure II.2 : Etapes de formation du copeau lors de l'usinage	21
Figure II.3 : Morphologie des copeaux : continu, discontinu et fragmenté	22
Figure II.4: Les différentes formes macrographiques de copeaux	22
Figure II.5: Formation du copeau en coupe orthogonale	23
Figure II.6 : Température de coupe / la durée de vie de l'outil	25
Figure II.7 : Dispositifs de mesure de la température lors de l'usinage : thermocouple, pyromètre, et caméra infrarouge.	26
Figure II.8 : Description de Lagrange	27
Figure II.9 : Description d'Euler	27
Figure II.10 : Raffinement	29
Figure II.11 : Lissage	29

Figure II.12 : Le maillage en simulation numérique	29
Chapitre III	
Figure III.1: Tour utilisé	33
Figure III.2 : Echantillon brut	33
Figure III.3 : UTi120T, caméra thermique de poche	34
Figure III.4 : Etapes pour l'obtention d'un volume sous SolidWorks	37
Figure III.5 : Géométrie du modèle	39
Figure III.6 : Les systèmes de coordonnées	40
Figure III.7 : Gestion de contact	40
Figure III.8 : Méthode appliquée pour le contact outil/pièce	41
Figure III.9 : Déplacements de l'outil et de la pièce	42
Chapitre IV	
Figure IV.1: La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier ($V_c=15\text{m/min}$ et $f=0,4\text{mm/tr}$)	45
Figure IV.2: La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ($V_c = 15\text{m/min}$ et $f=0,8\text{mm/tr}$)	46
Figure IV.3: La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ($V_c = 30\text{m/min}$ et $f=0,4\text{mm/tr}$)	47
Figure IV.4: Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises	47

Figure IV.5 : Le graphique comparatif des températures obtenues par simulation (ANSYS) et expérimentalement pour les trois essais

48

Liste des Tableaux

Chapitre I	
Tableau I.1: Opérations extérieures et intérieures de tournage	13
Chapitre III	
Tableau III.1: Paramètres de la loi de comportement de l'acier XC48	37
Tableau III.2: Critère d'endommagement Johnson-Cook de l'acier XC48	37
Tableau III.3: Les propriétés thermomécaniques de matériau et de l'outil	38
Chapitre IV	
Tableau IV.1: Conditions de Coupe, Températures et Écarts	48

Liste des symboles et des abréviations

Symbole	Définition
Mc	Mouvement de coupe
Mv	Mouvement d'avance
ARO	Acier rapide ordinaire
ARS	Acier rapide supérieur
AR	Acier rapide
β	Angle de dépouille ou angle de coupe (°)
ϵ_r	Angle d'attaque de la plaquette (°)
Mp	Mouvement de pénétration
r_ϵ	Rayon de bec de la plaquette (mm)
ω	Vitesse angulaire (rad/s)
Vc	Vitesse de coupe (m/min)
N	Vitesse de rotation (tr/min)
f	Avance par tour (mm/tr)
Vf	Vitesse d'avance (mm/min)
ap	Profondeur de passe (mm)
L	Longueur totale de déplacement de l'outil (mm)
lu	Longueur usinée (mm)
e	Distance de sécurité (mm)
Tm	Temps technologique d'usinage (min)
T	Durée de vie de l'outil (min)
Cv	Constante de Taylor
n	Coefficient de Taylor (lié au matériau et à l'usinage)
Fc	Effort tangentiel de coupe (N)
Ft	Effort tangentiel d'avancement (N)
Fa	Effort de poussée (N)

K_c	Pression spécifique de la coupe (daN/mm ²)
P_c	Puissance de coupe (W)
ZCP	Zone de cisaillement primaire
ZCS	Zone de cisaillement secondaire
ZCT	Zone de cisaillement tertiaire
UGV	Usinage à grande vitesse
T	Élévation de température à l'interface pièce-outil °C (F°)
U	Énergie spécifique N-m/mm ³ J/mm ³
t_0	Épaisseur de la pièce avant la coupe en m
ρC	Chaleur spécifique volumique (J/mm ³)
k	Diffusivité thermique du matériau (m ² /s)
MEF	Méthode des éléments finis
d	Diamètre de la pièce (mm)
h	Épaisseur du copeau (mm)
R_m	Résistance maximale (N/mm)
R_e	Résistance élastique (N/mm)
IFOV	Instantaneous Field of view
σ	Contrainte équivalente qui représente la limite d'écoulement plastique (Pa)
$\bar{\varepsilon}_p$	Déformation plastique équivalente
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	Vitesse de déformation plastique (s ⁻¹)
$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$	Seuil à partir duquel la vitesse de déformation est prise en compte
T_{amb}	Température ambiante ou de référence (k)(°C)
T_0	Température de fusion (k)(°C)
$(A, B \text{ et } n)$	Paramètres représentant l'écrouissage
C	Constante définissant la dépendance à la vitesse de déformation
m	Paramètre définissant la dépendance à la température
ε_f	Déformation équivalente à rupture du matériau

Sommaire

σ_m	Contrainte moyenne (Pa)
σ_{eq}	Contrainte équivalente de Von Mises (Pa)
$D_1, D_2, D_3, D_4 \text{ et } D_5$	Constantes de rupture de Johnson-Cook
μ	Coefficient de frottement

A decorative gold frame with a complex, multi-layered border. It features a central rectangular area with a smaller rectangle inside, and the corners are adorned with intricate, overlapping lines that create a sense of depth and elegance.

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'usinage joue un rôle central dans la fabrication mécanique, en assurant la transformation précise des matériaux bruts. Son évolution vers les machines-outils numériques a permis d'atteindre des niveaux élevés de performance, de qualité et d'efficacité.

Parmi les différentes techniques d'usinage, le tournage à sec, bien que respectueux de l'environnement, pose des défis thermomécaniques en raison de l'absence de lubrification, affectant directement la durée de vie de l'outil et la qualité de la surface usinée.

Ce travail étudie le comportement thermomécanique de l'acier XC48 en chariotage à sec, en combinant une approche expérimentale (caméra infrarouge) et une modélisation numérique (ANSYS Explicit) pour analyser la température, la formation du copeau, les contraintes et les déformations, tout en validant les résultats par comparaison.

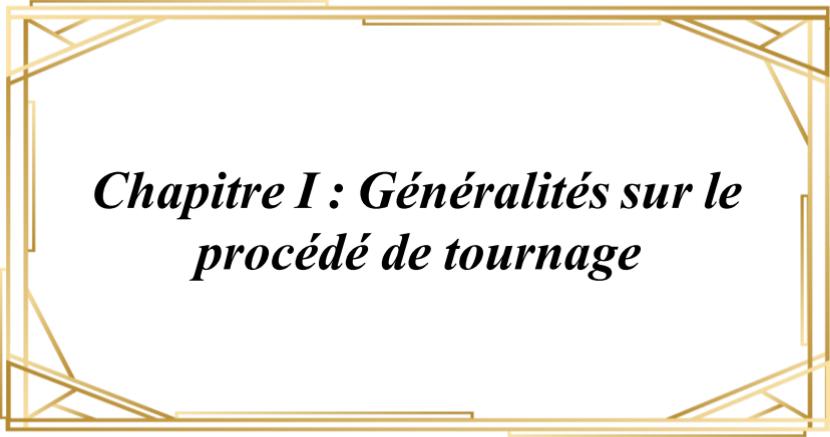
L'objectif principal de cette étude est de :

- Améliorer la performance du procédé,
- Mesurer la température de coupe à l'interface outil-pièce.
- Analyser les effets thermiques dus au frottement et à la déformation.
- Optimiser les conditions de coupe pour réduire l'usure.
- Prédire la durée de vie de l'outil et planifier la maintenance.

Pour mieux organiser notre travail, le manuscrit est divisé en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre est consacré au procédé de tournage, en mettant en lumière ses outils, ses opérations spécifiques ainsi que les principaux paramètres de coupe qui le caractérisent.
- Le second aborde les modèles théoriques de coupe, les effets thermiques et les méthodes de mesure.
- Le troisième se concentre sur la modélisation 3D du tournage à sec de l'acier XC48, avec la loi de Johnson-Cook et une étude expérimentale par caméra thermique.
- Enfin, le quatrième chapitre analyse et compare les résultats numériques et expérimentaux pour valider le modèle utilisé.

Enfin, une conclusion générale résume les résultats et les apports de ce travail.



***Chapitre I : Généralités sur le
procédé de tournage***

I.1 Introduction

L'usinage est un procédé de fabrication mécanique basé sur l'enlèvement de matière à l'aide de machines-outils, permettant d'obtenir des formes précises selon les exigences techniques. Malgré l'apparition de procédés alternatifs, il reste privilégié pour sa précision, sa flexibilité et son coût.

Le tournage compte parmi les procédés conventionnels les plus couramment utilisés. Il mobilise des machines et des outils spécialisés, capables de répondre à une large gamme de besoins dans la fabrication de pièces mécaniques.

I.2 Le tournage : un procédé d'usinage conventionnel majeur

Parmi les procédés d'usinage conventionnels, le tournage représente l'une des techniques les plus répandues. Il s'agit d'un processus d'enlèvement de matière mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation, appelé mouvement de coupe (M_c), tandis que l'outil effectue deux mouvements complémentaires : un mouvement d'avance (M_f) par translation, et un mouvement de pénétration (M_p) perpendiculaire à l'avancement (figure 1) [1].

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). Ce procédé, précis et répétable, s'adapte à de nombreux matériaux et joue un rôle clé dans la fabrication de pièces mécaniques aux tolérances strictes.

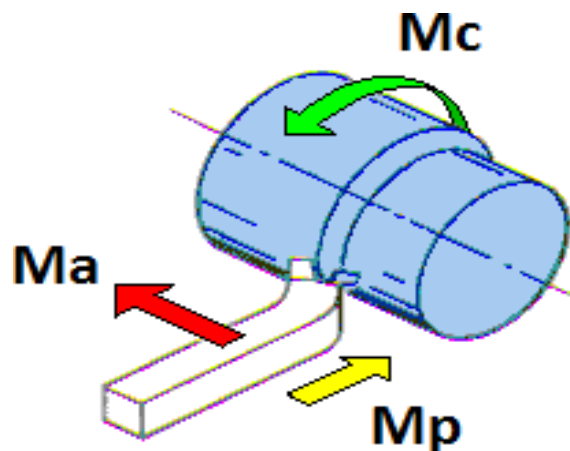


Figure I.1: Les mouvements en tournage [1]

I.2.1 Surfaces de la pièce

Une pièce à usiner comporte une surface brute et une surface usinée finale. Entre les deux, la surface coupée résulte de l'action de l'outil (figure 2) [2].

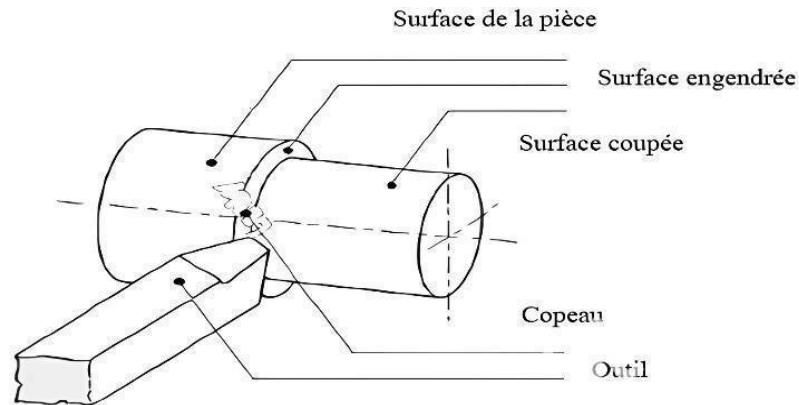


Figure I.2: Surfaces de la pièce [3]

I.2.2 Le tour

La machine appelée "tour" est utilisée pour usiner des arbres. La pièce, tenue par le mandrin, tourne grâce à la broche (mouvement de coupe). L'outil se déplace en translation dans deux directions perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche (figure 3) [4].

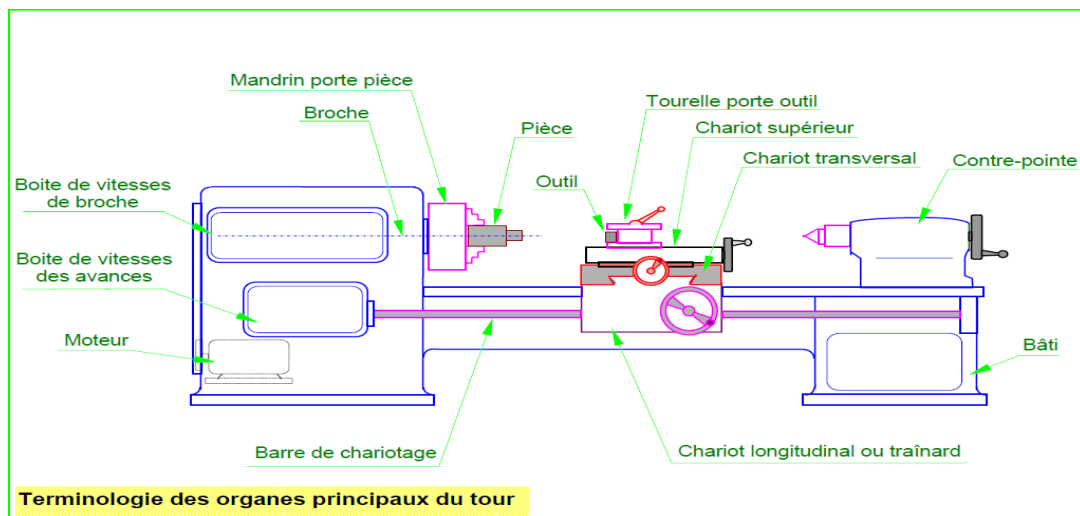


Figure I.3: Terminologie des organes principaux du tour [4]

a) Principaux composants d'un tour

On cite les principaux composants d'un tour [5]:

- **Banc ou bâti** : La base machine supporte les éléments de transmission et de fixation, assurant rigidité et résistance à l'usure.
- **Moteur** : Le moteur du tour transmet le mouvement de coupe à la broche et les avances via des boîtes de vitesses vers la vis-mère et la barre de chariotage.
- **Broche** : Percée, filetée et conique à l'avant pour faciliter le montage de divers dispositifs de fixation de pièces.
- **Le chariot transversal** : Se déplace manuellement ou automatiquement dans un axe perpendiculaire à l'axe de la broche. Le chariot du porte-outil se déplace manuellement.
- **Trainard ou un chariot longitudinal** : Qui se déplace sur le banc du tour. Il supporte le chariot transversal et le chariot porte-outil.

b) Principe de fonctionnement :

La pièce est fixée dans le mandrin, entraîné en rotation par un moteur via la broche. L'outil, monté sur un porte-outil placé sur une tourelle, se déplace grâce aux chariots. La contrepointe permet des opérations en bout de pièce comme le perçage ou l'alésage [6].

I.2.3 Types de tours

Les tours sont utilisés pour usiner des surfaces de révolution. Ils varient du modèle manuel au tour numérique automatisé, selon les besoins en précision, complexité et production.

- **Tour parallèle à charioter et à fileter** : Ces machines sont adaptées aux pièces simples en petites ou moyennes séries, mais offrent peu de flexibilité, ne permettant que l'usinage de surfaces parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche (figure 4) [7].
- **Tour à copier** : Cette machine utilise un gabarit et un système de copiage hydraulique pour reproduire des formes. Elle est flexible et adaptée aux séries de toutes tailles, permettant l'usinage de surfaces de révolution de forme quelconque (figure 4) [7].

