



**UNIVERSITE 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

**Modélisation thermomécanique d'une
opération de fraisage**

Promotrice :
Mme Melzi Nesrine
CO-Promoteur:
Mr Temmar Mustapha

Réalisé par :
Khaldi Fairouz

Résumé :

Le fraisage, bien que couramment utilisé dans l'industrie génère des contraintes thermomécaniques qui entraînent l'usure des outils et altèrent la qualité des surfaces usinées, principalement en raison de l'augmentation de la température dans la zone de coupe.

Notre projet présente une modélisation thermomécanique d'une opération de fraisage basée sur la méthode des éléments finis. Il vise à étudier l'influence des conditions de coupe sur la température, les contraintes mécaniques et la qualité finale de la pièce usinée. Les résultats obtenus sont confirmés par des données expérimentales. Cette étude contribue à l'optimisation des paramètres de coupe afin d'améliorer la performance du procédé ainsi que la durabilité des outils.

Mots clés : Fraisage, l'industrie, contraintes thermomécaniques, modélisation thermomécanique.

Abstract:

Milling, although commonly used in industry, generates thermomechanical stresses that cause tool wear and degrade the quality of machined surfaces, mainly due to the temperature rise in the cutting zone.

This thesis presents a thermomechanical model of the milling operation using the finite element method. It aims to investigate the impact of cutting conditions on temperature, mechanical stresses, and the final quality of the work piece. the results validated by experimental data. This study supports the optimization of cutting and extend tool life span.

Keywords: Milling, industry, thermomechanical stresses, thermomechanical model.

الملخص :

إن عملية التفريز، رغم استخدامها بشكل شائع في الصناعة إلا أنها تولد الضغوطات الحرارية والميكانيكية التي تؤدي إلى تآكل الأدوات وتؤثر بشكل رئيسي إلى ارتفاع درجة الحرارة في منطقة القطع.

يعرض هذا البحث نموذجا حراريا ميكانيكيا لعملية التفريز باستخدام طريقة العناصر المحدودة. حيث يهدف إلى دراسة تأثير ظروف القطع على درجة الحرارة والإجهادات وجودة القطعة النهائية. يتيح هذا النموذج المطور محاكاة دقيقة للظاهر الحراري والميكانيكية وتم تأكيد صحة نتائجه من خلال بيانات تجريبية. تساهم هذه الدراسة في تحسين معايير القطع لتعزيز كفاءة العملية وزيادة عمر الأداة.

الكلمات المفتاحية : التفريز، الصناعة، الضغوطات الحرارية والميكانيكية، نموذجا حراريا ميكانيكيا.

Remerciement

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à dieu tout-puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la santé pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mes parents, pour leur amour inestimable, leur soutien indéfectible et leurs prières constantes.

Sans eux, rien n'aurait été possible.

J'adresse également mes sincères remerciements à mes frères et sœurs pour leur soutien moral tout au long de mon parcours.

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mon encadrante **Mme.Melzi**, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, sa patience et son accompagnement tout au long de ce travail, et je remercier vivement pour la confiance qu'elle m'a accordé pour mener à bien ce projet, et m'avoir conseillée et m'as appris beaucoup de choses pendant toute l'année*

*Et je remercier **Mr. Temmar** pour accepter ce travail et pour l'aide et assumé la responsabilité de nos encadrer et nous orienter pendant la période de réalisation du projet.*

Je remercie mes enseignants, mes camarades, mes amis, ainsi que toute personne ayant, d'une manière ou d'une autre, contribué à ce travail.

Enfin je remercier veux remercier moi-même pour tout ce travail et je suis très fiers de ce que j'ai accompli.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À mes parents bien-aimés,

Vous êtes les premières mains qui m'ont porté, les premiers regards qui m'ont donné la confiance, les premières voix qui m'ont appris à croire en moi.

Votre amour, vos sacrifices silencieux, vos prières constantes et votre foi inébranlable en mon avenir sont les fondations de ce parcours.

À vous, qui avez toujours été là, dans les moments de doute comme dans les instants de joie, je dédie humblement ce travail, fruit de votre patience et de votre soutien indéfectible.

À qui les mots rivalisent pour sortir exprimant leur être le plus profond, qui m'a appris et subi des épreuves pour devenir qui je suis maintenant, quand les soucis me submergent, je nage dans la mer de sa tendresse pour soulager ma douleur.

Ma mère...

Dévouement et merci à la lumière qui éclaire le chemin du succès pour moi. Il est la raison de mon existence.

Mon père bien-aimé.

À mes sœurs et frères

Merci pour votre affection, votre soutien et vos mots d'encouragement dans les moments de doute. Votre présence m'a toujours réchauffé le cours et renforcé ma volonté d'aller de l'avant.

À ceux avec qui j'ai goûté les plus beaux moments, aux amis et compagnons de mon chemin sauf tout le monde qui sent ma présence et m'adresse un mot gentil ou un sourire sincère. A tous ceux qui sont dans mon cœur et partagent ma plume

Merci du fond du cœur.

Tables de matière :

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur le procédé de fraisage

I.1 Introduction :.....	2
I.2 Généralité sur l'usinage :	2
I.2.1 Procédés d'usinage :.....	2
I.3 Système POM (Pièce / Outil / Machine) :	3
I.3.1 Définition du système POM :.....	3
I.4 Matériaux outils :	4
I.5 Le procédé de fraisage :	5
I.5.1 Le fraisage :.....	5
I.5.2 Principe de fraisage :	5
I.5.3 Les types de fraisage :	6
I.5.4 Les opérations de fraisage :	8
I.5.5 La fraise :.....	9
I.5.6 Les caractéristiques des fraises :	9
I.5.7 Les outils de fraisage :	10
I.5.8 Choix des outils de fraisage :	11
I.5.9 Les fraiseuses :	13
I.5.10 Types de fraiseuse :	13
I.6 Les paramètres de coupe :.....	15
I.8 Lubrification et fraisage à sec ou à lubrification minimale (MQL) :.....	18
I.9 Conclusion :	18

Chapitre II : Les modèles associées à la coupe de métaux

II.1 Introduction :	21
II.2 La coupe des métaux :	21
II.3 La formation du copeau en coupe orthogonale :	21
II.3.1 Les zones de cisaillement :	22
II.4 L'usinage à grande vitesse : (UGV)	23
II.5 L'usinage à sec :	24
II.6 La température de coupe et ses effets :	24
II.6.1 La température de coupe :	24
II.6.2 Effets de la température de coupe :	24
II.6.3 Phénomènes thermiques pendant la coupe :	25

II.6.4 Méthodes de mesure de la température de coupe :	26
II.6.4.1 Les méthodes analytiques :	26
II.6.4.2 Les méthodes expérimentales :	26
II.7 Formulation des modèles :	28
II.7.1 Approche Lagrangienne :	29
II.7.2 Approche Eulérienne :	29
II.7.3 Approche Lagrangien-Eulérienne arbitraire (ALE) :	29
II.8 Maillage :	29
II.9 Les modèles de comportement :	30
II.9.1 Loi d’Oxley :	30
II.9.2 Loi de Johnson et Cook :	30
II.9.3 Modèle de zerilli-Armstrong :	31

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude expérimentale

III.1 Introduction :	33
III.2 La conception avec SolidWorks :	33
III.2.2 Assemblage :	34
III.3 La modélisation numérique :	35
III.3.1 Les domaines de modélisation :	35
III.3.2 Le modèle numérique :	36
III.3.3 La dynamique explicite :	36
III.4 Critère d’endommagement de Johnson-Cook :	36
III.5 Partie I : Simulation Numérique.....	37
III.5.1 La simulation de problème avec ANSYS :	37
III.5.2 Les étapes de simulation :	37
III.5.3 Les données techniques :	37
III.5.4 La Géométrie :	38
III.5.5 Contact pièce /outil :	40
III.5.6 Configuration :	43
III.6 Partie II : Etude expérimentale	44
III.6.1 Méthode de travail :	44

Chapitre IV : Résultats et Interprétation

IV.1 Introduction :.....	53
IV.2 La distribution de la température à l'interface outil/pièce de l'acier XC48 :	53
VI.3 La distribution des contraintes à l'interface outil/pièce de l'acier XC48 :	55
IV.4 Discussion des résultats de la simulation numérique :.....	55
IV.5 Comparaison de la répartition de la température à l'interface outil/pièce entre les mesures obtenues par caméra thermique et les résultats de la simulation numérique	56
IV.6 Validation de résultats :.....	58
Conclusion Générale	60

Liste de figures :

Chapitre I : Généralité sur le procédé de fraisage

Figure I.1 : Transformation de la forme des pièces par usinage	2
Figure I.2 : Schéma de système POM	3
Figure I.3 : Définition de système : Pièce/ Outil/ Machine-outil [2]	3
Figure I.4:Mouvement de coupe et d'avance [5]	5
Figure I.5: Arrêtes et surfaces d'une fraise 2T	6
Figure I.6: Fraisage en bout [7]	6
Figure I.7: Fraisage en roulant [7]	7
Figure I.8: Fraisage en combiné	7
Figure I.9: Fraisage en opposition	7
Figure I.10: Fraisage en avalant	8
Figure I.11: Les différentes opérations de fraisage	9
Figure I.12: Les caractéristiques des fraises [10]	10
Figure I.13: Les différents outils de fraisage [11]	11
Figure I.14: Les différents modèles de fraise en ARS [10]	11
Figure I.15: Les différents modèles de fraise en ARS [10]	12
Figure I.16:Les différents modèles de fraise en carbure [10]	12
Figure I.17: Fraiseuse horizontale	13
Figure I.18: Fraiseuse verticale	13
Figure I.19: Fraiseuse à 3 axes [12]	14
Figure I.20: Fraiseuse à 4 axes [12]	14
Figure I.21:Fraiseuse à 5 axes [12]	15
Figure I.22:La vitesse de coupe Vc [13]	15
Figure I.23:La vitesse d'avance Vf [13]	16
Figure I.24: L'avance par dent fz [13]	17
Figure I.25:Profondeur de passe ap [13]	18