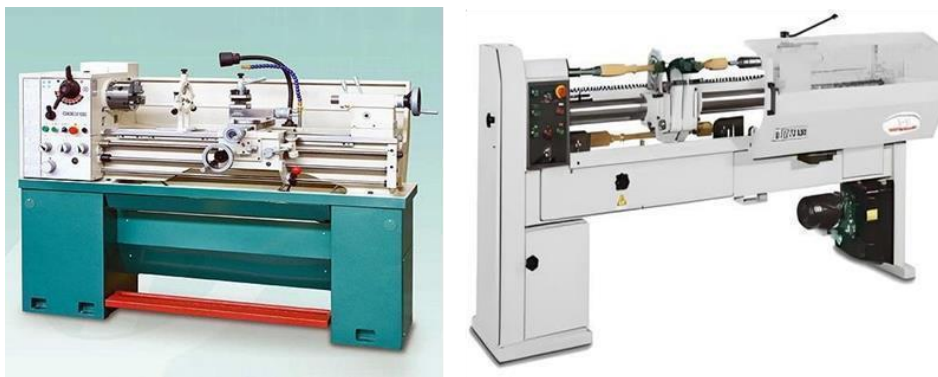


Figure I.4: Tour parallèle à charioter, fileter et tour à copier

- **Tour semi-automatique** : Ces tours, dotés d'un trainard classique et d'une tourelle hexagonale à 6 outils, réalisent des opérations simples et précises. Leur commande peut être manuelle ou semi-automatique. Peu flexibles, ils sont adaptés aux séries moyennes (figure 5) [8].
- **Tour automatique** : Ces tours automatiques utilisent des cames pour contrôler les mouvements des outils montés tangentielllement à la pièce. Chaque came est conçue pour une opération précise, rendant la machine très rigide et idéale pour la production en très grande série (figure 5) [8].



Figure I.5: Tour semi-automatique et tour automatique

- **Tour automatique multibroches** : Ce tour à huit broches (exemple) permet à huit outils de travailler simultanément, chacun effectuant une opération spécifique. Les broches tournent par incréments pour enchaîner les étapes d'usinage. Idéal pour les grandes séries de petites pièces, il nécessite toutefois des réglages longs entre les séries (figure 6) [8].
- **Tour à commande numérique** : Ce type de tour utilise un programme pour contrôler deux axes simultanément, permettant l'usinage de formes complexes. Avec un magasin d'outils et un système de chargement, il offre une grande flexibilité, idéal pour les pièces unitaires ou les petites séries (figure 6) [7].



Figure I.6: Tour automatique multibroches et tour à commande numérique

I.2.4 Outils de tournage

Les outils de coupe sont constitués d'acier affûté, plus dur que le matériau à usiner. Ils comportent un corps et une zone active, avec une arête formée par la face de coupe et la face de dépouille. L'arête principale intervient dans l'enlèvement de matière, guidée par le mouvement d'avance (figure 7) [9].

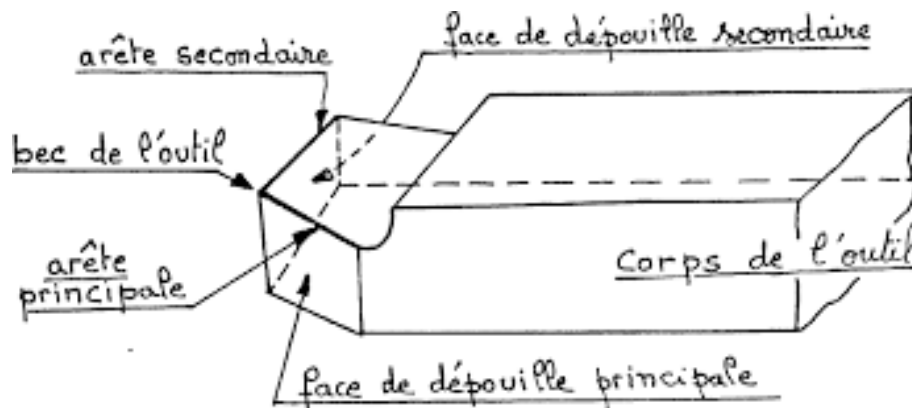


Figure I.7: Outil de coupe [9]

a) Le choix d'un outil de tournage

Le choix d'un outil de tournage dépend de la forme à usiner, en assurant la compatibilité entre la géométrie de la pièce (angles, distances) et celle de l'outil (forme de la plaquette, position de l'arête de coupe) [10].

Les outils de tournage extérieur servent à usiner les surfaces externes des pièces (figure 8). Les principales opérations et outils représentés sont :

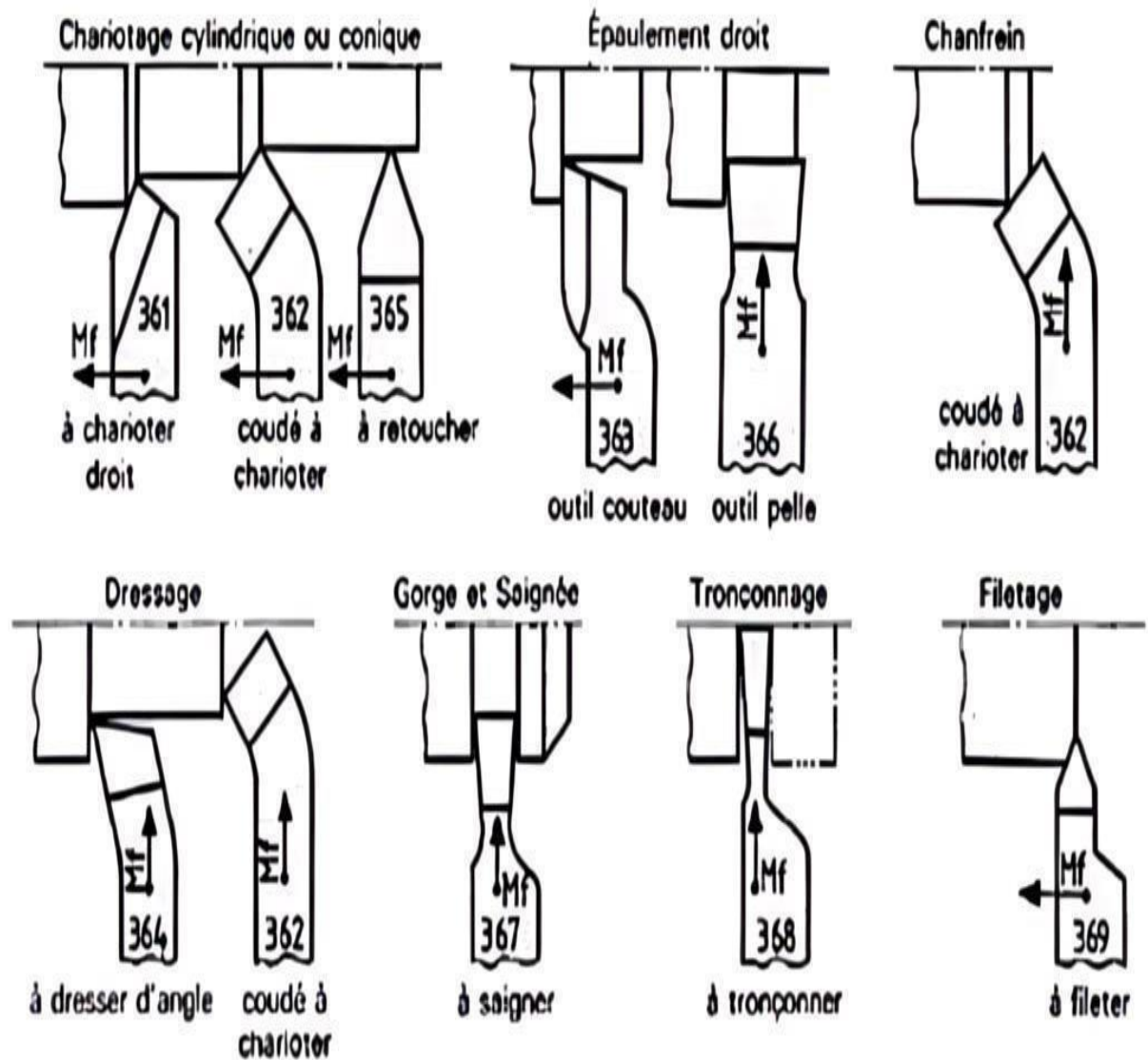


Figure I.8: Outils utilisés en tournage

Les outils de tournage intérieur sont utilisés pour travailler l'intérieur d'un alésage (figure 9).

Les opérations et outils associés sont :

b) Réglage des outils

L'outil est réglé en hauteur à l'aide d'une ou plusieurs cale(s), de plus, il doit être protégé par une cale (figure 9) [5].

- **Outil réglé correctement :**

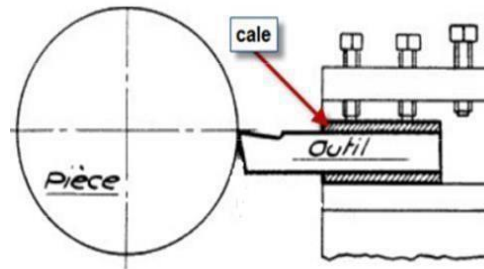


Figure I.9: Outil réglé correctement [5]

- **Outil mal réglé :**

Si l'outil est trop haut, il faut réduire et aligner les cales sur un même plan. S'il est trop bas, il faut ajouter des cales pour atteindre la hauteur correcte (Figure 10).

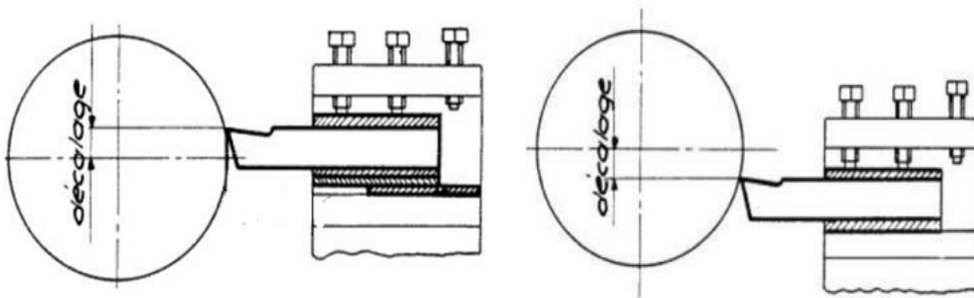


Figure I.10: Outil mal réglé [5]

c) Méthodes de fixation de la pièce sur la machine de tournage

Il existe trois principaux montages de la pièce à usiner sur le tour (figure 11) [11] :

- **Montage en l'air :** Le montage sur mandrin est utilisé pour les pièces courtes ($L < 4D$), avec une extrémité serrée dans le mandrin et l'autre libre.
- **Montage mixte :** Ce montage convient aux pièces moyennement longues ($4D < L < 8D$), avec une extrémité fixée dans le mandrin et l'autre soutenue par la poupée mobile.
- **Montage entre-pointes :** Les pièces très longues ($L > 8D$) sont usinées entre pointes, avec un appui aux deux extrémités et une lunette pour assurer la stabilité.

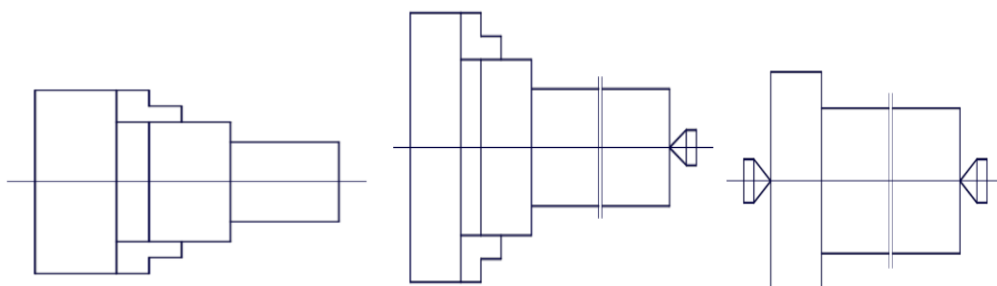


Figure I.11: Types de montage [11]:

a) Montage en l'air,

b) Montage mixte,

c) Montage entre- pointe

I.2.5 Types de matériaux d'outils

Le choix du matériau de l'outil influence la qualité et la durabilité de l'usinage. On utilise différents matériaux (HSS, carbure, céramique, diamant) en fonction de la vitesse de coupe, du matériau de la pièce et du type d'opération. Les principaux matériaux sont :

a) Aciers rapides :

Les outils en acier rapide (AR/ARS) sont faits d'aciers faiblement alliés durcis (figure 12). Composés de carbone (1,6 %), tungstène (12 à 20 %), molybdène (3,5 à 10 %), vanadium et cobalt, ils offrent une bonne dureté (60–70 HRC) jusqu'à 550 °C. Utilisés à faible vitesse (25–35 m/min) (pour les aciers) pour prévenir l'échauffement excessif et l'usure rapide de l'arête, ils conviennent à des outils spécifiques comme les forêts [12].



Figure I.12: Outils en acier rapide

b) Carbures métalliques :

Les outils en carbures métalliques, composés principalement de carbure de tungstène et de cobalt, résistent à des températures élevées (jusqu'à 1000 °C) et atteignent des vitesses de coupe élevées (jusqu'à 100 m/min). Avec une dureté de 80–90 HRC, ils offrent une longue durée de vie et sont souvent utilisés sous forme de plaquettes, brasées ou amovibles la seconde permettant plusieurs faces de coupe (figure 13) [12].



Figure I.13: Outils en carbure métallique

c) Céramiques

Les outils en céramique, faits d'alumine Al_2O_3 , de nitrure de silicium Si_3N_4 ou d'oxyde de chrome Cr_2O_3 , sont adaptés à l'usinage continu. Ils supportent des vitesses de coupe élevées (jusqu'à 500 m/min) et résistent à des températures jusqu'à 1200 °C, offrant une bonne qualité de surface, mais sont fragiles et peu adaptés à la coupe discontinue (figure 14) [19].



Figure I.14: Outils en céramique

d) Diamants

Le diamant, utilisé dans les meules abrasives et outils de finition, est idéal pour l'usinage des alliages légers (aluminium, cuivre, magnésium) et des résines. Il ne supporte pas les hautes températures, se transformant en graphite dès 650 °C (figure 15) [14].

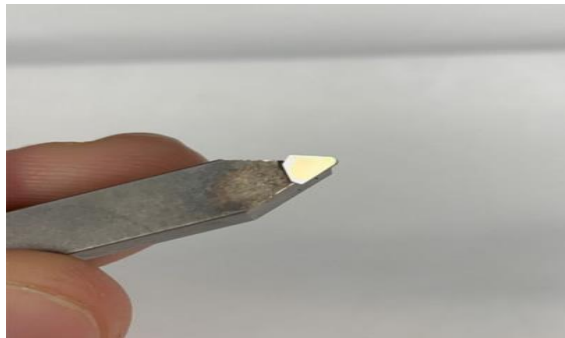


Figure I.15: Outil en diamant

- **Les plaquettes d'outils**

Les outils les plus répandus sont constitués d'une plaquette amovible montée sur un corps d'outil (Figure 16).

Les plaquettes de coupe existent en diverses formes (carrée, ronde, triangulaire, etc.). Le choix dépend des surfaces à usiner et du cycle de travail. On privilégie la forme la plus résistante mécaniquement, ou, à défaut, la plus économique, comme la plaquette carrée avec plusieurs arêtes utilisables.

La forme de la plaquette détermine les angles β , ϵ_r et le rayon de bec r_ϵ . Pour améliorer

sa résistance, ces paramètres doivent être les plus grands possibles [15].