Chapitre II : Les modèles associées à la coupe des métaux

Figure II.1: Observations de la coupe des métaux (d'après Tresca et Mallock) [15]	21
Figure II.2: La coupe orthogonale [16]	22
Figure II.3: Trois zones principales de sollicitations sévères peuvent être distinguées lors de l'usinage [18]	23
Figure II.4: Usinage à sec	24
Figure II.5: Exemple de cartographies thermiques face latérale d'outil, face de coupe [21]	25
Figure II.6: Pyrométrie optique	27
Figure II.7: Caméra thermique	27
Figure II.8: Thermocouple	28
Figure II.9: Exemple de cartographies thermiques face latérale d'outil, face de coupe [24]	30

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

Figure III.1: Plan de face	33
Figure III.2 : Esquisse 2D	34
Figure III.3: Modélisation 3D d'outil	34
Figure III.4: Assemblage Pièce-outil	35
Figure III.5 : Bibliothèque des données technique	37
Figure III.6: Les propriétés graphiques de l'outil et la pièce	38
Figure III.7: Les propriétés mécaniques et physiques de l'outil de coupe	39
Figure III.8: Les propriétés mécaniques et physiques de la pièce utilisée	39
Figure III.9: Ensemble pièce-outil	40
Figure III.10: Système de coordonnées	40
Figure III.11: Génération de maillage	42
Figure III.12: Gestion de contact	42
Figure III.13: Déplacement distant	43
Figure III.14: Vitesse angulaire de broche	43
Figure III. 15: Support fixe	44
Figure III. 16: Résolution de solution	44
Figure III.17: Découpage par la scie	45
Figure III.18: Pièce coupé (100x50x50)	45
Figure III.19: Fraiseuse conventionnelle	46
Figure III.20: Fraise de surface en carbure	47
Figure III.21 : Fixation de la pièce et de l'outil	47
Figure III.22: Réglage de paramètres de coupe	48
Figure III.23: Usinage de la pièce	49
Figure III.24: Pièce finie	49
Figure III.25: La caméra thermique	50
Figure III. 26: La température ambiante	51

Chapitre VI : Résultats et interprétation

Figure IV.1: La distribution de la température à l'interface outil/ pièce (Vc=100 m/min)	53
Figure IV.2: La distribution de la température à l'interface outil-pièce (Vc= 100m/min)	53
Figure IV.3: La distribution de la température à l'interface outil/pièce (Vc= 100m/min)	54
Figure IV.4: La distribution de la température à l'interface outil/pièce (Vc= 112m/min)	54
Figure IV.5: La distribution des contraintes à l'interface outil/pièce	55
Figure IV.6: Comparaison des températures à l'interface outil/pièce entre les mesures thermiques et la simulation numérique pour (Vc= 100 ; fz=0,01 mm)	57
Figure IV.7: Comparaison des températures à l'interface outil/pièce entre les mesures thermiques et la simulation numérique (Vc=100m/min ; fz=0,02mm)	57
Figure IV.8: Comparaison des températures à l'interface outil/pièce entre les mesures thermiques et la simulation numérique (Vc= 112 m/min ; fz=0,03mm)	58

Lise de tableaux :

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

Tableau III.1 : Paramètres de la loi de comportement de l'acier XC48	38
Tableau III.2: Critère d'endommagement Johnson-Cook de l'acier XC48	38

Chapitre VI : Résultats et interprétation

Tableau IV.1 : Comparaison de la distribution de la température, obtenue expérimentalement et par simulation, pour différentes vitesses de coupe et profondeurs de passe, accompagnée du calcul du pourcentage d'erreur	59
---	----

Liste de symboles :

Mc : Mouvement de coupe.

Ma : Mouvement d'avance.

Mp : Avance de pénétration.

Vc : Vitesse de coupe en m/min.

N : Fréquence de rotation en tr/min.

Vf : Vitesse d'avance en mm/tr.

fz : Avance par dent en mm/dent.

ap : Profondeur de passe en mm.

σ : Contrainte équivalente de Von Mises en Mpa.

σ^y : Contrainte d'écoulement.

ε_f : Déformation équivalente à rupture du matériau.

σ_m : Contrainte moyenne.

σ_{eq} : Contrainte équivalente de Von Mises.

C_s : L'angle d'inclinaison en degré.

η_c : L'angle d'écoulement du copeau.

T : Température instantanée en °C.

T_0 : Température ambiante en °C.

T_f : Température de fusion en °C.

T_t : Température de transition en °C.

m : Sensibilité du matériau à la température.

T_{mod} : La température modifiée par la vitesse de déformation du matériau en °C.

ARS : Acier Rapide Supérieur.

Introduction Générale

La fabrication mécanique est un pilier fondamental de l'industrie moderne, et un secteur polyvalent qui englobe la conception, la fabrication, le réglage, la réparation et l'assemblage d'une variété de pièces, d'outils, d'accessoires et de produits métalliques. Il s'agit d'un ensemble de techniques visant à obtenir une pièce ou un objet par la transformation de matière brutes.

Jusqu'à maintenant, la mise en forme par enlèvement de copeau tient un rôle majeur dans la production industrielle. Il représente en effet environ 60% des opérations effectuées.

L'évolution des technologies de fabrication a conduit à l'émergence de procédés plus avancés comme le fraisage, qui permet une plus grande précision, une meilleure maîtrise des contraintes thermiques, et une réduction significative du temps de production. Aujourd'hui, l'usinage à grande vitesse nous offre la possibilité d'usiner des pièces mécaniques sur larges plages de vitesse de coupe avec une grande précision et une excellente qualité de surface. Lors de ce processus, les forces de coupe sont élevées qui génèrent une quantité significative de chaleur. Cependant, grâce à la rapidité de la coupe, la chaleur est majoritairement évacuée par les copeaux, ce qui limite l'impact thermique sur la pièce usinée. Cette maîtrise de la chaleur permet d'éviter la déformation ou l'altération de propriétés mécaniques du matériau, tout en prolongeant la durée de vie des outils. Ainsi, le fraisage à grande vitesse améliore l'efficacité de la production, la qualité des pièces et la rentabilité dans la fabrication industrielle.

Notre recherche s'appuie sur la modélisation numérique et la simulation 3D, en utilisant la méthode des éléments finis, pour l'analyse thermique basée sur des essais de relevé de la température d'opération de surfacage par fraisage au niveau de la pièce en acier XC48 avec une fraise en carbure. Par ailleurs, une expérience pratique a été réalisée dans l'atelier du département avec la caméra thermique afin de comparer les résultats obtenus par la simulation avec ceux issus de l'essai réel.

Afin de mieux structurer la présentation de notre travail, tant sur le plan théorique que pratique, le manuscrit a été divisé en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre sera consacré à une recherche bibliographique portant sur l'usinage par enlèvement de matière, avec un accent particulier sur le fraisage. Il exposera les principes fondamentaux de ce procédé, les différents types d'outils utilisés, les opérations classiques, ainsi que les principaux paramètres de coupe qui régissent son efficacité.
- Le deuxième chapitre traitera des modèles théoriques liés à la coupe des métaux. Il abordera en détail les zones caractéristiques de la coupe orthogonale, les notions relatives à l'usinage à grande vitesse, ainsi que les effets thermiques qui en découlent. Ce chapitre présentera également les méthodes de mesure de la température en usinage et les lois de comportement des matériaux utilisées pour les simulations.
- Le troisième chapitre portera sur la modélisation numérique en 3D des effets thermiques générés à l'interface outil-pièce lors d'une opération de surfacage à sec de l'acier XC48. La loi de Johnson-Cook sera utilisée pour estimer la répartition de température entre l'outil et le copeau. Ce chapitre intègre également une étude expérimentale menée à l'aide d'une caméra infrarouge.
- Le quatrième chapitre présentera les résultats issus des simulations numériques, accompagnés de leur interprétation. Une comparaison avec les données expérimentales obtenues permettra d'évaluer la validité des modèles développés.

On terminera notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralité sur le procédé de fraisage

I.1 Introduction :

Il est évidement que la fabrication mécanique, ou la productique, se concentre sur la création de pièces mécanique qui constituent les sous-ensembles des produits finis ou des mécanismes industriels. Ce processus de production repose sur une multitude de techniques et de procédés, intégrant divers composants et paramètres. Ces éléments sont constamment améliorés grâce à des recherches visant à optimiser leur développement.

Actuellement, L'usinage par enlèvement de copeaux reste encore le procédé le plus répandu, malgré l'apparition de techniques nouvelles telles que laser, l'électroérosion ou le jet d'eau. L'usinage par enlèvement de la matière est un procédé d'élaboration des pièces mécaniques. Un outil de coupe enlève la matière à une pièce pour générer une nouvelle surface, il existe plusieurs procédés d'usinage, ainsi qu'un nombre important d'opérations comme le fraisage, tournage, perçage, rectification...

I.2 Généralité sur l'usinage :

L'usinage a pour objet d'obtenir, à partir des ébauches, des pièces de forme déterminée avec une précision géométrique nettement exprimée et un état de surface bien spécifié. Le choix rationnel entre les différents procédés d'usinage a donc, une grande importance. Pendant le traitement de la pièce, l'élimination des matériaux est réalisée par la combinaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : Mouvement de coupe (vitesse de coupe) et Mouvement d'avance (vitesse d'avance). Il existe deux façons de générer la surface souhaitée : par la forme ou via des enveloppes. La figure ci- dessous montre le rôle de l'usinage comme étant la transformation de la forme d'un matériau de l'état brut à un état final.

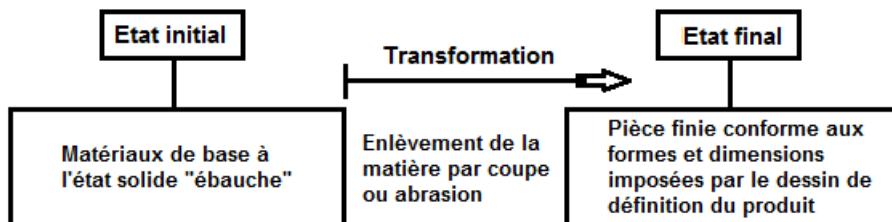


Figure I.1 : Transformation de la forme des pièces par usinage

I.2.1 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 [1].

I.3 Système POM (Pièce / Outil / Machine) :

Le processus d'usinage a un caractère subjectif du fait qu'il est très délicat en pratique d'évaluer l'ensemble des conséquences des choix technologiques lors des différents procédés d'usinage : Tournage, Fraisage, Rabotage, Perçage, ...

Aussi, le processus d'usinage a un caractère relatif du fait qu'il prend plusieurs paramètres en considération comme la qualité de la pièce à usiner, la qualité de l'outil, ...

Pour obtenir les meilleures conditions d'usinage, il faut prendre en considération 3 paramètres importants :

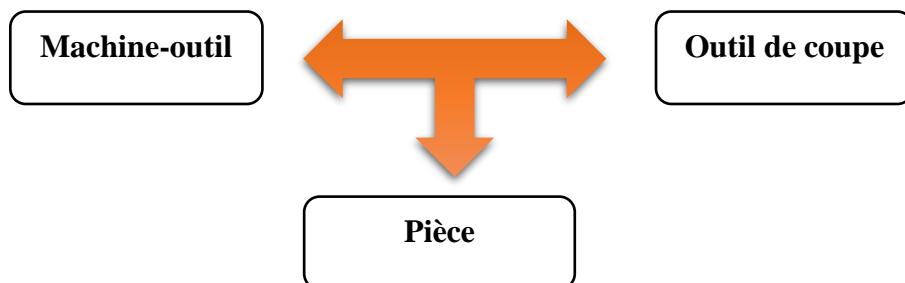


Figure I.2 : Schéma de système POM

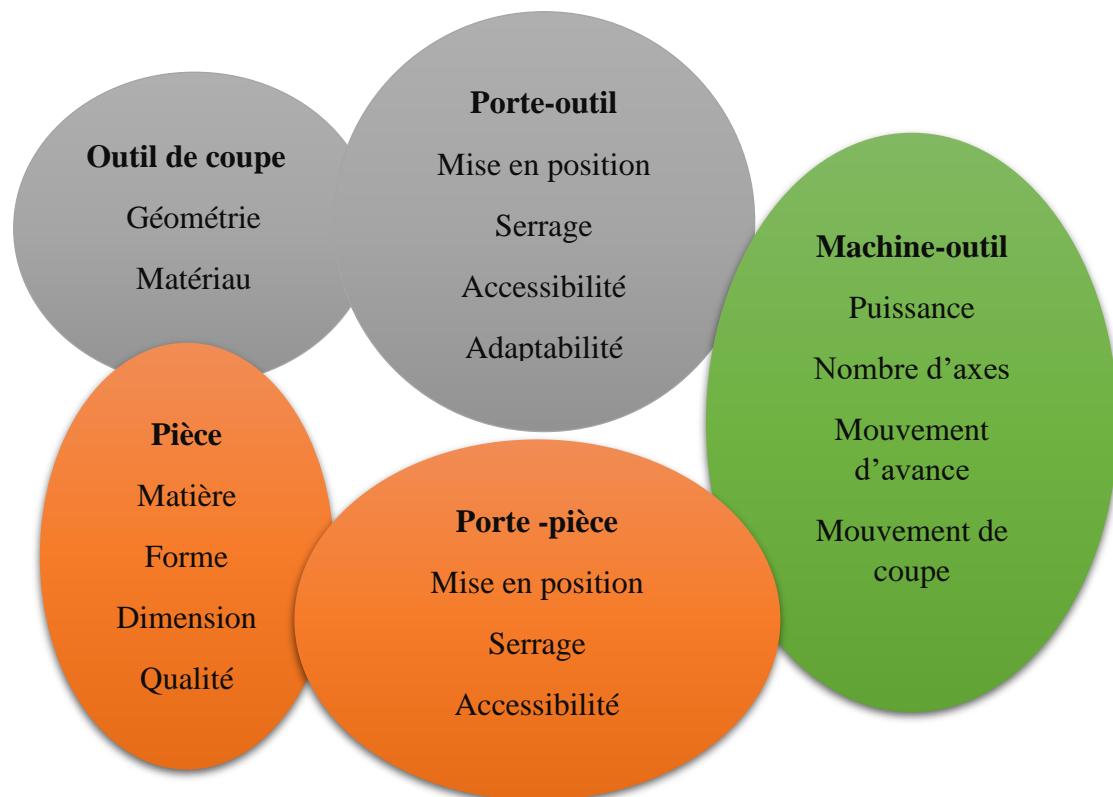
I.3.1 Définition du système POM :

Figure I.3 : Définition de système : Pièce/ Outil/ Machine-outil [2]

I.4 Matériaux outils :

Les matériaux utilisés pour les outils sont principalement [3] :

a- L'acier rapide :

(HSS - High Speed Steel), qui est un acier fortement allié, est très employé pour la production d'outils de coupe. Les caractéristiques qui le rendent intéressant sont sa dureté d'environ 65HRc et sa ténacité qui lui confère une bonne longévité, bonne résistance à l'usure, bonne résistance à la corrosion.

L'acier rapide est utilisé dans les forêts, les fraises, les tarauds et les alésoirs. Il peut être utilisé pour l'usinage des métaux et la transformation de matériaux non métalliques comme les plastiques et le bois. Les types d'acier rapide :

HSS : Contient du tungstène et du vanadium pour améliorer la résistance à l'usure et la dureté à chaud et nécessite un traitement thermique.

HSSE : Contient du cobalt pour augmenter la résistance à l'usure et la ténacité, idéal pour les outils de coupe fonctionnant à grande vitesse.

b- Les carbures métalliques :

Rentrent dans cette catégorie les alliages composés de tungstène (60-90%), titane et tantale (1-35%) et de cobalt ou nickel (5-15%), ainsi que d'autres matières en plus faibles quantités comme le molybdène ou le vanadium. La fabrication du métal dur est réalisée par frittage, on en fait généralement des plaquettes que l'on fixe sur le corps de l'outil par brasage, avec une vis ou aussi par bridage. Certains outils de petites dimensions sont fabriqués entièrement en métal dur.

Les outils en carbure se présentent sur marché en deux types à savoir :

- Les outils à plaquettes en carbure brasées dont la plaquette se trouve brasée au protéger plaque
- Les outils à plaquettes en carbure amovibles : ils sont formés de trois blocs à savoir, le porte plaque, la plaque intercalaire et la plaque. Cet est à jeter une fois sa durée de vie est atteinte. Leurs principales formes et dimensions sont normalisées.

c- Céramique :

Les outils à plaquettes en céramique amovibles ont une grande dureté (donc une faible ténacité) et une grande stabilité à haute température. Ils permettent un grand débit de matière. Mais nécessitent une grande stabilité de la machine et un strict respect des conditions de coupe. Ils sont généralement utilisés pour les opérations de finition

d- Cermets :

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitrite de Titane ou de nitrite de Titane.

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité.

Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition.

Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

e- Diamant :

Le diamant a un faible coefficient de frottement. Il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température tel que les alliages d'aluminium, les alliages de cuivre, les alliages de magnésium thermoréductibles etc. et ne convient pas à l'usinage des matériaux ferreux.

f- Nitrule de Bore Cubique (CBN) :

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures... Son utilisation requiert

- Une machine stable.
- Une grande rigidité de la pièce et de la porte pièce
- Un arrosage.

I.5 Le procédé de fraisage :**I.5.1 Le fraisage :**

Le procédé d'usinage par fraisage consiste à enlever la matière d'une pièce fixe à l'aide d'un outil en rotation autour de son axe de révolution, pour donner au corps la forme saurait qui peut être :

- Des surfaces géométriques simples (principalement des plans).
- Des associations de surfaces géométriques simples (rainure, épaulements...).

En fraisage, enlèvement de la matière sous forme de copeaux résulte de la combinaison de deux mouvements rotation de l'outil de coupe d'une part, et l'avance de la pièce à usiner d'autre part. on distingue 2 types de mouvement :

- a- Mouvement de coupe (Mc) :** La rotation de la fraise autour de son axe.
- b- Mouvement d'avance (Ma) :** La translation de la table de la machine sur laquelle est fixée la pièce dans le sens longitudinal.
- c- Avance de pénétration (Mp) :** Le déplacement de la fraise ou de la table pour régler de la position de l'outil par rapport à la pièce avant chaque nouvelle passe. [4]

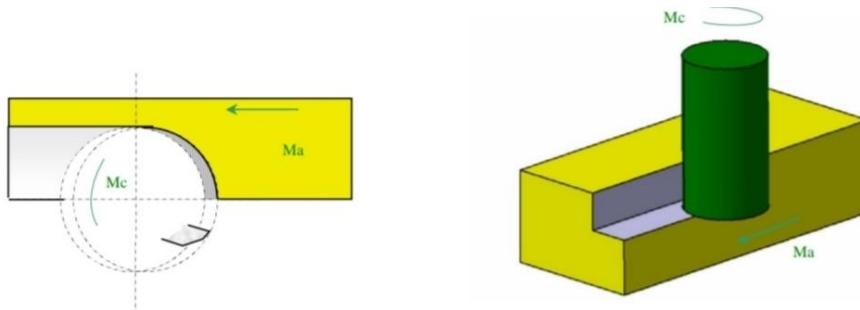
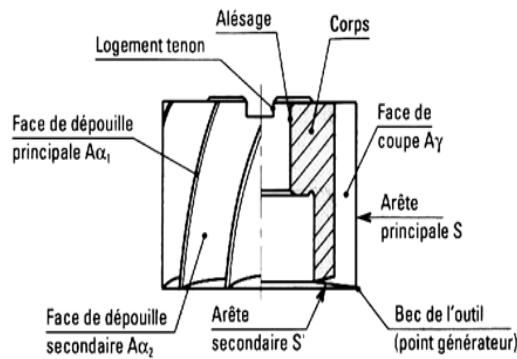


Figure I.4:Mouvement de coupe et d'avance [5]

I.5.2 Principe de fraisage :

L'outil doté de multiples dents, nommé « Fraise », effectue un mouvement circulaire uniforme, appelé mouvement de coupe. Pendant ce temps, la pièce se déplace par translation par rapport à la fraise, ce qui constitue le mouvement d'avance. Comme pour toute opération d'usinage des métaux, le fraisage exige le respect de certaines conditions, notamment en ce qui concerne les vitesses de coupe et d'avance.