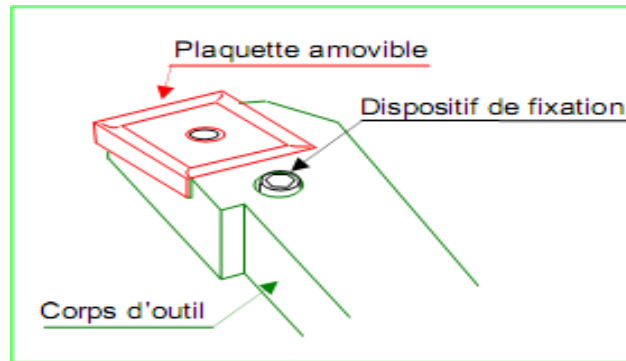
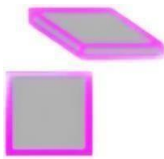


Figure I.16: Outil à plaquette

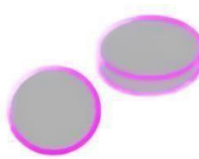
• **Les formes de plaquettes :**



Plaquette carrée

4 arêtes utilisables

$\epsilon_r = 90^\circ$



Plaquette ronde

n arêtes utilisables par rotation

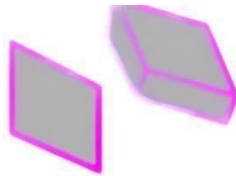


Plaquette rhomboïdale

2 arêtes utilisables

$\epsilon_r = 85^\circ, 82^\circ$ ou 55°

(La forme : un parallélogramme)



Plaquette rhombique

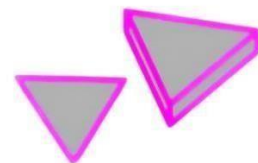
2 arêtes utilisables

$\epsilon_r = 86^\circ, 80^\circ, 75^\circ, 55^\circ, \epsilon_r = 90^\circ$
ou 35°



Plaquette rectangulaire

2 arêtes utilisables



Plaquette triangulaire

3 arêtes utilisables

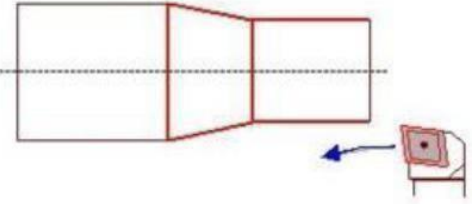
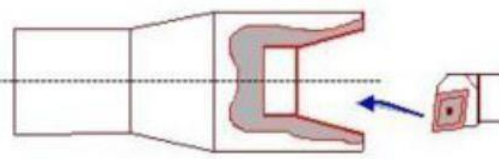
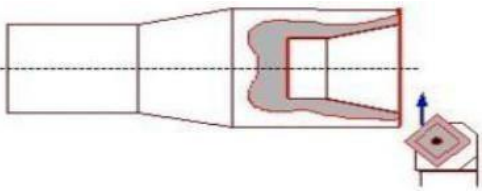
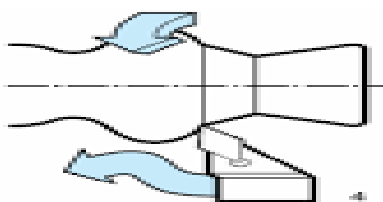
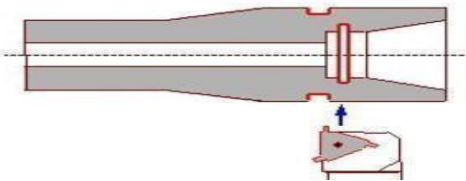
$\epsilon_r = 60^\circ$ (La forme losagne)

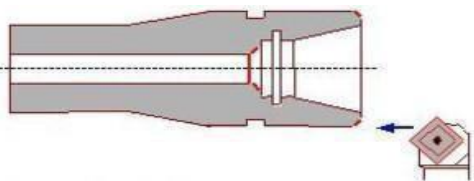
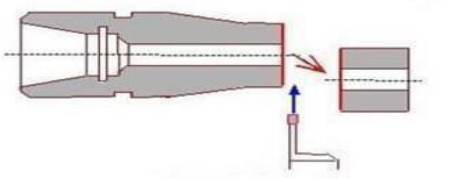
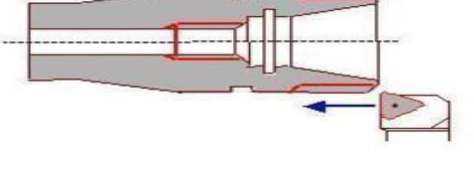
Le changement de l'arête de coupe est nécessaire lorsque l'usure affecte la précision ou la qualité de la pièce usinée. Le choix de l'outil dépend de plusieurs facteurs : la nature et la forme de la pièce, ses exigences dimensionnelles, les conditions de coupe, ainsi que la machine utilisée et la stabilité du montage. Il faut aussi considérer le type et la taille de la plaquette, son système de fixation, le rayon de bec, et le matériau de l'outil, afin d'optimiser les performances selon l'usinage à réaliser [16].

I.2.6 Opérations de tournage

Le tournage enlève de la matière pour créer des pièces rondes à l'aide d'un outil tranchant. Il comprend le tournage extérieur (chariotage, tronçonnage) et intérieur (alésage, filetage), garantissant précision et qualité (Tableau 1).

Tableau I.1: Opérations extérieures et intérieures de tournage [8]

Opération	Description	Schéma
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.	
Alésage	Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure. Le mouvement d'avance est similaire à celui en chariotage.	
Dressage	Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure, ce qui diminue la longueur.	
Contournage	En donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque, on peut usiner des formes de révolution variées et complexes.	
Gorgeage	Opération qui consiste à usiner une gorge intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlip ou d'un joint torique par exemple.	

Chanfreinage	Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.	
Tronçonnage	Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.	
Filetage	Opération où l'avance et la rotation se combinent pour créer un filet intérieur ou extérieur sur la pièce.	

I.2.7 Modes de travail

Il existe deux principaux modes de travail en usinage (figure 17) [17] :

a. Travail de forme : La génératrice est l'arête tranchante de l'outil. En usinage, la surface dépend de l'arête.

b. Travail d'enveloppe : La génératrice est l'ensemble des positions du point générateur de l'outil. En travail d'enveloppe, la surface usinée est indépendante de la forme de l'arête de l'outil.

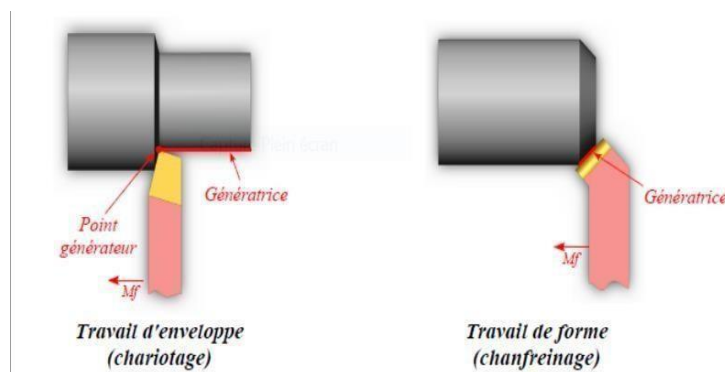


Figure I.17: Travail d'enveloppe et travail de forme [17]

I.2.8 Paramètres liés au tournage

a) Paramètres de coupe

Pour un usinage optimal, il faut bien régler les paramètres de coupe selon la machine, sa puissance, le matériau, l'outil utilisé et le type d'opération. Un bon réglage garantit efficacité

et précision (Figure 18).

- **Vitesse de coupe**

La pièce tourne à une vitesse angulaire ω , transmise par la broche [18].

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad [18] \quad 1$$

- V_c en (m/min), D en (m) et N en (tr/min).

On définit la vitesse de rotation (N) [tr/min] : C'est le nombre de tours par minute effectués par la pièce lors du mouvement de coupe [18].

$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad 2$$

- **Vitesse d'avance V_f et avance par tour f**

La vitesse d'avance (mm/min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti.

L'avance f (mm/ tr) est le déplacement de l'outil par rapport à la pièce. Elle influence l'épaisseur des copeaux et la qualité de surface [18].

$$V_f = f \times N \quad [18] \quad 3$$

- **Profondeur de passe a**

En chariotage, la profondeur de passe est la moitié de la différence entre les diamètres brut et usiné [18], représentant l'engagement de l'outil dans la matière [7].

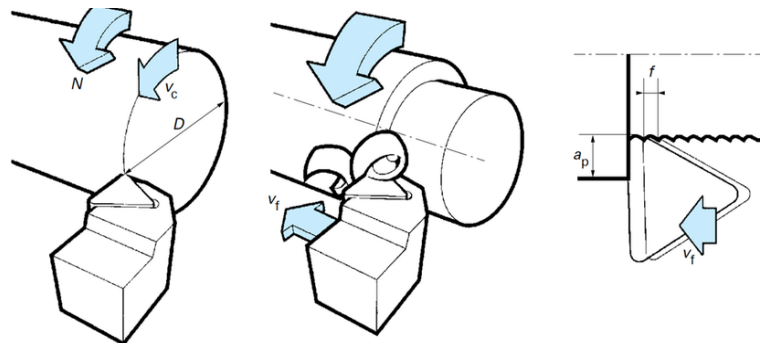


Figure I.18: Paramètres de coupe

b) Paramètres techno-économiques d'usinage

Les paramètres techno-économiques servent à estimer le temps, le coût et la rentabilité d'une opération d'usinage [19].

- **Longueur totale de déplacement de l'outil (figure 19)**

$$L = lu + e \quad [19] \quad 4$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce est :

$$T_m = L/V_f [19] \quad 5$$

lu : Longueur usinée, **e**: Distance de sécurité **V_f** : Vitesse d'avance.

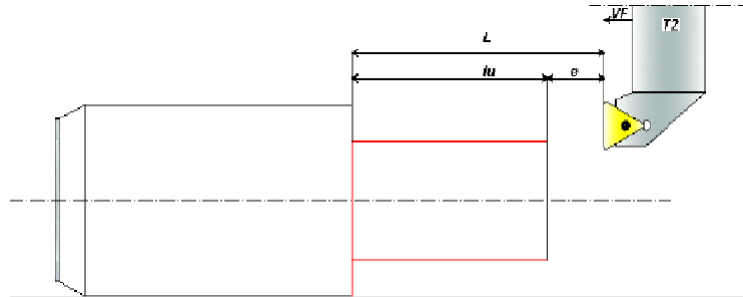


Figure I.19: Schéma illustrant la longueur totale de déplacement de l'outil en tournage [19]

- **Coût d'usinage**

Le coût de l'usinage comprend : le coût d'usinage comprend le coût machine, le coût de montage réparti sur la série, et le coût lié à l'usure des outils (plaquettes, réglages, arrêts).

Lorsque la vitesse de coupe augmente, le temps d'usinage baisse, réduisant le coût machine, mais l'outil s'use plus vite, augmentant le coût d'outillage par pièce [20].

- **Durée de vie d'un outil de coupe**

Elle correspond au temps de coupe efficace avant dégradation. Elle varie selon les conditions de coupe, les matériaux, la géométrie et la lubrification [19], et peut être estimée par la loi de Taylor :

$$T = C_v \cdot V_c^n [19] \quad 6$$

T est la durée de vie de l'outil (min), **V_c** est la vitesse de coupe (m/min),

n est un coefficient de Taylor dépendant des matériaux et du type d'usinage ($-12 < n < -1$),

C_v est une constante de Taylor : $10^+ < C_v < 10^{14}$ déterminée expérimentalement pour un couple outil/pièce donné.

- c) **Efforts de coupe en tournage**

Lors du tournage, l'effort de coupe exercé sur l'outil par la pièce se décompose en trois composantes [21] :

- **Composantes des efforts de coupe en tournage :**

- **F_c** : effort tangentiel de coupe, dû au mouvement de coupe ;
- **F_t** : effort tangentiel d'avancement, dû au mouvement d'avance ;

➤ **Fa** : effort de poussée, dû à la profondeur de passe.

La plus importante composante est l'effort tangentiel de coupe (figure 20), donné par la relation :

$$F_c = K \times a \times f [21] \quad 7$$

Avec :

- **Kc** [daN/mm²] est la pression spécifique de la coupe, ce paramètre dépend de l'épaisseur de copeau *h* et du matériau de la pièce.
- *a* est la valeur de la profondeur de passe (en mm).
- *f* est la valeur de l'avance (en mm/tr).

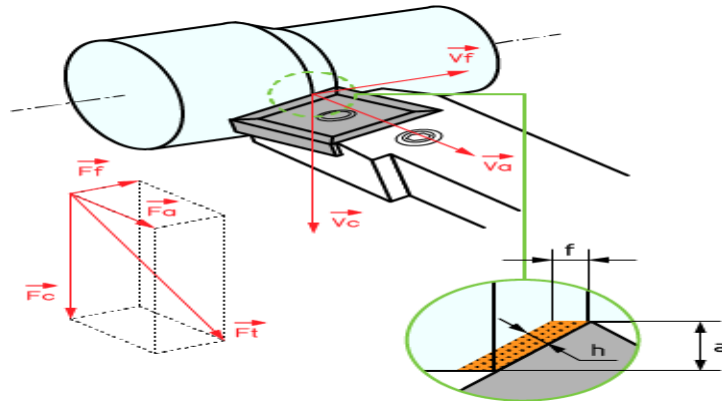


Figure I.20: Visualisation des efforts F_c , F_t et F_a , et des paramètres d'usinage [21]

• Puissance de coupe

En chariotage, la puissance P_c [watts] est égale au produit de la force **Fc** [newtons] par la vitesse V_c [m/s], comme l'exprime l'expression suivante :

$$P_c = F_c \times V_c [21] \quad 8$$

d) Régimes de coupe

Les régimes de coupe en usinage varient selon l'objectif visé. On distingue principalement deux types :

• Ebauche

L'ébauche vise à enlever rapidement un maximum de matière, sans se soucier de la qualité de surface, en utilisant de grandes profondeurs de passe et avances élevées [22].

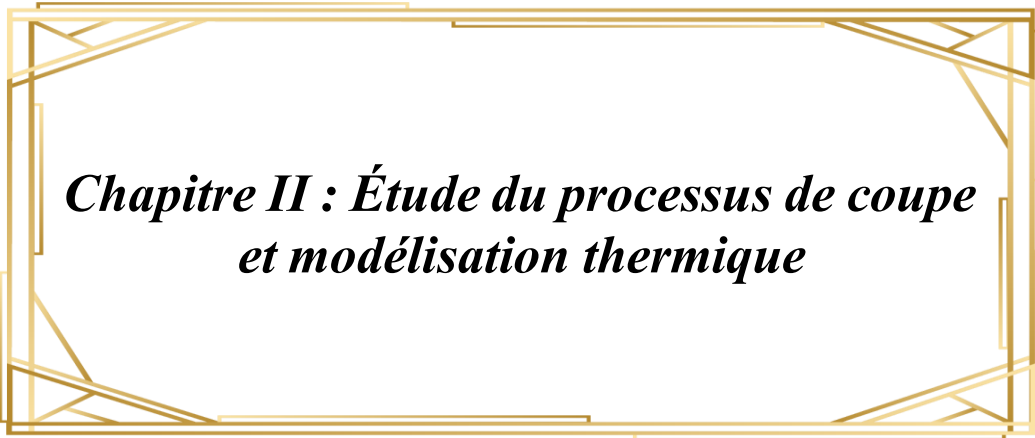
• Finition

La finition permet d'atteindre les côtes précises de la pièce avec un bon état de surface,

en utilisant de grandes vitesses de coupe et de faibles avances [22].