**Figure I.5: Arrêtes et surfaces d'une fraise 2T**

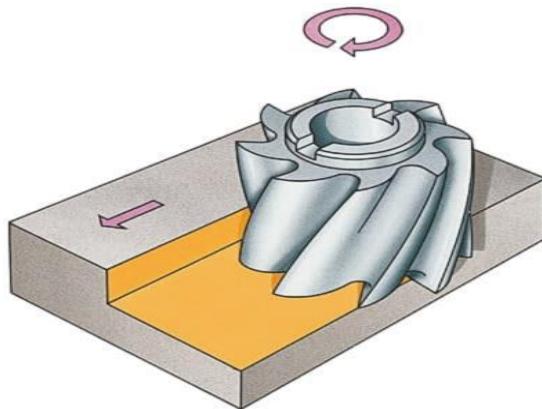
I.5.3 Les types de fraisage :

Nous différencions 3 types de travail :

a- Fraisage en bout :

L'axe de la fraise est positionné de manière à être perpendiculaire à la surface à usiner. Dans ce cas, la fraise utilise à la fois son diamètre et sa partie uniforme, ce qui permet d'obtenir une charge plus régulière sur la machine. [6]

De plus, la capacité de coupe est supérieure à celle du fraisage en roulant, ce qui se traduit par une meilleure qualité de l'état de surface.

**Figure I.6: Fraisage en bout [7]**

a- Fraisage en roulant :

L'axe de la fraise est orienté parallèlement à la surface à usiner permettant à la fraise de couper principalement avec son diamètre. Cependant, cela entraîne une charge de coupe irrégulière, en particulier avec des fraises à denture droite, ce qui peut créer une surface ondulée et striée. Pour remédier à ces imperfections, il est conseillé d'utiliser une fraise à denture hélicoïdale, car cette conception permet une charge et décharge progressive des dents améliorant ainsi la qualité de la surface usinée.

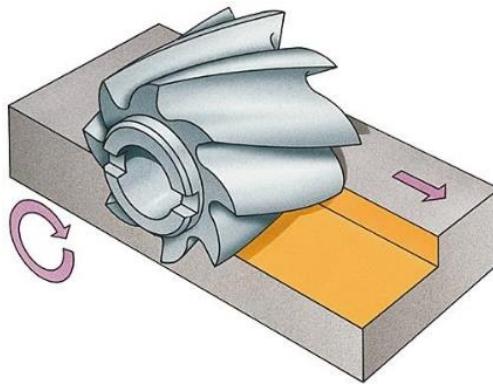


Figure I.7: Fraisage en roulant [7]

b- Fraisage en combiné :

Dans ce type de fraissage, la fraise effectue la coupe à la fois avec son diamètre et avec partie front, comme la montre la figure

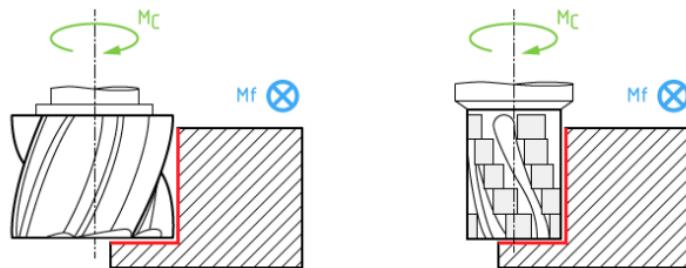


Figure I.8: Fraisage en combiné

Pour chaque type de fraissage, il existe 2 modes de travail :

a- Fraisage en opposition :

Dans le fraissage en opposition, la table se déplace dans une direction contraire à celle de la rotation de la fraise dans la zone de coupe. Au début, l'épaisseur de coupe est nulle, mais elle augmente progressivement jusqu'à la fin de la passe. Ce mode de fraissage est souvent privilégié pour obtenir une finition de surface de meilleure qualité, car il minimise l'usure de l'outil et optimise le résultat final de la pièce usinée. [8]

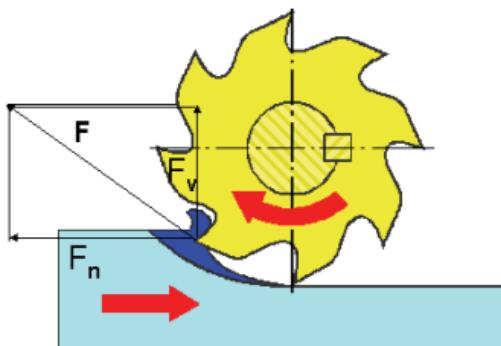
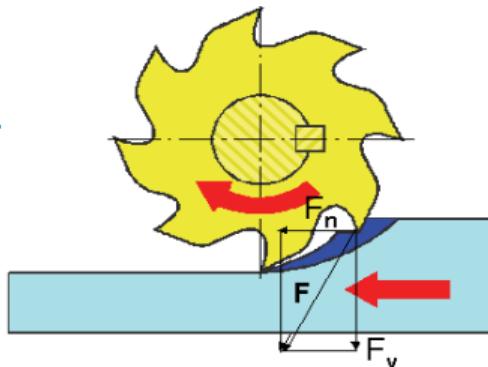


Figure I.9: Fraisage en opposition

b - Fraisage en avalant :

Dans le fraisage en avalant la table se déplace dans le même sens que la rotation de la fraise. Cela signifie que l'épaisseur de copeau commence à maximum et descend progressivement jusqu'à atteindre zéro à la fin de passe. Ce mode de fraisage est souvent choisi pour accroître l'efficacité de l'usinage, car il permet un meilleur contrôle de la coupe et réduit les vibrations. [9]

**Figure I.10: Fraisage en avalant****I.5.4 Les opérations de fraisage :**

Le surfaçage	Le surfaçage est un procédé d'usinage qui permet à usiner une surface plane à l'aide d'une fraise. Ce procédé permet d'obtenir une finition précise et uniforme de la surface traitée.	
L'épaulement	Est une opération qui consiste à usiner deux surfaces planes perpendiculaires associées	
Poche	La poche est effectivement délimitée par des surfaces verticales qui peuvent être des formes variées, comme un cylindre ou un plan.	

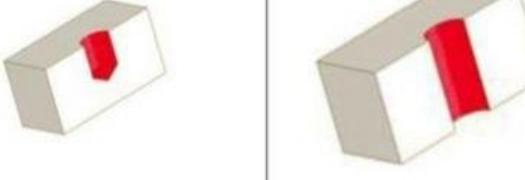
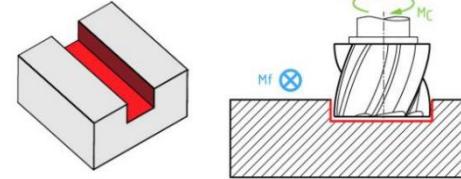
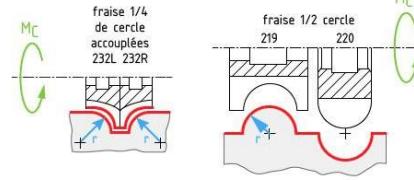
Perçage	Le perçage consiste à réaliser des trous débouchant dans un matériau. C'est trou peuvent avoir différentes dimensions et profondeurs selon les besoins de l'application	
Le rainurage	Est une opération qui consiste à usiner trois surfaces orthogonales entre elles.	
Le profilage	Concerne l'ensemble des travaux de fraisage dit de profil pour lesquels la surface réalisée est obtenue par le travail de forme de la denture latérale de fraise.	

Figure I.11: Les différentes opérations de fraisage

Aux opérations déjà citées, on ajoute l'opération de :

- Surfaçage incliné.
- Rainurage en vé.
- Rainurage en Té.
- Fraisage en queue d'aronde.
- Centrage, lamage, alésage, taraudage.
- Tronçonnage.

I.5.5 La fraise :

Une fraise de fraisage est un outil coupant utilisé en usinage pour enlever de la matière par rotation autour de son axe. Elle est montée sur une fraiseuse et permet d'effectuer diverses opérations comme le détourage, le surfaçage, le rainurage ou le profilage. Les fraises existent sous différentes formes (cylindrique, conique, à plaquettes amovibles, hémisphérique, etc.) et sont fabriquées en matériaux résistants comme l'acier rapide (HSS) ou le carbure de tungstène pour garantir une coupe efficace et durable.

I.5.6 Les caractéristiques des fraises :

- **La taille :** Suivant le nombre d'arêtes tranchantes par dent, on distingue les fraises : une taille, deux tailles ou trois tailles.
- **La forme :** Suivant le profil des génératrices par rapport à l'axe de l'outil, on distingue : les fraises cylindriques, coniques et les fraises de forme.
- **La denture :** Suivant le sens d'inclinaison des arêtes tranchantes par rapport à l'axe de la fraise, on distingue les dentures hélicoïdales à droite ou à gauche et les dentures à double hélice alternée. Si l'arête

tranchante est parallèle à l'axe de la fraise, la denture est droite. Une fraise est également caractérisée par son nombre de dents.

- **Les dimensions :** Pour une fraise deux tailles : diamètre et hauteur taillée. Pour une fraise trois tailles : diamètre de l'outil, épaisseur, diamètre de l'alésage. Pour une fraise conique pour queue d'aronde : l'angle, le diamètre de l'outil et l'épaisseur.

- **Le mode de fixation :** A trou lisse ou taraudé ; à queue cylindrique ou conique.

- **Construction :** Les fraises peuvent être à denture fraisée (ex. : fraise conique deux tailles α (60°), ou à denture détalonnée et fraisée (ex. : fraise-disque pour crémaillères).