I.3 Conclusion

Cette première partie a examiné les points clés pour passer à la modélisation des procédés d'usinage. En somme, l'usinage est une méthode essentielle dans la fabrication mécanique. Ses procédés comme le fraisage, le perçage et le tournage transforment efficacement les matières brutes en pièces précises. L'évolution des machines, avec la commande numérique, améliore la performance et la productivité, faisant de l'usinage un pilier de l'industrie moderne.



Chapitre II : Étude du processus de coupe et modélisation thermique

II.1 Introduction

L'usinage est un procédé où l'outil enlève de la matière sous forme de copeaux, générant de la chaleur qui affecte la qualité de la pièce et la durée de vie de l'outil. Une bonne modélisation des mouvements et des forces est essentielle pour optimiser le processus. Ce travail s'intéresse aux paramètres de coupe et aux formes des copeaux.

II.2 Les phénomènes thermiques pendant la coupe

Deux processus différents participent à la libération de la chaleur :

- La déformation plastique :

La déformation plastique du métal lors de l'usinage modifie son état physique en provoquant un écrouissage, ce qui augmente son énergie interne. Une petite partie de cette énergie peut être récupérée lors de la recristallisation à haute température, mais la majeure partie est convertie en chaleur. Des recherches telles que Taylor, ont confirmé cette conclusion

- Le frottement à l'interface outil/copeau :

Le frottement entre l'outil et le copeau, ainsi qu'entre la pièce usinée et les faces en dépouille de l'outil, génère de la chaleur. Selon les études de Joule, toute l'énergie issue de ce frottement est transformée intégralement en chaleur [23].

II.3 Coupe orthogonale

La coupe orthogonale est une simplification courante en modélisation, car elle permet de ramener un problème 3D à une analyse 2D, grâce à la perpendicularité entre les vitesses de coupe et l'arête de coupe. Bien que peu utilisée en industrie, elle facilite la simulation et l'étude de la formation des copeaux, tant en modélisation qu'en expérimentation (figure 1) [24].

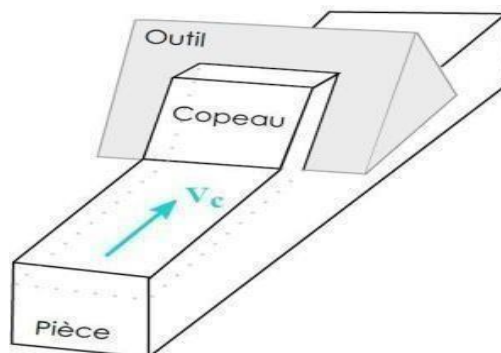


Figure II.1: Coupe orthogonale Mécanismes de formation du copeau [24]

II.3.1 Copeau

Le copeau est la matière détachée par l'outil lors de l'usinage, caractérisée par une forte

déformation et un échauffement. Il provient de la surépaisseur à enlever. Comprendre ce phénomène est essentiel pour optimiser outils et machines.

Sa formation passe par l'accumulation (étape 2) de matière, puis sa déformation (élastique et plastique) (étape 3) jusqu'à rupture (figure 2) [12].

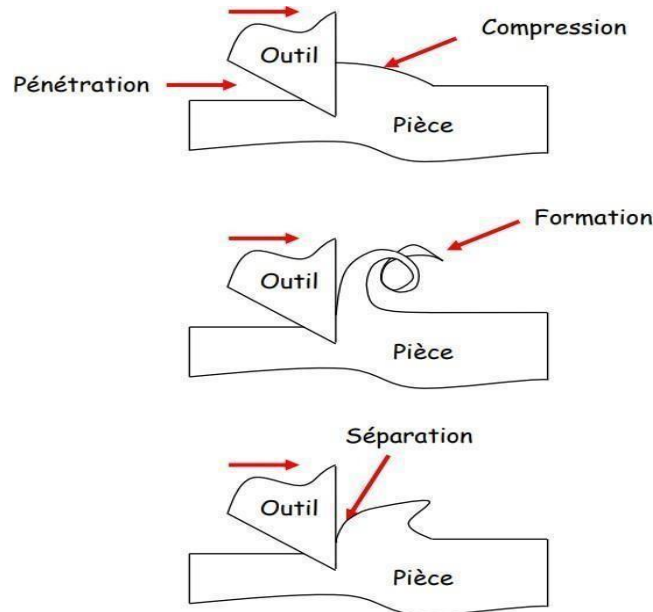


Figure II.2: Étapes de formation du copeau lors de l'usinage : pénétration, compression, formation et séparation [12]

II.4 Types de copeaux

La forme du copeau varie selon les propriétés du matériau usiné et le frottement entre l'outil et le copeau. On distingue plusieurs types de copeaux selon ces facteurs (figure 3).

II.4.1 Le copeau continu

En usinage rapide de l'acier, les copeaux se forment en longues bandes continues. L'augmentation de la vitesse de coupe accroît l'angle de cisaillement, ce qui intensifie la déformation plastique près du bord de coupe à cause du frottement [27].

II.4.2 Le copeau discontinu

Ce type de copeau, typique des métaux durs et peu ductiles à basse vitesse, est formé d'éléments séparés et faiblement liés. L'outil provoque d'abord des déformations élastiques, puis plastiques, jusqu'à ce que la contrainte atteigne la rupture, entraînant le cisaillement du matériau [27].

II.4.3 Le copeau fragmenté

Ce copeau se forme lors de l'usinage de matériaux fragiles comme la fonte ou le bronze dur. Il est composé de fragments isolés, peu liés entre eux, et se détache par fissuration, laissant une surface rugueuse [27].

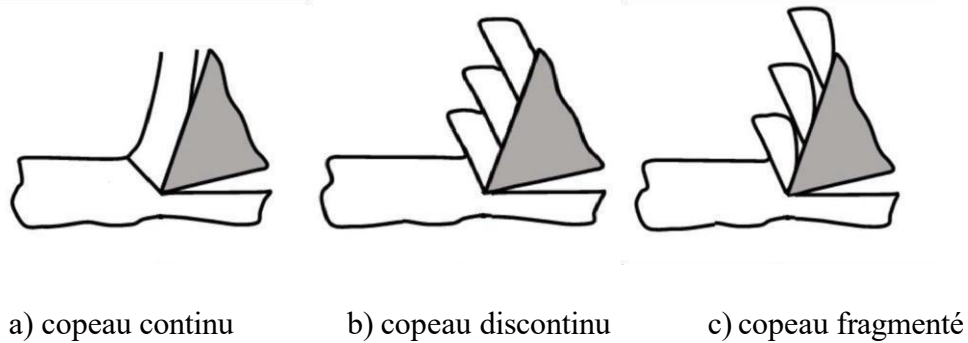


Figure II.3: Morphologie des copeaux : continu, discontinu et fragmenté [27]

D'autres types de copeaux (figure 4) :

1 : copeau ruban	2 : copeau tubulaire	3 : copeau en spirale	4 : copeau hélicoïdal en rondelle	5 : copeau hélicoïdal conique	6 : copeau élémentaire	7 : copeau aiguille	8 : copeau en arc
11 : Long	21 : Long	32 : plat	41 : Long	51 : Long	61 : Enchevêtré		
12 : Court	22 : Court	32 : Conique	42 : Court	52 : Court	62 : détaché		
13 : Enchevêtré	23 : Enchevêtré		43 : Enchevêtré	53 : Enchevêtré			

Figure II.4: Les différentes formes macrographiques de copeaux [27].

a) Formation du copeau

La formation du copeau résulte de l'interaction mécanique et thermique entre l'outil et la pièce. Elle se décompose en cinq zones distinctes (figure 5), chacune correspondant à un mécanisme spécifique (cisaillement, déformation, frottement, contact). Comprendre ces zones permet d'optimiser les paramètres de coupe et d'améliorer l'usinage [24].

Zone 1 ou zone cisaillement primaire (ZCP) : Est la zone essentielle de formation du copeau. C'est là que la matière subit un cisaillement intense, depuis la pointe de l'outil jusqu'à la surface

du copeau. Elle est souvent représentée par un plan incliné selon un angle ϕ .

Zone 2 ou zone de cisaillement secondaire (ZCS) : Est le lieu d'un frottement intense entre le copeau et l'outil de coupe. Ce frottement génère une **forte élévation de température**, entraînant des altérations des **propriétés mécaniques et physico-chimiques** de l'outil.

Zone 3 ou zone de cisaillement tertiaire (ZCT) : Dans cette zone, l'outil applique une force de compression, provoquant une séparation du métal à la pointe, formant des copeaux et la pièce usinée.

Zone 4 : Représente le **frottement entre l'outil et la surface usinée**, influençant directement l'**état de surface** de la pièce et l'**usure de l'outil**.

Zone 5 : Cette zone est caractérisée par des déformations plastiques et élastiques du matériau en amont de l'outil. Cela conduit à des contraintes résiduelles.

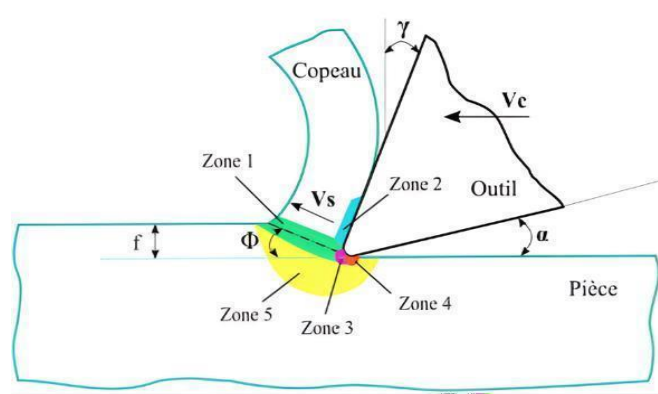


Figure II.5: Formation du copeau en coupe orthogonale

II.5 Lubrification

Lors de la coupe à haute vitesse, une chaleur importante est générée par le frottement. Les lubrifiants jouent un rôle crucial en réduisant l'usure, la friction et la température, tout en évacuant les débris. La pression du fluide de coupe doit être assez élevée pour évacuer les particules métalliques et atteindre la zone entre l'outil et le copeau.

Un fluide de coupe choisi influence l'usure de l'outil, la vitesse de coupe et la rugosité de la surface usinée.

Quelques types de lubrifiants en usinage :

- Les huiles minérales proviennent de la distillation du pétrole.
- Les huiles solubles mélangent huiles minérales, émulseurs et eau.
- Les fluides synthétiques pour travaux spéciaux.

II.6 Usinage à sec

La coupe à sec consiste à usiner sans fluide de coupe. Elle ne se limite pas à arrêter l'utilisation des fluides de coupe, mais vise à assurer une haute efficacité, qualité et fiabilité tout en réduisant leurs utilisations.

L'usinage à sec nécessite des outils adaptés et permet de réduire les coûts et l'impact environnemental.

II.7 Différence entre UGV et usinage conventionnel

En usinage conventionnel, la chaleur se dissipe dans les copeaux, la pièce et l'outil, ce qui modifie les caractéristiques de la pièce finie. En UGV, la pièce reste à température ambiante, et 80% de l'énergie de coupe s'écoule dans les copeaux.

La température du « point chaud » de l'outil varie de 500°C en usinage conventionnel à 1000°C en UGV, facilitant la coupe.

II.8 Les effets thermiques et les modèles numériques associés à la coupe des métaux

II.8.1 Effets de la Température de coupe

Lors de l'usinage, la chaleur se forme près de la pointe de l'outil. Son évacuation par les copeaux est essentielle pour préserver l'outil. Des copeaux mal dimensionnés (trop épais ou trop fins) nuisent à cet équilibre. La chaleur se propage par transport dans le copeau et la pièce, et par diffusion dans l'outil. La température dépend des matériaux et du revêtement de l'outil.

II.8.1.1 Sur l'outil de coupe

- L'usure rapide réduit sa durée de vie (figure 6).
- La déformation plastique survient si l'outil manque de dureté.
- Des chocs thermiques peuvent provoquer l'écaillage.
- La formation d'arêtes rapportées résulte de la fusion de la matière usinée sur l'arête de coupe.

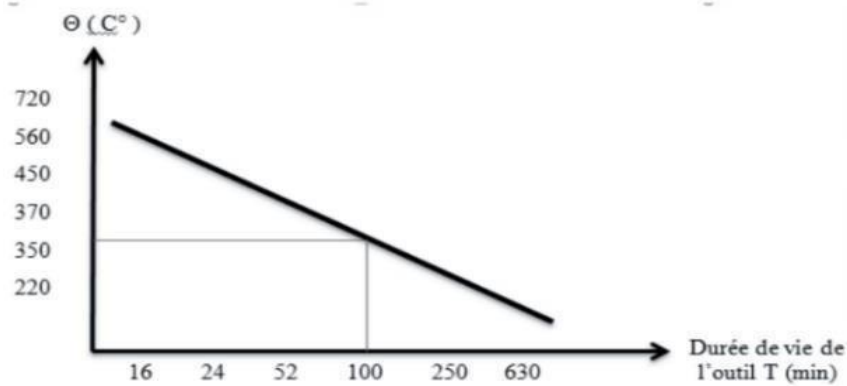


Figure II.6: Température de coupe / la durée de vie de l'outil

II.8.1.2 Sur la pièce

- Difficulté à contrôler les dimensions à cause de la chaleur (distorsion thermique) ;
- Changements de taille pendant et après le processus d'usinage ;
- Surface de mauvaise qualité (présence de microsoudures et de déchirures).

II.8.2 Détermination de la température de coupe

Il existe plusieurs techniques pour mesurer la température lors de l'usinage :

- Méthodes expérimentales.
- Méthodes analytiques.
- Méthodes numériques.

Outre le calorimètre, les peintures thermosensibles ne sont plus utilisées en raison de leur faible sensibilité, au profit de poudres à température de fusion constante [23].

Les méthodes pour évaluer la température de coupe incluent :

II.8.2.1 Mesure par thermocouple

La mesure de la température par un thermocouple repose sur le principe que si deux métaux sont soudés et que l'une des soudures est chauffée, une force électromotrice se crée. Cette force, liée aux matériaux, indique la température. Les thermocouples sont simples et économiques, avec des types variés, notamment standard et dynamique (figure 7) [23].

II.8.2.2 Mesure de la température par la méthode optique

Les thermocouples sont coûteux à installer et ne permettent pas de mesurer la température directement entre l'outil et le copeau. Pour cela, on utilise des méthodes sans

contact basées sur le rayonnement thermique, comme le pyromètre optique et les caméras infrarouges (figure 7). La thermographie infrarouge, notamment, détecte de faibles variations de température et produit des images appelées thermogrammes. Facile à utiliser, cette technique nécessite toutefois une bonne interprétation pour éviter les erreurs.



Figure II.7: Dispositifs de mesure de la température lors de l'usinage : thermocouple, pyromètre, et caméra infrarouge

II.8.2.3 Mesure par les méthodes analytiques

Plusieurs méthodes analytiques de N. Cook, basées sur l'analyse dimensionnelle, prédisent la température de coupe lors de l'usinage.

$$T = \frac{0.4u}{\rho c} \left(\frac{vt_0}{k} \right)^{0.333}$$

9

Où :

T = élévation de température à l'interface pièce-outil °C (F°),

U = énergie spécifique N-m/mm³ J/mm³, **V**= vitesse de coupe,

t₀ = épaisseur de la pièce avant la coupe en m,

ρC = chaleur spécifique volumétrique de la matière J/mm³, **K** = diffusivité thermique du matériau m² /s.

K. Trigger a déterminé la relation vitesse-température :

$$T = kV^m$$

10

Où :

T = température d'interface outil-pièce mesurée.

K et **m** varient selon les conditions de coupe (autres que **v**) et le matériau.