Elles sont en acier rapide. Pour les fraises à outils rapportés sur un corps de fraise, les dents fixées mécaniquement sont en acier rapide, ou le plus souvent en carbure métallique.

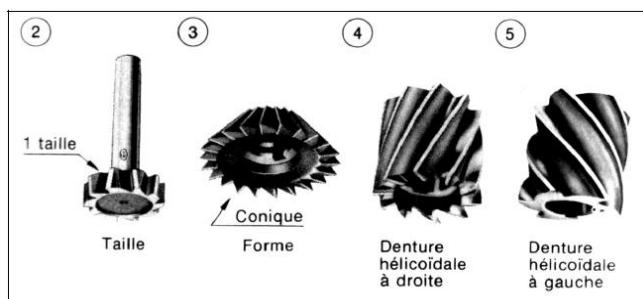


Figure I.12: Les caractéristiques des fraises [10]

I.5.7 Les outils de fraisage :

- Fraise rouleau 1 taille : Surface planes.
- Fraise cylindrique à 2 tailles : Surface plane et angles.
- Fraise 3 tailles dentures alternées : Gorges, rainure.
- Fraise biconique : Guides en prisme.
- Fraise de profil circulaire concave : Guides circulaires etc....

Fraise à queue :

- Fraise à gorges : Rainures et poches.
- Fraise à rainures : Rainures profondes et contours.
- Fraise en T : Rainures en T.
- Fraise conique 2 tailles : Guides en angle.



Figure I.13: Les différents outils de fraisage [11]

I.5.8 Choix des outils de fraisage :

a- Les fraises en acier rapide (ARS) :

Visualisation	Identification de l'outil	Type d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Fraise 1 taille à surfacer	Surfaçage en roulant ou de profil	 ○ : direction projetée du mouvement d'avance
	Fraise cloche à surfacer	Surfaçage en bout ou de face	
	Fraise 2 tailles à queue conique	Surfaçages combinés à prédominance en roulant Surfaçage en roulant	

Figure I.14: Les différents modèles de fraise en ARS [10]

	Fraise 2 tailles à alésages et à entraînement par tenon	Surfaçages combinés à prédominance en bout Restrictivement : - surfacage en bout (a) - surfacage en roulant (b)	
	Fraise 2 tailles à queue cylindrique	Rainurage de profil peu précis	
	Fraise à rainurer deux lèvres à coupe centrale	<i>Rainurage de profil en pleine matière</i> Exemple : rainure de clavetage	
	Fraise 3 tailles à dentures alternées	Rainurage en bout Qualité usuelle obtenue /9	
	Fraise 3 tailles extensible à denture alternées	Rainurage en bout qualité usuelle obtenue : 7-8	

Figure I.15: Les différents modèles de fraise en ARS [10]

b- Les fraises à plaquettes carbure :

Visualisation	Identification de l'outil	Types d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Fraise à surfacer	Surfaçage en bout	
	Fraise à surfacer et à dresser	Surfaçages combinés à prédominance en bout	
	Fraise à rainurer	Rainurage de profil	
	Fraise 3 tailles à dentures alternées	Rainurage en bout	

Figure I.16:Les différents modèles de fraise en carbure [10]

I.5.9 Les fraiseuses :

Une fraiseuse est une machine-outil à enlèvement de copeaux à commande manuelle ou à commande numérique (CN) munie d'une broche tournante pouvant recevoir une fraise, outil à arêtes multiples, ainsi que d'autres outils tels que foret, barre d'alésage, taraud permettant ainsi l'exécution d'usinages très variés.

I.5.10 Types de fraiseuse :**a- Fraiseuse horizontale conventionnelle :**

La fraiseuse horizontale conventionnelle est une machine-outil utilisée pour usiner des pièces métalliques à l'aide d'outils de fraisage. Contrairement aux fraiseuses verticales, la fraiseuse horizontale a son arbre de fraisage monté horizontalement, ce qui lui permet de réaliser des opérations spécifiques avec efficacité.

Idéale pour l'usinage de pièce de grande taille, elle offre une grande stabilité et est largement utilisée dans les industries lourdes.



Figure I.17: Fraiseuse horizontale

b- Fraiseuse verticale :

La fraiseuse verticale conventionnelle est une machine-outil largement utilisée dans l'usinage pour réaliser des opérations de fraisage sur des pièces métalliques. Contrairement à la fraiseuse horizontale, l'arbre de fraisage est monté verticalement, ce qui offre des avantages spécifiques pour certains types d'usinage.

Utilisée pour l'usinage de pièces de petite taille, elle offre une grande précision et convient à une variété de matériau.



Figure I.18: Fraiseuse verticale

c- Fraiseuse à commande numérique (CNC) :

Commande par ordinateur, elle permet de réaliser des opérations automatisées et complexes avec une grande précision. En trouve 3 types de fraiseuse à commande numérique :

- Fraiseuse 3 axes :

- Broche verticale. L'axe Z est vertical.
- Broche horizontale. L'axe Z est horizontal.

Dans les 2 cas, la fraise est perpendiculaire à la table qui se trouve positionnée de façon différente. Dans les cas les broches horizontales il y a une meilleure évacuation des copeaux, et du liquide de lubrification sinon peut s'accumuler dans les parties creuses (communément appelées baignoire).



Figure I.19: Fraiseuse à 3 axes [12]

- Fraiseuse 4 axes :

C'est souvent une fraiseuse 3 axes broche horizontale dotée d'un plateau tournant. C'est une configuration très pratique en production industrielle mécanique (Automobile Aviation etc...).

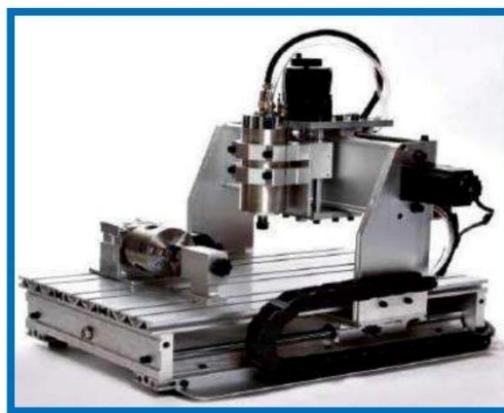


Figure I.20: Fraiseuse à 4 axes [12]

- Fraiseuse 5 axes :

On peut trouver sous cette catégorie plusieurs topologies de construction.

Une fraiseuse 5 axes comporte toujours 3 axes linéaires (X, Y, Z) et 2 axes rotatifs à choisir parmi (A, B, C).



Figure I.21:Fraiseuse à 5 axes [12]

I.6 Les paramètres de coupe :

En fraisage, déterminer les conditions de coupe revient à déterminer :

- la vitesse de coupe.
- la vitesse d'avance.
- la profondeur de passe et l'engagement de la fraise.

a- La vitesse de coupe : V_c en (m/min)

La vitesse de coupe correspond à la vitesse de l'arrêté de coupe par rapport à la pièce.

Elle est donnée par le couple outil matière, c'est-à-dire par la combinaison du matériau de l'outil et de la pièce. On la note V_c et s'exprime en m/min.

$$V_c = \pi D N / 1000 \quad (1.1)$$

- V_c : en m/ min.
- D : Diamètre du foret, de la pièce, de la fraise exprimée en mètre.
- N : Fréquence de rotation de la broche en tr/ min.

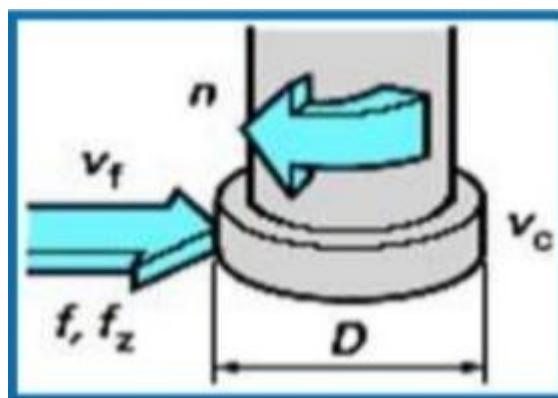


Figure I.22:La vitesse de coupe V_c [13]

b- Fréquence de rotation de la broche : N (tr/min)

La vitesse de coupe permet de déterminer la vitesse de rotation de la broche.

On la note N en tr/min.

$$N = 1000 * Vc / \pi D \quad (1.2)$$

C- Vitesse d'avance : V_f (mm/min)

La vitesse d'avance correspond à la vitesse d'avance de l'outil sur la trajectoire d'usinage. On note V_f la vitesse d'avance en mm/min. En fonction du matériau à usiner, le constructeur d'outil préconise une vitesse d'avance par tour et par dent. La vitesse d'avance V_f en mm/min est donnée par :

$$V_f = N \cdot f_z \cdot Z \quad (1.3)$$

Avec :

- Z : le nombre de dents de la fraise.
- f_z : Avance par tour.
- N : Fréquence de rotation de la broche.

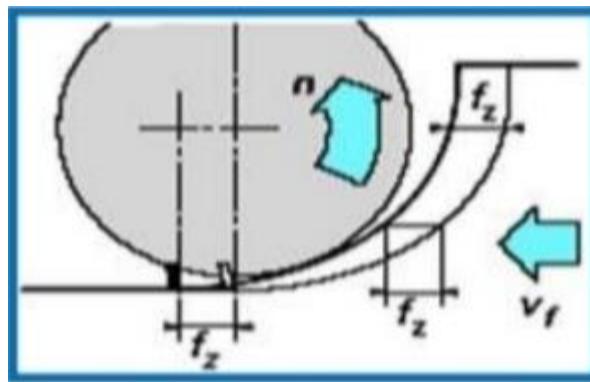


Figure I.23: La vitesse d'avance V_f [13]

c- Avance par tour (f) :

Il s'agit d'un paramètre qui exprime la distance parcourue par la fraise le long de la circonférence de la pièce pendant un tour complet de l'outil de fraisage. Ce paramètre est généralement exprimé en millimètres par tour (mm/tour) et permet de déterminer la quantité de matière enlevée à chaque passage de la fraise. L'avance par tour dépend des facteurs suivants :

- Diamètre de l'outil.
- Fréquence de rotation de la broche.
- Le nombre de dents de l'outil de fraisage.
- La profondeur de la passe.

e- Avance par dent (f_z) :

Il s'agit d'un paramètre qui exprime la distance parcourue par la fraise le long l'axe de la pièce pour chaque dent de l'outil en contact avec la matière à enlever. Ce paramètre est généralement exprimé en millimètres par dent (mm/dent) et permet de déterminer la quantité de matière enlevée à chaque passage de dent.