II.9 Formulation des modèles

Trois formulations principales en simulation de coupe. Ce sont :

II.9.1 Approche Lagrangienne

La formulation Lagrangienne, utilisée en mécanique des solides, suit les points de matière pendant l'usinage (figure 8). Elle permet de simuler la géométrie du copeau en lien avec les paramètres de coupe et la déformation plastique. Bien qu'elle pose des défis, comme la gestion des grandes déformations et la séparation du copeau, elle reste adaptée à la modélisation des coupes continues et discontinues.

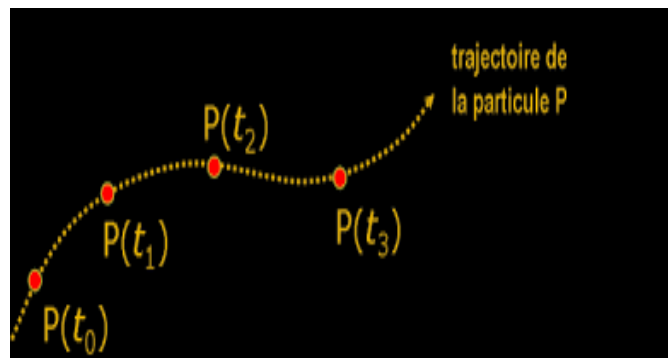


Figure II.8: Description de Lagrange (photo avec temps de pose infini)

II.9.2 Approche Eulérienne

La formulation Eulérienne, couramment utilisée en mécanique des fluides, repose sur un maillage fixe qui limite les distorsions et réduit le temps de calcul. Toutefois, elle suppose des limites fixes et des conditions constantes, ce qui ne reflète pas fidèlement le comportement réel du copeau lors de l'usinage des métaux (figure 9).

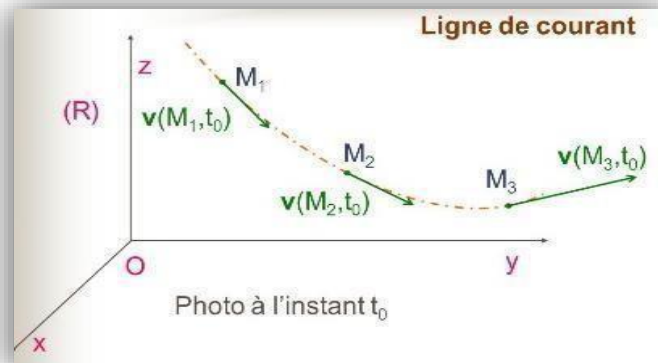


Figure II.9: Description d'Euler

II.9.3 Approche Eulérienne-Lagrangienne Arbitraire

L'approche Eulérienne-Lagrangienne Arbitraire combine les avantages des descriptions Eulérienne et Lagrangienne. Elle permet au maillage de se déplacer indépendamment du matériau, facilitant ainsi la simulation des grandes déformations avec une bonne qualité de maillage. Cette méthode flexible est bien adaptée aux processus comme l'usinage avec interfaces libres.

II.10 La méthode des éléments finis (MEF)

La Méthode des Éléments Finis (MEF) est une technique de simulation puissante qui permet de résoudre des problèmes complexes à moindre coût que les essais physiques. Elle transforme les équations aux dérivées partielles en équations algébriques, en utilisant des approximations des variables inconnues. Elle est utilisée dans de nombreux domaines comme la mécanique, la thermique, la dynamique des fluides, l'électromagnétisme, et permet de simuler des phénomènes tels que les contraintes, les températures, les vibrations ou les champs électriques [26].

II.10.1 Types de tests d'analyse par éléments finis

Voici les catégories de tests par éléments finis les plus fréquemment rencontrées [26] :

- **Analyse statique** : étudie les structures soumises à des charges constantes dans le temps.
- **Analyse dynamique** : prend en compte les effets liés au temps, aux accélérations ou aux fréquences.
- **Analyse modale** : permet de prévoir les vibrations des structures et leur impact sur les performances.

II.11 Le maillage

Le maillage décompose un objet en éléments finis, essentiel pour les simulations numériques utilisant la MEF. Les éléments finis sont des formes géométriques du maillage. Les nœuds sont les points d'intersection des forces appliquées.

La qualité du maillage influence la précision des simulations, la stabilité et le temps de calcul. Il existe des maillages structurés (quadrilatères (2D) ou des hexaèdres (3D)) et non structurés (triangles, des tétraèdres ou des pyramides).

Les fortes déformations lors de l'usinage déforment les mailles, causant des erreurs numériques. Le **maillage adaptatif** corrige ce problème en ajustant le maillage pendant la

simulation, soit en générant de nouvelles mailles, soit en raffinant localement les zones critiques, assurant ainsi précision et stabilité.

Le **maillage adaptatif** utilise deux méthodes principales comme illustré sur la (figure 10) [27]:

- Le **remaillage continu**, qui remplace les mailles déformées par de nouvelles pour maintenir la qualité du maillage.
- Le **raffinement local**, qui augmente la précision en densifiant les mailles dans les zones critiques, en réduisant la taille des éléments.

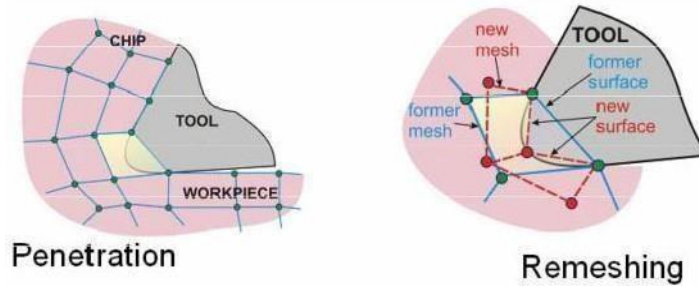


Figure II.10: Raffinement : (a) maille locale initiale, (b) réduction de la taille de l'élément

Une troisième méthode de maillage adaptatif repose sur le **lissage** (figure 11), qui consiste à repositionner les nœuds pour améliorer la qualité des éléments. Cette technique réduit les erreurs numériques et améliore la précision des simulations, en particulier dans les cas de **fortes déformations plastiques** comme lors de l'usinage ou de la mise en forme des métaux [27].

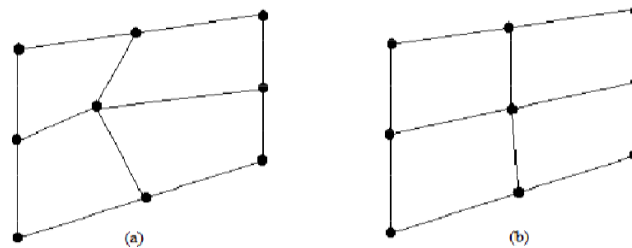


Figure II.11: Lissage : (a) maille locale initiale, (b) Réallocation des nœuds

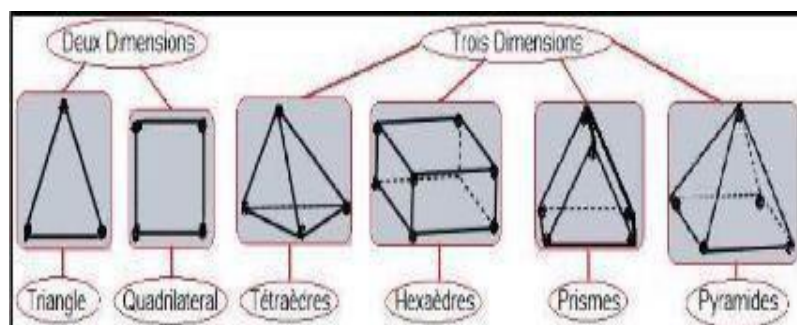


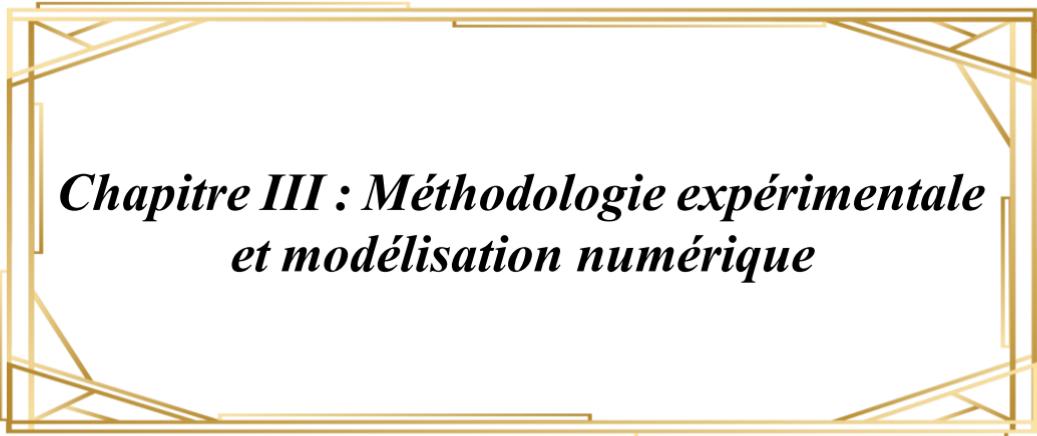
Figure II.12: Le maillage en simulation numérique

II.12 Conclusion

En conclusion, l'étude des mécanismes de coupe et de la formation des copeaux aide à comprendre les phénomènes thermiques et mécaniques de l'usinage. Le frottement et la déformation plastique libèrent de la chaleur, influençant la durée de vie de l'outil et la qualité de la pièce. Les types de copeaux – continus, discontinus, et fragmentés – dépendent de divers facteurs comme la vitesse de coupe et les propriétés du matériau. La coupe orthogonale est un modèle utile pour la simulation.

La lubrification est essentielle, surtout lors de coupes à grande vitesse, pour réduire l'usure des outils et contrôler les températures. Les avancées en simulation numérique, notamment les approches Lagrangienne, Eulérienne et ALE, combinées avec les méthodes de maillage adaptatif, permettent de prédire les comportements thermiques et mécaniques, et les techniques de mesure de la température aident à évaluer les conditions de coupe.

L'amélioration des matériaux et des technologies de simulation est cruciale pour optimiser l'usinage tout en maintenant des normes de qualité élevées.



***Chapitre III : Méthodologie expérimentale
et modélisation numérique***

III.1 Introduction

La modélisation numérique crée une représentation virtuelle d'un système réel, comme le processus de coupe des métaux.

La simulation permet de visualiser et d'analyser comment le copeau se forme, ce qui aide à comprendre le processus de coupe. Elle détermine comment la chaleur et les forces affectent l'outil, la pièce, et le copeau pour éviter les dommages. Elle étudie aussi les relations entre ces éléments, incluant le frottement et la température.

Différents scénarios peuvent être simulés pour améliorer les paramètres de coupe.

Dans ce chapitre, nous allons créer un modèle et simuler la génération de copeaux en 3D d'une opération de chariotage lors d'un procédé de tournage à sec de l'acier XC48, utilisant les lois de comportement et d'endommagement de Johnson-Cook. L'une des méthodes les plus courantes est la méthode des éléments finis, qui résout les problèmes couplés sans expérimentation.

Nous allons utiliser la version directe du programme ANSYS pour simuler la distribution de la température à l'interface outil/copeau, car la température due au frottement entre l'outil et la pièce affecte la durée de vie de l'outil.

III.2 Etude expérimentale

III.2.1 Equipements utilisés

Il existe plusieurs techniques pour mesurer la température lors de l'usinage, déjà abordées au second chapitre.

Dans notre cas, nous avons intégré une caméra infrarouge au dispositif d'essai afin de mesurer la température au point de contact entre l'outil et la pièce.

L'usinage de notre pièce a été effectué sur un tour central de la marque WMW Mikromat, modèle DZFG 200x500, d'une puissance de 5,5 KW, plage de tours par minute : 36...1800, plage d'avance sur l'axe x 0,02...0,8 mm/tr (figure 1).



Figure III.1: Tour utilisé

III.2.1.1 Matière usinée

Le matériau choisi est un acier de classe XC48 selon la norme AFNOR, également connu sous le nom d'AISI 1045 selon la norme AISI. Il est destiné à la création de composants mécaniques, de bases de matrices et de rails de roulement. Cet alliage a une dureté de 180 HB.

Les échantillons employés sont des cylindres pleins mesurant 75 mm de long et 30 mm de diamètre (figure 2), fixés sur la machine avec un montage en l'air.



Figure III.2: Échantillon brut

- **Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé)**

Résistance maximale (R_m) : 560 /620 (N /mm).

Résistance élastique (R_e) : 275/340 (N/mm).

La prochaine illustration montre le concept et le processus de mesure de la température de

contact pendant une opération de chariotage de l'acier XC48 avec une caméra infrarouge de la marque « UNI-T THERMAL IMAGER UTi120T IP54 » (figure 3).

Les spécificités de la caméra sont les suivantes :

- Champ de vision / la distance de focus min 68 degrés x 52 degrés/ Focus free
- La résolution spatiale (IFOV) 7,6 mrad
- Sensibilité thermique ≤ 60 mK
- Capture automatique de haute/basse température
- Modes de mesure Point, surface
- Gamme spectrale de 7,5 à 14 μm
- Plage de température (-20°C~400°C)
- Précision (% de la lecture) $\pm 2^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$, selon la valeur la plus élevée
- LOGICIEL : PC UTi120T (.exe)



Figure III.3: UTi120T, Caméra thermique de poche

III.2.1.2 ANSYS explicite

Le logiciel ANSYS 2021 R2 est utilisé pour modéliser la réaction du mécanisme de contact avec frottement entre la pièce et l'outil durant le tournage par chariotage. Ce programme comprend des algorithmes pour gérer le contact avec frottement, basés sur la méthode des multiplicateurs de Lagrange.

L'usinage entraîne de fortes déformations dans de petits espaces. La zone de formation du copeau subit des vitesses et températures élevées. C'est pourquoi une simulation explicite a été choisie pour notre modèle.

Tout d'abord, on doit sélectionner le matériau dans la bibliothèque du logiciel, en détaillant les caractéristiques mécaniques et physiques de chaque pièce.

Deuxièmement, il faut choisir le type de maillage avec des mailles fines pour plus de précision. Ensuite, établir les conditions aux limites et les forces appliquées.

La dernière étape est d'obtenir les résultats, le logiciel fournit des solutions schématiques.

III.2.2 Lois de comportement

Le choix de la règle de comportement appropriée est essentiel pour créer un modèle numérique. Pour représenter le comportement mécanique et thermomécanique de la pièce en acier XC48 lors de la coupe orthogonale en 3D, la loi de Johnson Cook [28] a été retenue.

III.2.3 Comportement mécanique de la pièce

Un modèle 3D de section orthogonale ondé sur une approche Lagrangienne a été utilisé pour une étude thermomécanique dans ANSYS/Explicit. Le système inclut dans ce cas un élément flexible et un outil rigide.

Le comportement du matériau usiné suit la loi Johnson-Cook :

$$\sigma_v = [A + B(\bar{\epsilon})^n] [1 + C \ln(\frac{\bar{\dot{\epsilon}}}{\bar{\dot{\epsilon}}_0})] [1 - (\frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0})^m] \quad 11$$

σ : Contrainte équivalente qui représente la limite d'écoulement plastique (Pa),

$\bar{\epsilon}$: Déformation plastique équivalente,

$\bar{\dot{\epsilon}}$: Vitesse de déformation plastique (s^{-1}),

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

T : Température locale,

T_{amb} : Température ambiante ou de référence (K) ($^{\circ}C$),

T_0 : température de fusion (K) ($^{\circ}C$),

A : représente la contrainte d'écoulement à déformation plastique nulle, tandis que B et n désignent respectivement les coefficients linéaires et non linéaires liés à l'écrouissage,

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

m : Paramètre définissant la dépendance à la température.

Cette loi d'écoulement a trois termes : écrouissage, dynamique, adoucissement.

Le mot associé à l'écrouissage est la contrainte d'écoulement à vitesse de déformation et température constantes.

III.2.4 Critère d'endommagement de Johnson-Cook

La loi d'endommagement de Johnson et Cook [29] est employée comme référence pour la rupture ductile. Elle souligne trois éléments similaires :

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

$$\bar{\epsilon}_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma})] [1 + D_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}] [1 + D_5 (\frac{T - T_0}{T_f - T_0})^m] \quad 12$$

$\bar{\epsilon}_f$: Déformation équivalente à rupture du matériau,

σ_m : Contrainte moyenne (Pa),

$\bar{\sigma}$: Contrainte équivalente de Von Mises (Pa),

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

III.3 Présentation générale du modèle de simulation de la coupe orthogonale

III.3.1 Le modèle 3D

Pour commencer l'étude, la création du modèle était sur **SolidWorks** (figure 4).

Un assemblage est une association de plusieurs éléments dans un document **SolidWorks** unique.

Les pièces sont placées et orientées grâce à des contraintes.

Les relations de contraintes ressemblent aux liaisons mécaniques. Si le mécanisme peut encore bouger, il peut être manipulé virtuellement, facilitant les ajustements avec divers outils comme déplacer des pièces, détecter des collisions ou mesurer des jeux.

Les pièces sont assemblées comme suit :

Ajouter des pièces dans un assemblage, changer la position et effectuer des rotations des pièces, placer et diriger les éléments en appliquant des contraintes qui lient les pièces entre elles.

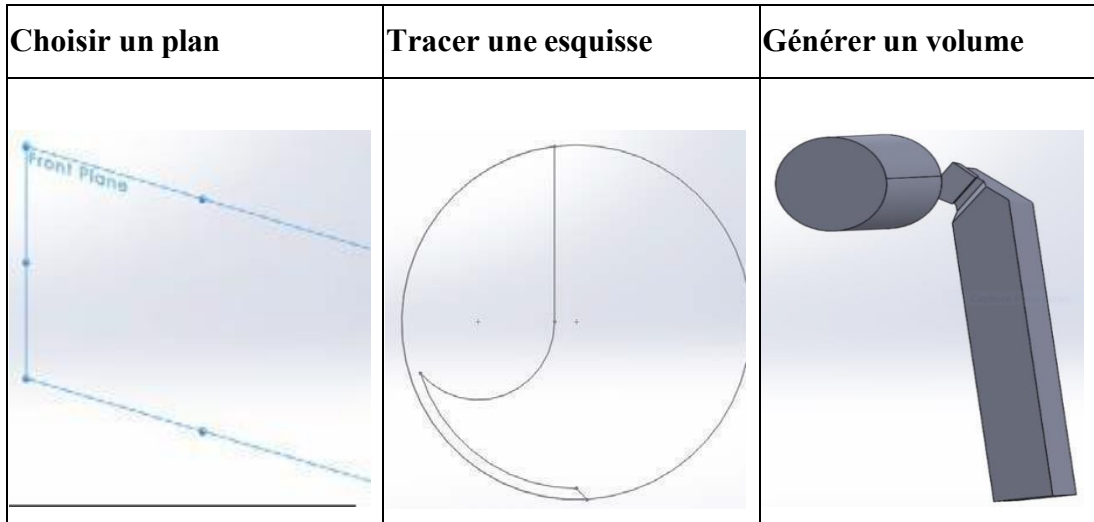


Figure III.4: Etapes pour l'obtention d'un volume sous SolidWorks

III.3.2 Modélisation de l'outil de coupe

L'analyse considère l'outil de coupe comme un corps rigide, capable de transmettre la chaleur, avec des caractéristiques géométriques de l'outil sont spécifiées.

III.3.3 Modélisation de la pièce à usiner

L'étude s'est focalisée sur un acier XC48, fourni en barre cylindrique (diamètre 30 mm x 75 mm).

Les tableaux 1 et 2 donnent respectivement les critères et les paramètres de la loi de Johnson Cook du matériau XC48 [30].

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

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

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

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

III.3.4 Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce et de l'outil

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

Tableau III.3: Les propriétés thermomécaniques de matériau et de l'outil [31]

Propriétés	XC48	Outil en acier rapide
Densité (kg/m ³)	7800	8160
Module de Young (GPa)	210	2x10 ⁹
Coefficient de Poisson	0.3	0.29000
Conductivité (W/mk)	47	19
Chaleur spécifique (J/kg k)	432	465
Coefficient de dilatation thermique (m/m°C)	11.9x10 ⁻⁶	12

III.3.5 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 chariotage du procédé de tournage. Les essais de coupe à sec ont été conduits selon plusieurs vitesses de coupe et avances.

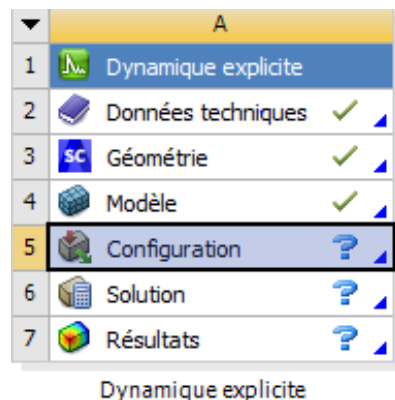
Concernant les conditions de coupe, nous avons considéré 3 cas :

- Le 1^{er} cas : $f = 0,4\text{mm/tr}$ et $V_c = 15\text{m/min}$
- Le 2^{ème} cas : $f = 0,8\text{mm/tr}$ et $V_c = 15\text{m/min}$
- Le 3^{ème} cas : $f = 0,4\text{m/tr}$ et $V_c = 30\text{m/min}$

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

III.4 Les étapes à suivre pour la modélisation

- Données techniques
- Géométrie
- Modèle
- Configuration
- Solution
- Résultats



III.4.1 Les données techniques

Toutes les données concernant les matériaux sont attribuées à ce niveau. La sélection se fait soit dans la bibliothèque du logiciel, soit par la création d'un matériau nouveau dans la bibliothèque.

III.4.2 Géométrie (modélisation de l'outil de coupe et de la pièce)

Notre travail consiste à développer numériquement les différentes étapes d'une opération de chariotage du procédé de tournage périphérique l'acier **XC48** avec un outil en acier rapide (figure 5). L'outil est parfaitement rigide, alors que la pièce est déformable. Les propriétés thermomécaniques de Johnson Cook de plasticité et d'endommagement sont introduites dans le tableau, le contact a des propriétés thermomécaniques, la température ambiante est égale à 20°C.

Le coefficient de frottement est de $\mu = 0,4$. Dans notre situation, nous avons opté pour la méthode de simulation Lagrangienne en raison des bénéfices qu'elle procure pour modéliser le comportement réel de l'usinage, comme la manière dont le copeau se forme et se courbe le long de la pièce.

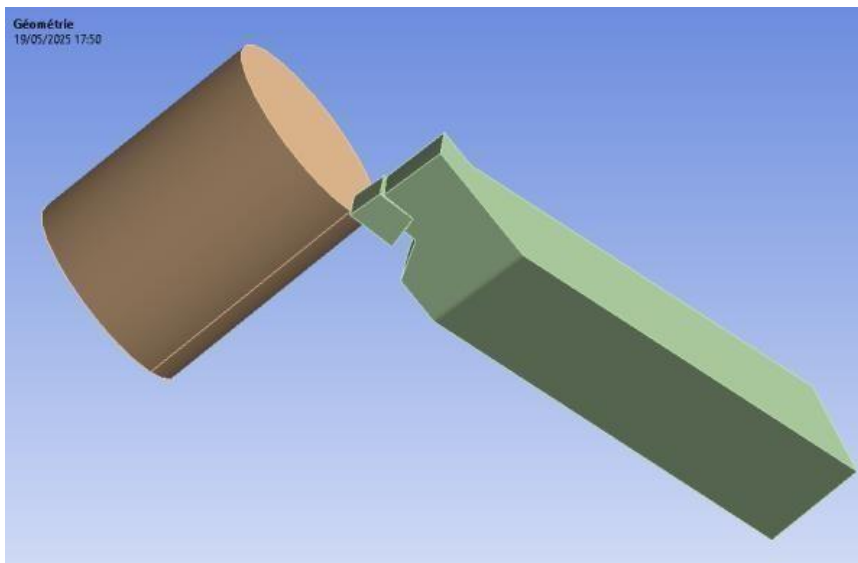


Figure III.5: Géométrie de modèle

III.4.3 Modèle

Plusieurs étapes sont engendrées :

- L'affectation des matériaux sur les géométries de modèle est effectuée dans cette étape.
- Pour la simulation, la pièce est en acier XC48 et l'outil est en acier rapide.

- Définition des systèmes de coordonnées globale et locale (figure 6).
- Définition des connexions : l'interaction de la pièce et de l'outil est définie en donnant les coefficients de frottement statique et dynamique.

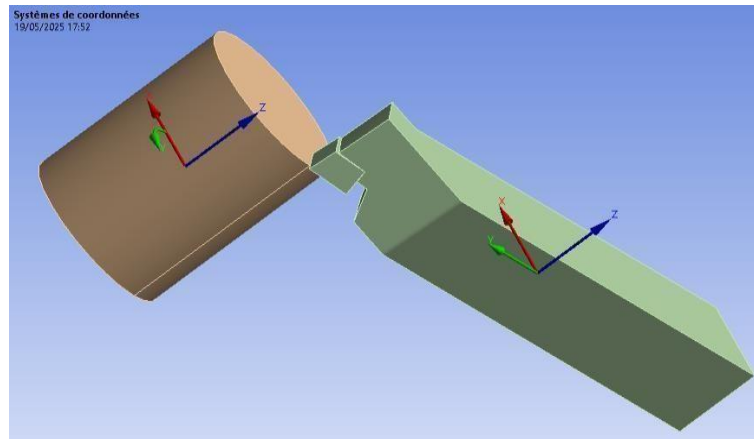


Figure III.6: Les systèmes de coordonnées

III.4.4 Gestion de contact

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 (figure 7).

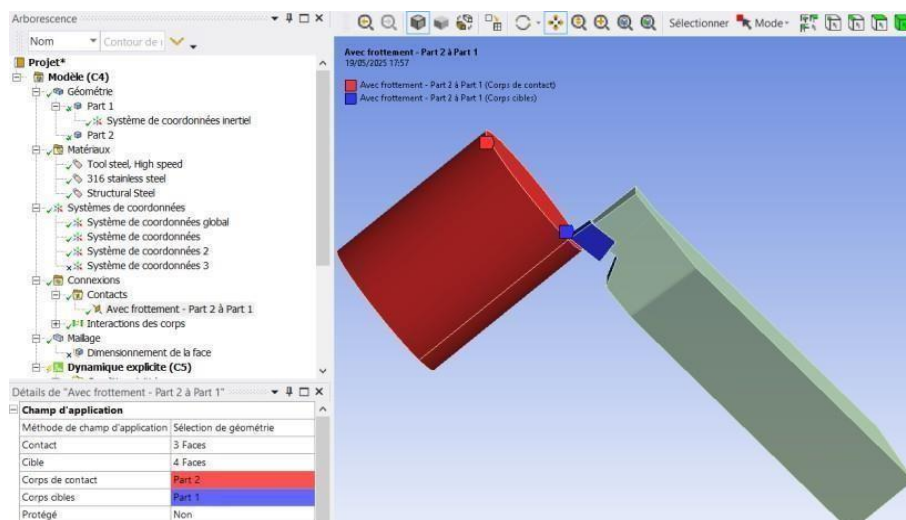


Figure III.7: Gestion de contact

III.4.5 Le maillage

Une fois la structure géométrique définie, l'étape suivante consiste à réaliser le maillage de l'ensemble outil/pièce (figure 8). Le modèle a été discrétisé à l'aide d'éléments volumétriques de type tétraédrique quadratique, générant un total de 17437 éléments et 11 902 nœuds. Un

couplage thermomécanique a été introduit afin de prendre en compte les interactions entre les phénomènes thermiques et mécaniques.

La distribution des mailles est uniforme sur l'ensemble de l'outil, ce qui convient bien à sa géométrie relativement régulière. Ce type de maillage permet d'assurer une bonne précision numérique tout en maintenant un temps de calcul raisonnable. En ce qui concerne la pièce, le maillage est également uniforme et adapté à sa forme, garantissant une représentation fiable du comportement thermique et mécanique pendant l'usinage.

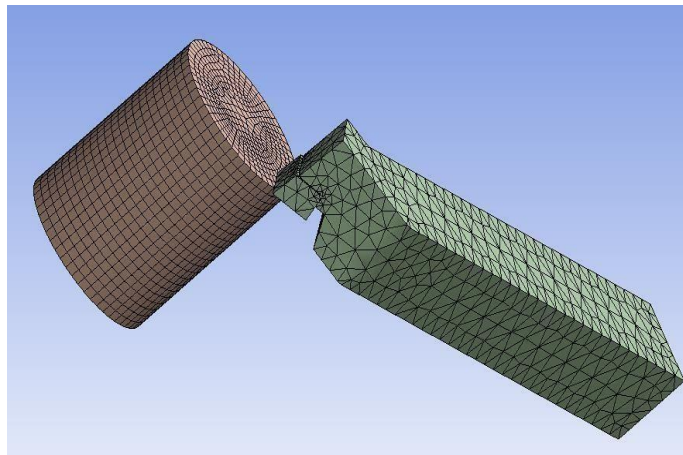


Figure III.8: Méthode appliquée pour le contact outil / pièce

III.4.6 Configuration

Dans cette étape on spécifie les conditions initiales :

- Vitesse angulaire de la broche (pièce)
- Vitesse d'avance pour l'outil
- Les déplacements (figure 9)
- Des réglages d'analyse : spécification de l'heure de fin

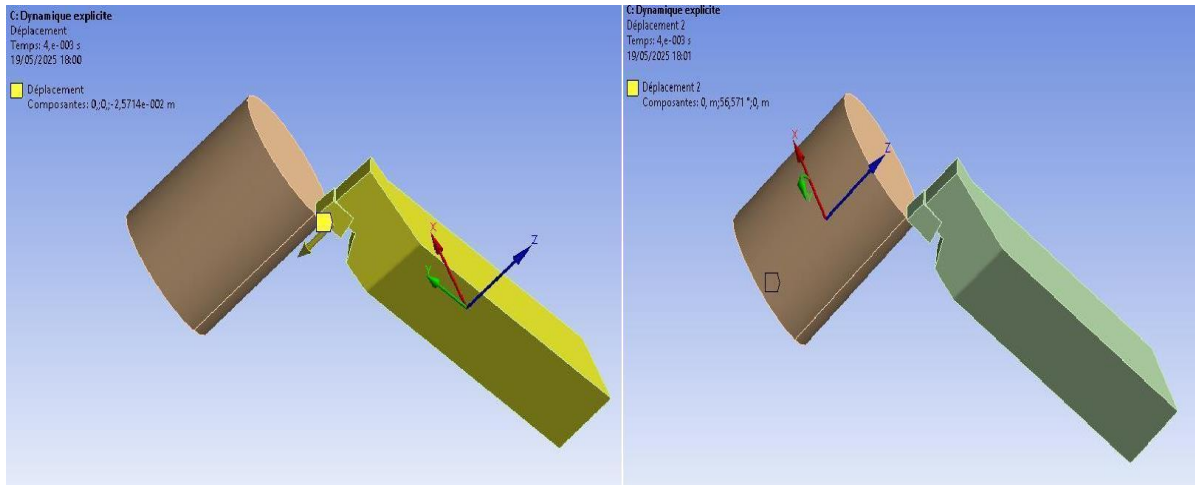


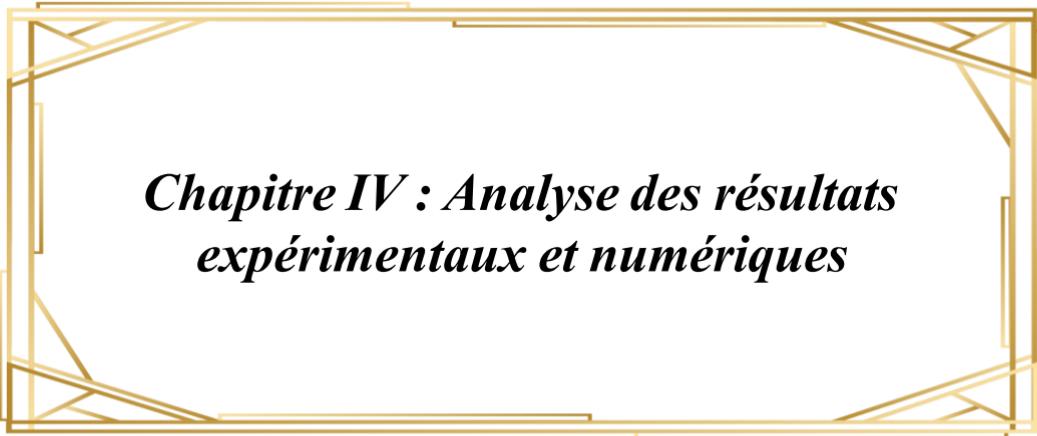
Figure III.9: Déplacements de l'outil et de la pièce

III.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les fondements expérimentaux et numériques de notre étude sur le tournage à sec de l'acier XC48. Nous avons tout d'abord présenté l'ensemble des équipements utilisés, notamment la caméra thermique infrarouge UTi120T, qui s'est révélée essentielle pour la mesure des températures en temps réel à l'interface outil/copeau. Ensuite, la description des matériaux, des conditions de coupe et du dispositif expérimental a fourni un cadre rigoureux à la collecte de données fiables.