L'avance par dent est obtenue par la formule ci-dessous :

$$f_z = V_f / Z \cdot n \quad (1.4)$$

Où :

- V_f : vitesse d'avance.
- Z : nombre de dents.
- n : fréquence de rotation de la broche.

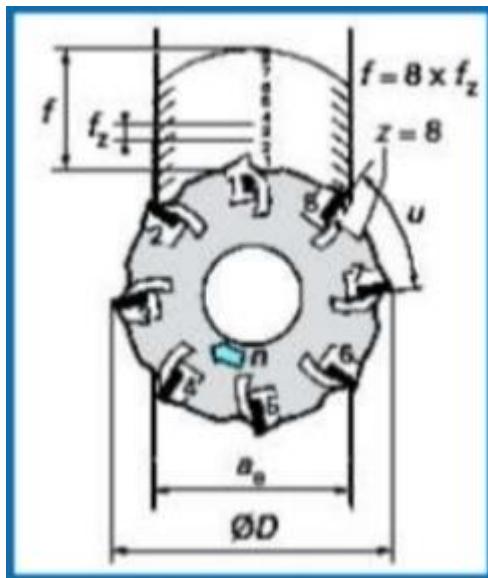


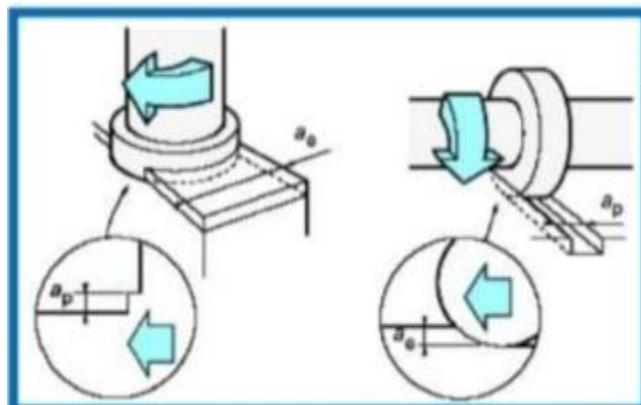
Figure I.24: L'avance par dent f_z [13]

f- Profondeur de la passe (ap) :

La profondeur de la passe exprime la longueur de l'arête de coupe déjà pénétrée dans la matière. Ce paramètre est généralement exprimé en millimètres et influence directement l'enlèvement de la matière ainsi que la durée et la qualité de l'opération de fraisage. Il est important de rappeler que la profondeur de passe est mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance. Le choix de ce paramètre d'usinage est crucial et dépend de plusieurs facteurs :

- Capacité de la fraiseuse
- Propriétés mécaniques de la pièce à usiner et l'outil de fraisage
- Les exigences de finition

Ce paramètre doit être choisi de manière à garantir un enlèvement de matière efficace sans développement de phénomène de vibrations excessives qui engendre une usure prématuée de l'outil et des défauts de surface.

**Figure I.25:Profondeur de passe ap [13]**

I.8 Lubrification et fraisage à sec ou à lubrification minimale (MQL) :

La lubrification est un aspect crucial du fraisage, un processus d'usinage où des outils coupants retirent de la matière d'une pièce. Dans le fraisage à sec, l'absence de lubrifiant peut entraîner une augmentation de la température et une usure prématuée des outils, ce qui affecte la qualité de la pièce usinée. En revanche, la lubrification minimale utilise de petites quantités de lubrifiant pour réduire le frottement et la chaleur sans inonder la pièce d'usinage. Cette méthode présente plusieurs avantages, tels que la réduction des coûts de nettoyage et une empreinte environnementale moindre. Des études montrent que la lubrification minimale peut améliorer la durée de vie des outils et la qualité de surface tout en maintenant une productivité élevée (Kumar et al., 2020 ; Smith, 2021). Ainsi, le choix entre fraisage à sec et lubrification minimale dépend des exigences spécifiques de l'application et des matériaux traité.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé de manière générale l'usinage par enlèvement de matière. Nous avons d'abord détaillé les diverses techniques d'usinage, en décrivent les opérations et les outils ainsi associées à chacune, et nous avons également présenté les paramètres et les efforts de coupe, avant de nous focaliser plus particulièrement sur le fraisage. Ce procédé de fraisage a servi d'introduction notre travail.

Chapitre II :

Les modèles associées à la coupe des métaux

II.1 Introduction :

La température de coupe, générée à l'interface outil-copeau, est le facteur le plus influant sur l'usinabilité des métaux [14].

L'évaluation de la température dans ces zones est essentielle, car elle influence directement la fragilisation et l'usure des outils de coupe. En effet, dans les régions de frottement où deux matériaux entrent en contact, la répartition du flux thermique devient un facteur clé.

II.2 La coupe des métaux :

La coupe est l'interaction entre l'outil et la pièce à usiner, il en résulte de se contactent des résidus (déchets) appelés copeaux. Au contact de l'outil en mouvement et la pièce brute où semi-finie, commence l'écoulement du copeau.



Figure II.1: Observations de la coupe des métaux (d'après Tresca et Mallock) [15]

II.3 La formation du copeau en coupe orthogonale :

La coupe (Formation du copeau) est un processus physiques complexe qui s'accompagne de déformation plastiques et élastiques. Elle donne lieu à un frottement important (outil- pièce), au dégagement de chaleur, à la formation d'une arrêt rapportée (copeau adhérant 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. La formation du copeau est un phénomène de déformation élastique et plastique (compression) de la couche cisaiillée.

Quand l'outil entre en contact avec la couche superficielle de la pièce, l'avance de celui-ci provoque une forte compression de la matière et génère un cisaillement intense entre la pointe de l'outil et la surface de la pièce.

Lors de la découpe orthogonale du graphite, trois formations de copeaux sont identifiées : des copeaux semi-continus à faible profondeur, des copeaux de particules concassées à des profondeurs modérées et des copeaux en blocs fracturés à des profondeurs plus élevées, chacun présentant des caractéristiques distinctes en termes de distribution granulométrique et de fractographie de surface.

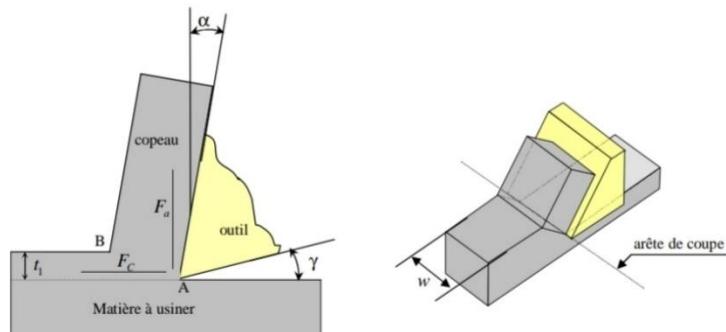


Figure II.2: La coupe orthogonale [16]

II.3.1 Les zones de cisaillement :

Les mécanismes à l'origine de la formation du copeau sont globalement similaires d'un procédé d'usinage à un autre. À l'échelle d'une arête élémentaire de l'outil (en discrétilisant son arête de coupe), le copeau résulte d'une opération de coupe, qu'elle soit orthogonale ou oblique. Sous l'effet de l'arête de coupe, le matériau de la pièce est soumis à une pression intense, entraînant une déformation plastique dans une zone spécifique, appelée zone de cisaillement primaire.

La zone de cisaillement primaire : Appelé aussi zone immédiate de déformation du copeau, Cette dernière s'étend de la pointe de l'outil jusqu'à la surface libre du copeau. Dans cette zone, les déformations atteignent des valeurs élevées, comprises entre 200 % et 300 %, tandis que les vitesses de déformation varient entre 10^2 s^{-1} et 10^6 s^{-1} .

La température peut également dépasser les 300 °C. La zone de cisaillement primaire est le lieu où l'écoulement du matériau subit un changement brutal, passant de la vitesse de coupe V à la vitesse du copeau V_c . Dans la littérature, plusieurs modèles, représentent cette zone sous la forme d'un plan incliné d'un certain angle de cisaillement par rapport à la direction de coupe, ou encore sous la forme d'une fine bande d'épaisseur constante h .

À mesure que l'outil progresse, le matériau de la pièce se déforme pour former le copeau, qui s'écoule le long de la face de coupe. La pression de contact, combinée au frottement à l'interface outil-copeau, provoque une déformation plastique supplémentaire à proximité de la pointe de l'outil, dans une zone appelée zone de cisaillement secondaire.

La zone de cisaillement secondaire : Appelé aussi zone d'écrouissage du copeau, Cette zone est soumise à des températures extrêmement élevées, pouvant approcher la température de fusion du matériau usiné. Elle joue un rôle majeur dans l'usure prématuée de l'outil et présente une épaisseur pouvant atteindre 10 % de celle du copeau déformé.

La zone de cisaillement tertiaire : Correspond à la région où la pièce subit un écrouissage. C'est une zone caractérisée par le frottement et le glissement entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée. Ce phénomène engendre une usure au niveau de la dépouille en raison du retour élastique de la matière après le passage de la pointe de l'outil. Des irrégularités d'écoulement peuvent ainsi apparaître à cet endroit.