D'un point de vue numérique, la modélisation sous ANSYS Explicit a permis de reproduire avec précision les conditions réelles d'usinage. Le choix de la méthode Lagrangienne, combiné à l'application des lois de comportement Johnson-Cook, a offert une modélisation robuste des phénomènes thermomécaniques et de la formation du copeau.

Ces méthodes, une fois croisées, constituent une base solide pour l'analyse comparative présentée dans le chapitre suivant. Elles permettent de mieux comprendre les phénomènes complexes en jeu lors de l'usinage à sec et préparent l'étude de l'impact des paramètres de coupe sur le comportement thermique du système outil-pièce.



***Chapitre IV : Analyse des résultats
expérimentaux et numériques***

IV.1 Introduction

L'étude de la température à l'interface outil/pièce/copeau revêt une importance cruciale dans le processus d'usinage, notamment pour l'analyse de l'usure de l'outil, la qualité de la pièce usinée et l'optimisation des conditions de coupe. Afin de mieux comprendre la distribution thermique dans cette zone fortement sollicitée, deux approches complémentaires ont été mises en œuvre : une modélisation numérique par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS Explicit Dynamics, et une validation expérimentale via une caméra infrarouge thermique.

La simulation numérique permet d'obtenir une visualisation détaillée de la distribution et de l'évolution temporelle de la température à l'interface outil/copeau, en tenant compte des paramètres de coupe, des propriétés thermomécaniques des matériaux, ainsi que des conditions de contact. De son côté, la caméra infrarouge offre une mesure non intrusive de la température en temps réel, permettant de capter les phénomènes thermiques réels se produisant lors du tournage de l'acier XC48.

La confrontation des résultats issus de ces deux méthodes offre une meilleure compréhension des mécanismes thermiques en jeu et permet d'évaluer la précision et la fiabilité du modèle numérique. La discussion qui suit analyse ainsi les profils de température observés pour différents cas de vitesses de coupe et avances, en mettant en évidence l'influence des paramètres de coupe sur la génération et la répartition de la chaleur, ainsi que la concordance entre les données simulées et expérimentales.

IV.2 Distribution de la température à l'interface outil/pièce/copeau :

Dans notre simulation numérique d'usinage 3D, nous parvenons à générer un copeau et à examiner comment la vitesse de coupe affecte le profil thermique à l'interface outil/copeau. Nous remarquons correctement la déformation de la matière qui engendre la formation d'un copeau.

Les répartitions de la température à l'interface outil-pièce-copeau sont illustrées dans notre modélisation pour les trois cas étudiés.

- 1er cas : $N=159.15\text{tr/min}$ $V_c = 15\text{m/min}$ $f=0,4\text{mm/tr}$

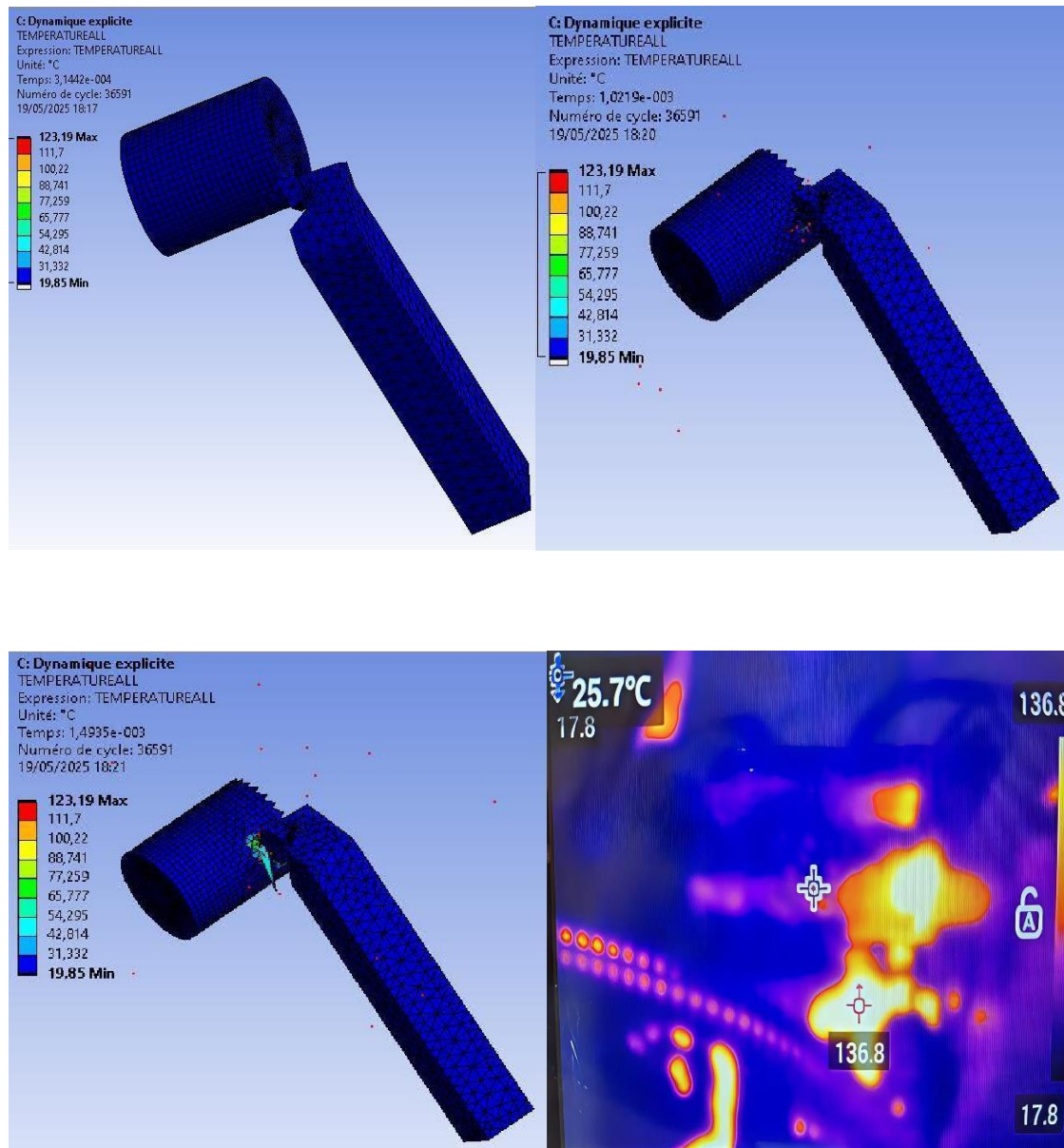


Figure IV.1: La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48
($V_c = 15\text{m/min}$ et $f=0,4\text{mm/tr}$)

- 2^{ème} cas: $N=159.15\text{tr/min}$ $V_c = 15\text{m/min}$ $f=0,8\text{mm/tr}$

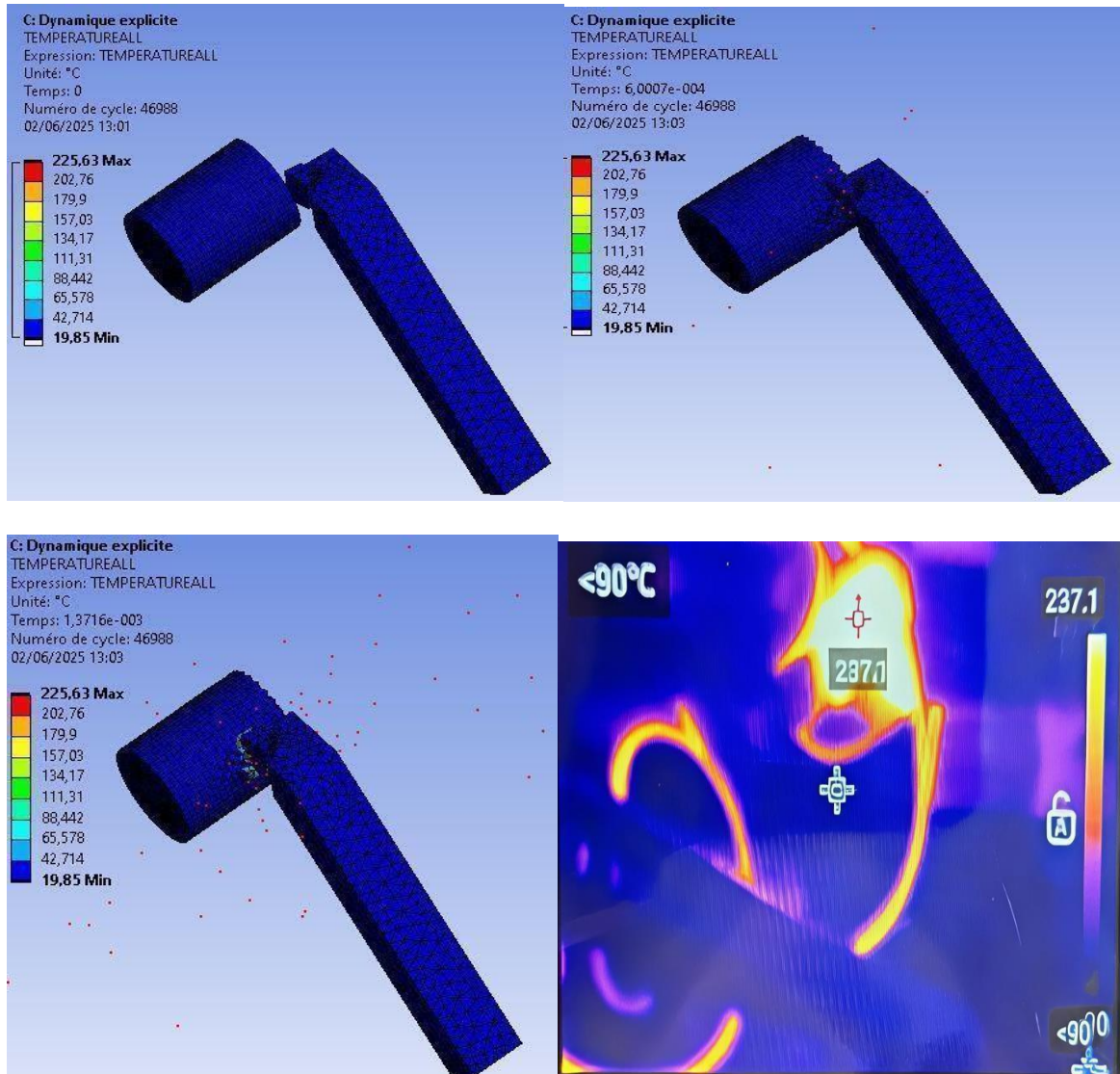


Figure IV.2: La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48

($V_c = 15\text{m/min}$ et $f=0,8\text{mm/tr}$)

- 3^{ème} cas: $N=318.30\text{tr/min}$ $V_c = 30\text{m/min}$ $f=0,4\text{mm/tr}$

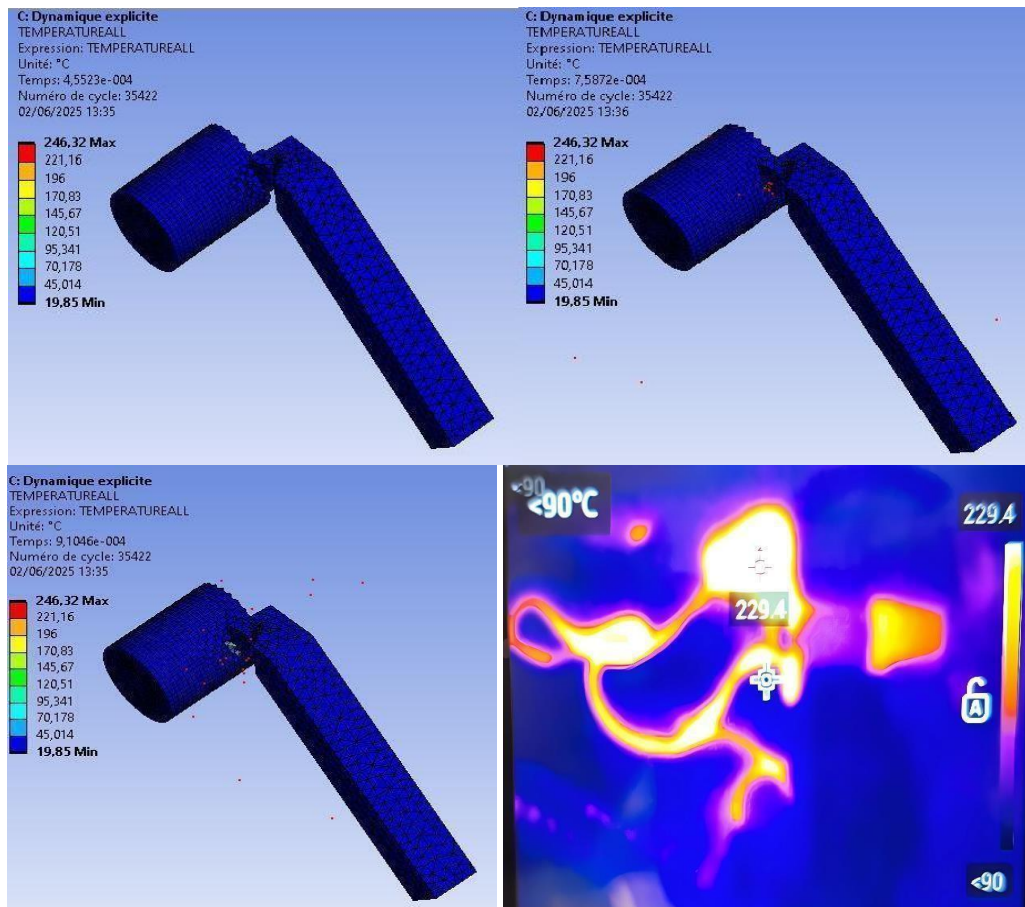


Figure IV.3: La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48
($V_c = 30\text{m/min}$ et $f=0,4\text{mm/tr}$)

IV.3 Distribution des contraintes équivalentes à l'interface outil/pièce/copeau :

Les distributions du champ de la contrainte équivalente de Von Mises sont présentées dans notre simulation pour un seul cas étudié.