Par ailleurs, il est important de distinguer les types de coupe en fonction de l'orientation du mouvement de coupe par rapport à l'arête tranchante. On parle de coupe orthogonale lorsque l'arête de coupe est perpendiculaire à la vitesse de coupe. En revanche, la coupe oblique désigne le cas plus général où cet angle n'est pas droit.[17]

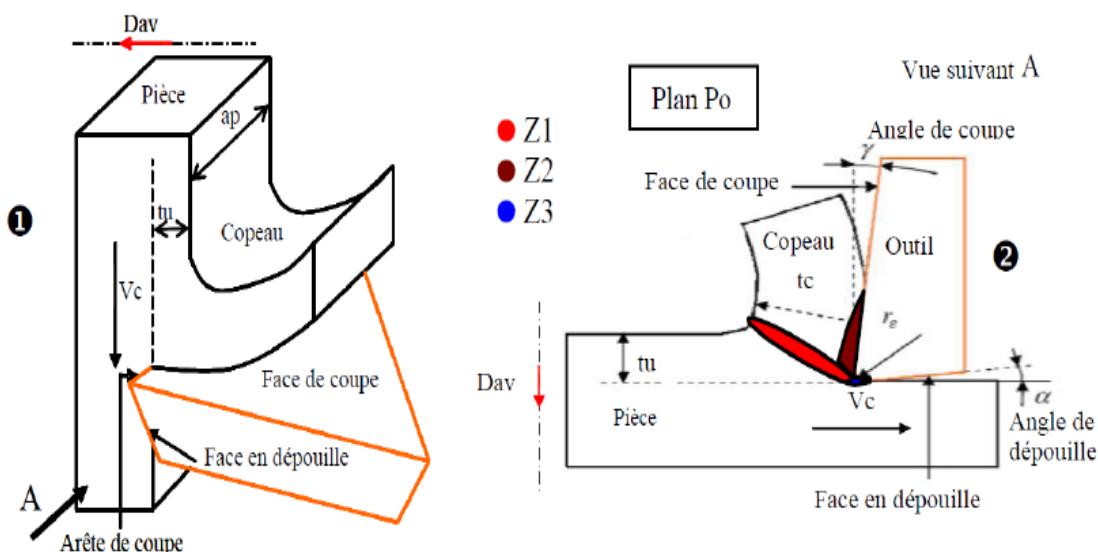


Figure II.3: Trois zones principales de sollicitations sévères peuvent être distinguées lors de l'usinage [18]

II.4 L'usinage à grande vitesse : (UGV)

L'usinage à grande vitesse (UGV) est une technique d'usinage qui utilise des vitesses de coupe élevées pour améliorer l'efficacité et la qualité des processus de fabrication. Cette méthode est souvent appliquée dans le fraisage, le tournage et le perçage, et elle permet de réduire le temps de cycle tout en améliorant la précision dimensionnelle et la finition de surface des pièces usinées.

Le principe de l'UGV s'articule autour d'utilisation des vitesses de rotation des outils de coupe beaucoup plus élevées que celles utilisées dans l'usinage conventionnel. Cela permet de réduire la force de coupe, ce qui diminue l'usure de l'outil.

Les outils utilisés sont souvent fabriqués à partir de matériaux avancés comme le carbure ou les céramiques, qui peuvent résister à des températures élevées générées par la friction.

L'UGV favorise une meilleure évacuation des copeaux, réduisant ainsi le risque de surchauffe et d'accumulation de débris sur la pièce usinée.

Parmi les avantages d'usinage à grande vitesse on a :

- Productivité Accrue : Les temps de cycle sont réduits, ce qui permet de produire plus de pièces en moins de temps.
- Qualité Supérieure : La finition de surface est généralement meilleure, ce qui réduit le besoin de traitements supplémentaires.
- Durée de Vie des Outils : Les outils ont tendance à durer plus longtemps en raison de la réduction de l'usure.
- La chaleur générée lors de la coupe est principalement évacuée par les copeaux (environ 80%).
- Réduire la transmission de chaleur à la pièce et à l'outil.

L'usinage à grande vitesse représente une avancée significative dans le domaine de la fabrication, offrant des avantages en termes de productivité, de qualité et de durabilité des outils. Sa mise en œuvre nécessite cependant des machines et des outils adaptés, ainsi qu'une formation appropriée pour les opérateurs.[19]

II.5 L'usinage à sec :

L'usinage à sec est une méthode de fabrication où les opérations d'usinage sont effectuées sans l'utilisation de lubrifiants ou de fluides de coupe. Cette technique est souvent utilisée dans des applications où la réduction de la contamination, la propreté du processus et l'efficacité énergétique sont des priorités.

Le principe de l'usinage à sec à l'absence de lubrification - Contrairement aux méthodes conventionnelles qui utilisent des fluides de coupe pour refroidir et lubrifier l'outil et la pièce, l'usinage à sec s'effectue sans ces substances. Les conditions de coupe doivent être soigneusement contrôlées pour éviter la surchauffe de l'outil et de la pièce, car l'absence de lubrification augmente la friction, et les outils utilisés pour l'usinage à sec sont souvent fabriqués à partir de matériaux résistants à l'usure, comme le carbone ou la céramique, capables de supporter des températures élevées.



Figure II.4: Usinage à sec

II.6 La température de coupe et ses effets :

II.6.1 La température de coupe :

Les zones de déformation du copeau et de contact entre le copeau et l'outil étant relativement limitées, cela entraîne de fortes variations de température dans les volumes directement exposés à la chaleur dégagée. Selon les études de Boothroyd, le gradient thermique dans l'outil peut atteindre $800^{\circ}\text{C}/\text{mm}$. Dans ces conditions, il est difficile de déterminer une température de coupe précise. C'est pourquoi, en général, la température de coupe est définie comme une valeur moyenne du champ thermique dans une zone particulièrement sollicitée, comme l'interface outil/copeau [20].

II.6.2 Effets de la température de coupe :

La température de coupe, surtout lorsqu'elle est élevée a des effets néfastes tant sur l'outil de coupe que sur la pièce usinée. Concernant l'outil de coupe, ces effets indésirables sont :

- Une usure accrue, entraînant une diminution de la durée de vie de l'outil.
- Une déformation plastique des arêtes de coupe, particulièrement si le matériau de l'outil manque de dureté suffisante.
- Endommagement aux arêtes de coupe provoqué par des chocs thermiques.
- Formation de l'arête rapportée.

II.6.3 Phénomènes thermiques pendant la coupe :

Deux phénomènes distincts sont responsables du dégagement de chaleur lors de l'usinage :

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

La déformation plastique concerne l'ensemble du volume du copeau, tandis que le frottement se limite aux surfaces en contact et en mouvement relatif, notamment lors de l'écoulement du copeau le long de la face d'attaque de l'outil. De plus, le frottement entre la pièce usinée et les bords des surfaces en dépouille, près de l'arête tranchante, peut aussi contribuer à l'augmentation de la température de l'outil.

L'expérience de Joules est connue pour convertir complètement l'énergie de la friction en chaleur. D'un autre côté, le cas de la déformation plastique est plus compliqué. En fait, toutes les déformations modifient l'état physique (décomposition) d'un métal, entraînant une augmentation de son énergie interne. En théorie, cette énergie peut être retournée lorsqu'un métal est renvoyé de son état annoncé à son état cristallin. Seule une partie de l'énergie mécanique requise pour la déformation est stockée sous forme d'énergie interne, et le reste est rapidement converti en chaleur.

Par conséquent, la charge principale est de déterminer quel pourcentage d'énergie de déformation mécanique est convertie en chaleur et quelles pièces sont stockées sous la forme de l'énergie interne du métal de noix.

En particulier, les recherches de Taylor montrent que l'énergie stockée dans le métal de noix ne représente qu'une petite partie de l'énergie totale de déformation, qui convertit rapidement la majorité en chaleur. Ces conclusions ont été confirmées par de nombreuses études récentes [21].

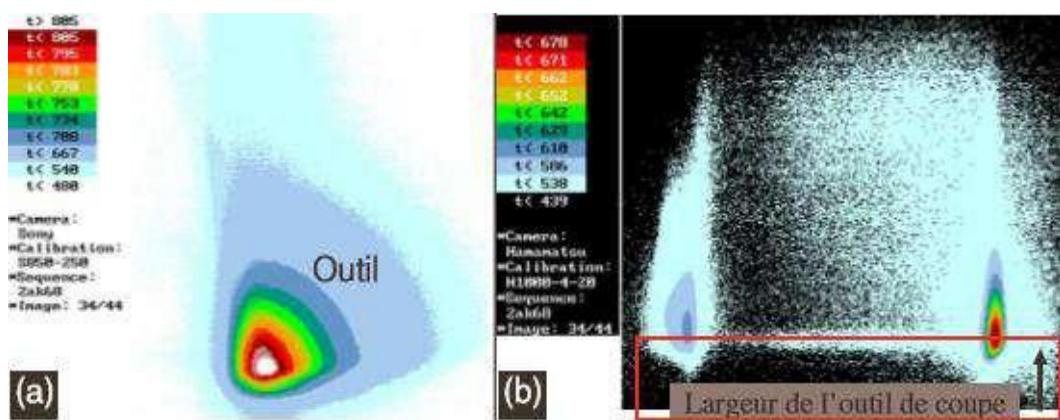


Figure II.5: Exemple de cartographies thermiques face latérale d'outil, face de coupe [21]

II.6.4 Méthodes de mesure de la température de coupe :

On suppose que la plupart des performances mécaniques seront converties en sortie thermique pendant le traitement. Le cisaillement (primaire, secondaire et tertiaire) produit par la coupe est un siège dans la production de chaleur. La chaleur ainsi produite est dissipée de manière inégale dans la pièce, l'outil de coupe, le copeau, tandis qu'une faible quantité est évacuée dans l'air.

L'analyse de la température de zones de coupe est extrêmes compliquée et difficile. En fait, le gradient thermique fort et le mouvement de divers antagonistes (pièces, outils, copeau) nécessitent un système de mesure de la température qui prend en compte toutes façons de retourner les températures de pointe pour les outils (mesurant la hauteur de la température).