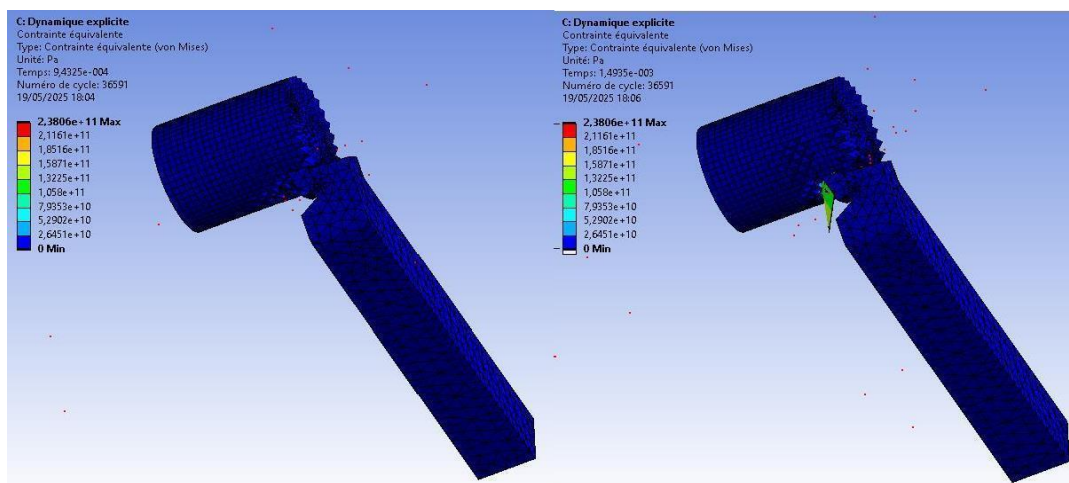


Figure IV.4: Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises

IV.4 Discussion des résultats et comparaison entre simulation et expérimentation

L'étude des températures maximales obtenues lors des trois essais permet de comparer les résultats issus de la simulation numérique sous ANSYS avec ceux mesurés expérimentalement à l'aide de la caméra infrarouge.

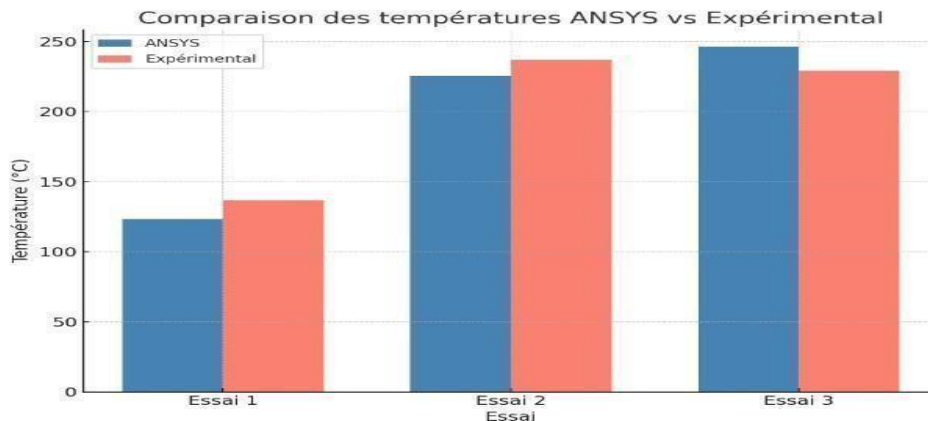


Figure IV.5 : Le graphique comparatif des températures obtenues par simulation (ANSYS) et expérimentalement pour les trois essais

Tableau IV.1: Conditions de Coupe, Températures et Écarts

Essai	N (tr/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Vc (m/min)	Température ANSYS (°C)	Température Expérimentale (°C)	Écart Absolu (°C)	Écart Relatif (%)
Essai 1	159.15	0.40	0.20	15.00	123.29	136.80	13.51	9.88%
Essai 2	159.15	0.80	0.20	15.00	225.63	237.10	11.47	4.84%
Essai 3	318.30	0.40	0.20	30.00	246.32	229.40	16.92	7.38%

Dans le premier essai (figure IV.1), avec une vitesse de coupe faible ($V_c = 15$ m/min) et une avance modérée ($f = 0,4$ mm/tr), la température maximale simulée est de $123,29$ °C, tandis que la température expérimentale atteint $136,8$ °C.

Dans le second essai (figure IV.2), seule l'avance est augmentée à $f = 0,8$ mm/tr, la vitesse de coupe restant constante. Cette augmentation engendre une hausse significative de la température, atteignant $225,63$ °C en simulation et $237,1$ °C en mesure expérimentale.

Dans les deux premiers essais, la simulation sous-estime légèrement la température réelle, avec un écart de l'ordre de 10 à 13 °C, ce qui reste acceptable. Cela peut s'expliquer par des pertes thermiques réelles (comme la convection ou la conduction vers l'outil) qui ne sont

pas prises en compte dans le modèle.

Quand l'avance est doublée (essai 2), la température augmente fortement, ce que la simulation reproduit correctement, ce qui montre que le modèle est sensible à ce paramètre.

Le troisième essai (figure IV.3) examine l'effet de l'augmentation de la vitesse de coupe ($V_c = 30$ m/min) à avance constante ($f = 0,4$ mm/tr). Dans ce cas, la température simulée atteint 246,32 °C, tandis que la température expérimentale est légèrement inférieure (229,4 °C). Contrairement aux deux premiers essais, la simulation surestime ici la température.

Cet écart peut venir des hypothèses idéalisées du modèle, comme l'absence d'usure ou un contact thermique parfait.

On observe une bonne concordance entre les températures simulées sous ANSYS et celles mesurées expérimentalement avec la caméra infrarouge.

Les écarts relatifs sont tous inférieurs à 10 %, ce qui indique une bonne précision du modèle de simulation.

En adoptant la méthode Lagrangienne, la température est uniformément distribuée sur les surfaces, et la morphologie du copeau est meilleure dans la figure (IV.2).

En rouge, les zones chaudes observées dans les résultats d'ANSYS sont le reflet de la conduction thermique dominante à l'interface outil-copeau. Les variations de température (transition du rouge au bleu) illustrent les transferts de chaleur par convection, principalement vers le copeau et l'environnement.

En bleu, les zones qui sont à distance de l'interface démontrent un refroidissement lent, ce qui prouve une perte thermique due à la conduction vers la pièce et l'outil, ainsi qu'à la convection dans l'air ambiant.

Globalement, les tendances observées expérimentalement sont bien reproduites par la simulation : l'augmentation de l'avance et de la vitesse de coupe entraîne une élévation de la température maximale, cela reflète bien **le phénomène de génération de chaleur par frottement et déformation plastique** dans la zone de cisaillement. Les écarts entre simulation et expérimentation restent acceptables, ce qui valide le modèle numérique basé sur la loi de Johnson-Cook dans le cadre du tournage à sec de l'acier XC48. Toutefois, des améliorations peuvent être envisagées, notamment par l'intégration de conditions aux limites thermiques plus réalistes ou par la prise en compte de l'usure de l'outil.

La figure (IV.4) présente la répartition de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction du temps de simulation.

Les contraintes maximales sont situées à l'interface de coupe, où l'outil interagit avec le matériau, entraînant une déformation plastique. Les contraintes diminuent rapidement en s'éloignant de cette zone. La formation du copeau se fait par cisaillement.

Cette analyse est importante pour comprendre l'usure des outils, la chaleur, la formation des copeaux et la qualité de la surface.

IV.5 Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons analysé en détail les résultats issus de la simulation numérique et de l'expérimentation thermique. Les cartes de température obtenues ont montré que l'élévation de la vitesse de coupe et de l'avance génère une intensification des températures à l'interface outil/copeau. Les profils de contraintes de Von Mises ont confirmé que la zone de cisaillement est le principal siège des déformations plastiques.

La confrontation entre les données expérimentales et les simulations numériques a révélé une bonne concordance, validant ainsi notre modèle basé sur la loi de Johnson-Cook. Les écarts observés restent dans des limites acceptables, bien que des améliorations soient envisageables, notamment par l'intégration de conditions aux limites thermiques plus réalistes ou la prise en compte de l'usure de l'outil.

En somme, cette analyse a mis en évidence les effets des paramètres de coupe sur le comportement thermomécanique du système usiné, confirmant la pertinence de la modélisation par éléments finis pour l'étude des procédés d'usinage à sec. Elle ouvre également des perspectives d'optimisation des conditions de coupe pour améliorer la durée de vie des outils et la qualité des pièces produites.



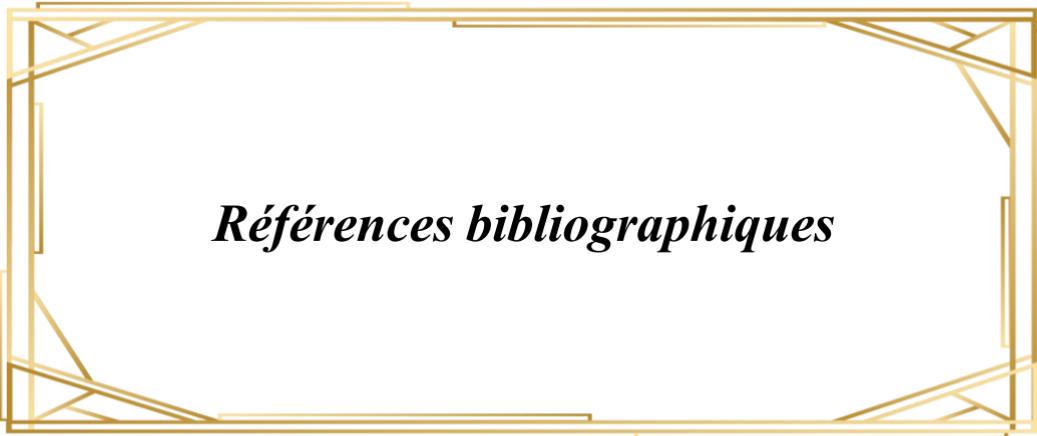
Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons mené une investigation approfondie du comportement thermomécanique de l'acier XC48 lors d'une opération de tournage à sec. Grâce à une approche expérimentale appuyée par l'analyse thermique infrarouge et une modélisation numérique par la méthode des éléments finis sous ANSYS Explicit, nous avons pu observer et quantifier l'évolution des températures, les contraintes induites ainsi que les mécanismes de formation du copeau.

La confrontation des résultats expérimentaux et numériques a permis de valider la pertinence du modèle développé, mettant en évidence la capacité de la simulation à prédire avec précision les phénomènes thermiques critiques qui affectent la performance du procédé. De plus, l'analyse a révélé l'influence majeure de certains paramètres de coupe (vitesse, avance, profondeur de passe) sur la distribution thermique et la réponse mécanique de la pièce usinée. Les résultats obtenus offrent ainsi un cadre de référence pour l'optimisation des conditions de tournage à sec, en vue de prolonger la durée de vie des outils, améliorer la qualité des surfaces et réduire les coûts de production. Cette recherche ouvre également la voie à des études futures portant sur d'autres matériaux, conditions de coupe ou approches hybrides combinant usinage à sec et lubrification minimale (MQL).

En somme, ce mémoire illustre la complémentarité entre expérimentation et simulation numérique dans l'analyse des procédés d'usinage, et constitue une contribution utile à l'avancement des techniques de fabrication avancée.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Djamaa, M. C. (2020, 8 décembre). Fabrication mécanique. Université 8 Mai 1945 Guelma, Département de Génie Mécanique.
- [2] Passeron. (1997). Tournage. Techniques de l'Ingénieur, BM7086.
- [3] Maamri, D., & Necib, A. (2015). Optimisation des paramètres de coupe pour minimiser la consommation d'énergie pendant le tournage [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah – Ouargla].
- [4] Toumine, A. (2007). Usinage. INSA de Lyon, Groupe conception-productique.
- [5] Seddi, L., & Chalali, A. (2020). Étude du comportement d'un porte-outil de tour TOS SN 40 lors d'une opération de chariotage en coupe orthogonale [Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa].
- [6] Boukhelifa, A., & Hafsi, W. (2017). Simulation numérique de la coupe... [Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida 1].
- [7] Gara, S. (s.d.). Procédés d'usinage [Ingénieur ENI Tunis], pp. 10–19, 45, 140–142.
- [8] Rocardier. (2011). Cours sur le tournage – Usinage cours technologie.
- [9] Mazouzi, M., & Karkouri, M. (2015). Numérisation d'un tour conventionnel. Université Kasdi Merbah – Ouargla.
- [10] Layachi, D. (2020–2021 env.). Chapitre 2 : Procédés d'obtention des pièces mécaniques [Cours, Université Frères Mentouri Constantine].
- [11] Benlahmidi, S., & Aouici, H. (s.d.). Tournage, TP Production/2e année GM&P. ENST.
- [12] Afroun, M. (s.d.). Coupe des métaux 1 [Cours de Master 1 FMP, Université de Blida].
- [13] Sebhi, A. (2013). Étude tribologique des outils de coupe et aciers [Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbès – Sétif].
- [14] Bensaada, S. (s.d.). Coupe des métaux. Université Mohamed Khider – Biskra.
- [15] Slimani, A. (s.d.). Tournage [Cours, Université de Batna 2]

- [16] Chakir, S., & Laidi, K. (2016). Modélisation et simulation des mécanismes aux interfaces... [Mémoire de Master, Université Blida 1].
- [17] Traikia, K. (2013–2014). Contribution à l'amélioration de la résistance à l'usure des outils en fraisage à sec [Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba].
- [18] Fedaoui, K. (2020–2021). Technologie de fabrication [Polycopié de cours, 1re année licence GIM]. Université Frères Mentouri Constantine, ISTA.
- [19] Benmohammed, B. (2022–2023). UEF Coupe des métaux 2 : Chapitre I... [Cours de Master 1, Université de Batna 2].
- [20] Université Frères Mentouri – Constantine. (s.d.). Optimisation des conditions de coupe [Cours, ISTA].
- [21] Université de Lille. (2014). Les efforts de coupe : tournage [Cours en ligne]. 3PM-EFAU.
- [22] CPRP.sti-beziers.fr. (s.d.). Document extrait du manuel de formation Sandvik : cours formules et définitions.
- [23] Habak, M. (2006). Étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe... [Thèse de doctorat, ENSAM – CER d'Angers].
- [24] Guediche, M. (2017). Modélisation et simulation de l'usure des outils de coupe... [Thèse de doctorat, Université de Lyon].
- [25] Nécib, D. (2018). Fabrication mécanique [Cours en ligne, Université Echahid Hamma Lakhdar – El-Oued].
- [26] ANSYS. (s.d.). What is Finite Element Analysis (FEA)?
- [27] Benabid, F. (2015). Étude des transferts thermiques au cours d'une opération d'usinage... [Thèse de doctorat, Université de Batna].
- [28] Johnson, G. R. (1983). A constitutive model... In Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlands.
- [29] Barge, M. (2005, juillet). Étude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion [Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon].
- [30] Rech, J., Claudin, C., & D'Eramo, E. (2009). Identification of a friction model... Tribology International, 42, 738–744.

- [31] Guo, Y. B., & Liu, C. R. (2002). Mechanical properties of hardened AISI 52100 steel... ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124, 1–7.