II.6.4.1 Les méthodes analytiques :

Plusieurs méthodes analytiques existent pour calculer la température de coupe. Parmi elles, la méthode de N. Cook est notable : elle se base sur une analyse dimensionnelle dérivée et utilise des données expérimentales obtenues pour divers matériaux d'usinage. Cette méthode permet de prédire l'augmentation de la température à l'interface entre la pièce et l'outil lors de l'usinage, en tenant compte des conditions spécifiques du processus.

$$T = \frac{0.4U}{\rho C} \left(\frac{Vt_0}{K} \right)^{0.333}$$

T représente l'élévation de température à l'interface entre la pièce et l'outil, exprimée en degrés Celsius (°C) ou Fahrenheit (°F). U correspond à l'énergie spécifique, mesurée en newton-mètre par millimètre cube (N.m/mm³) ou en joules par millimètre cube (J/mm³). La vitesse de coupe est notée v, tandis que to désigne l'épaisseur de la pièce avant la coupe, exprimée en mètres (m).

La capacité calorifique volumétrique du matériau est symbolisée par ρC et exprimée en joules par millimètre cube (J/mm³). Enfin, K représente la diffusivité thermique du matériau, mesurée en mètres carrés par seconde (m²/s). Ces paramètres sont essentiels pour le calcul précis de la température générée lors de l'usinage. [2]

II.6.4.2 Les méthodes expérimentales :

a. Mesures sans contact :

1- Pyrométrie optique :

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) émis par ce corps.

L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination des températures sans contact par les objets. Par conséquent, si les conditions expérimentales ne permettent pas d'utiliser des capteurs de température traditionnels, il s'agit d'une méthode appropriée [21].

- Mesures à grande distance.
- Environnement très agressif.
- Pièce en mouvement.
- Localisation des points chauds.

**Figure II.6: Pyrométrie optique****2- Caméra thermique :**

Le recours aux caméras thermiques pour la mesure de température est une technique ancienne, mais qui demeure toujours pertinente aujourd’hui. La thermographie se caractérise par quatre principales propriétés :

- Une cadence d’acquisition très rapide.
- Une résolution spatiale et thermique élevée.
- La capacité à fournir une cartographie thermique complète de la zone observée, permettant ainsi de localiser facilement les points chauds durant l’usinage.
- Une nature non intrusive, puisqu’elle réalise des mesures sans contact et de manière passive.

**Figure II.7: Caméra thermique**

b. Mesures avec contact :

Plusieurs méthodes de mesure thermique avec contact existent et sont aujourd’hui couramment employées tant dans la recherche que dans l’industrie.

1- Vernis et peinture thermosensibles

Cette technique consiste à transformer l’outil en vernis thermocollée. La couleur change à partir d’une température spécifique. La frontière entre les deux couleurs de vernis est l’isotherme qui correspond à la température du changement de couleur. Trouver des hotspots à travers les appareils est une approche globale, mais l’étalonnage est une méthode ennuyeuse et discontinue [22].

2- Thermocouples :

Pour mesurer des températures élevées, la première méthode croit en l’utilisation d’éléments thermiques. Cette méthode consiste à placer les éléments thermo aussi près que possible du secteur de l’analyse demandée en y perçant des trous.

Les mesures de température utilisant thermiques sont basées sur les principes suivants : lorsque deux métaux sont soudés sur les bords, l’une des coutures de soudure est exposée à une température particulière, l’autre est maintenue à une température différente et une force électrique apparaît entre les deux transitions. Cette force peut déterminer la température mesurée, car sa résistance dépend du matériau utilisé.

Les éléments thermo présentent plusieurs avantages, notamment la simplicité de conception, la flexibilité d’utilisation et le faible cout, ce qui les rend adaptés aux mesures de température actuelles. Il existe une variété de types avec les thermos éléments standard les plus étendus et les éléments thermiques dynamiques.



Figure II.8: Thermocouple

II.7 Formulation des modèles :

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

- Lagrangienne (Lagrangian).
- Eulérienne (Eulerian).
- Lagrangien-Eulérienne arbitraire (Arbitray Lagrangian- Eulerian).

II.7.1 Approche Lagrangienne :

L'approche Lagrange est basée sur des explications matérielles, c'est-à-dire liées à la matière. Cette approche fait bouger les points de la grille discrétisé à la même vitesse, toujours connectée au matériau. Les caractéristiques de la rivière telles que la vitesse et la pression sont calculées également de manière identique à chaque point en fonction du développement du processus.

Cette méthode présente certains avantages pour examiner les problèmes de coupe. En particulier, il simplifie le traitement des limites des limites sur les surfaces libres, permettant des variables connectées aux particules liquides. Cependant, nous présentons deux principaux défis.

Traitement et séparation des puces des principales déformations. En fait, les déformations locales conduisent à des distorsions considérables dans le réseau qui nécessitent des techniques spécifiques telles que la suppression et l'utilisation de points pré-dessinés. De plus, la séparation des puces nécessite un contrôle strict à mesure que de nouveaux bords gratuits ont été créés. Malgré ces défis, l'approche de Lagrange permet efficacement le processus de coupe, quel que soit l'hospitalisation (astuce séquentielle) ou la référence (réduction de réduction) [23].

II.7.2 Approche Eulérienne :

Cette approche met en évidence la zone de chambre fixe à travers laquelle le matériau circule. Étant donné que l'application de la coupe à la coupe est connectée à l'administration de la surface libre, une représentation plus ou moins détaillée de la géométrie initiale de la puce peut recevoir le flux de patients hospitalisés sur la puce continue. La gestion de ces surfaces est définie pour imposer des composants normaux sur la surface libre de la pièce et des puces avec des vitesses nulles et des limitations normales négatives sur l'interface de contact.

Ce type d'approche permet une analyse des effets de divers paramètres de processus sur la formation de puces continues. Par exemple, Kim, Lee et Sin expliquent : Effets de profondeur de chemin, vitesse de coupe et outils de champ de déformation, limitations et températures obtenues.

Votre modèle de plastique Thermo Visco est vérifié en comparant les efforts mesurés expérimentalement avec les travaux de simulations.

II.7.3 Approche Lagrangien-Eulérienne arbitraire (ALE) :

Cette approche constitue un compromis entre les méthodes eulérienne et lagrangienne. Elle repose sur l'utilisation d'un maillage mobile, partiellement indépendant des points matériels. De manière générale, le maillage adopte une approche lagrangienne, notamment lorsque sa frontière doit suivre la surface du domaine occupé par la matière. Cependant, une certaine flexibilité est introduite dans le déplacement des nœuds internes. Cette dissociation entre le maillage et la matière permet d'éviter les problèmes de distorsion.

II.8 Maillage :

Le réseau initial d'éléments finis (EFS) peut perdre la forme et se détériorer en raison des effets de la déformation plastique pendant les métaux de coupe ou éducatifs. La non-linéarité crée des distorsions et provoque des erreurs numériques. Pour résoudre ce problème, de nouvelles blessures par coup de couteau doivent être générées en adaptant la taille, un processus appelé réseaux adaptatifs. L'une des méthodes de maillage adaptative est entièrement supprimée et existe pour créer de nouveaux points EF qui remplacent la personne détruite. Une autre approche appelée raffinement est basée sur une augmentation des réseaux locaux denses en réduisant la taille des éléments associés, comme illustré dans la figure (II.9). [24]

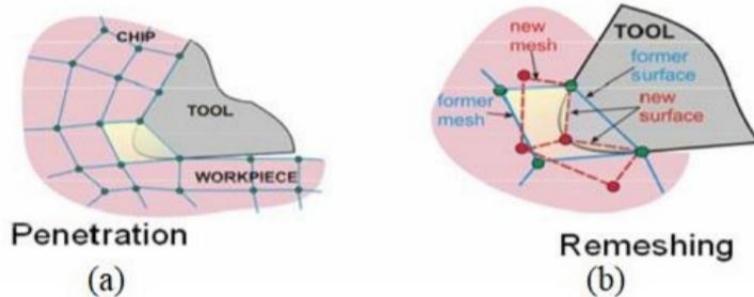


Figure II.9: Exemple de cartographies thermiques face latérale d'outil, face de coupe [24]

II.9 Les modèles de comportement :

La phénoménologie de la formation du copeau soumet le matériau à des conditions de déformations, vitesses de déformation et d'échauffement extrêmes. D'après Courbon (2011), la loi de comportement doit être à minima capable de décrire la sensibilité de la contrainte d'écoulement à la déformation, la vitesse de déformation et à la température. La formulation d'une loi de comportement implique une définition d'un critère de plasticité. Pour un matériau métallique incompressible et isotrope, le critère de von mises reste le plus utilisé. Il permet de ramener un état de contrainte triaxial à un état de contrainte uniaxial équivalent σ^y .

Il importe donc de quantifier l'évolution de σ^y en fonction des déformations, vitesses de déformation et température par l'intermédiaire d'une loi d'écoulement.

II.9.1 Loi d'Oxley :

Oxley (1963) propose une loi d'écoulement de type puissance dépendant de la déformation plastique équivalente, de la vitesse de déformation plastique équivalente et de la température du matériau écrite comme suit :

$$\sigma^y = \sigma_1 (T_{mod}) \varepsilon^p^n (T_{mod}) \quad (2.1)$$

Où σ^y est la contrainte d'écoulement du matériau, ε^p est la déformation plastique équivalente et T_{mod} est la température modifiée par la vitesse de déformation du matériau, $\sigma_1 (T_{mod})$ est la contrainte pour une déformation $\varepsilon^p = 1$ et $n (T_{mod})$ est le coefficient d'écrouissage du matériau. La température modifiée T_{mod} est définie par MacGregor & Fisher (1946) comme suit :

$$T_{mod} = T \left(1 - \theta \log \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \quad (2.2)$$

Où θ et ε_0 des constantes du matériau. [25]

II.9.2 Loi de Johnson et Cook :

Suite à une campagne expérimentale sur quelques matériaux (acières bas et moyen carbone, aluminium, titane, laiton, cuivre, tungstène, etc.), Johnson et Cook (1983) constatent que la

contrainte d'écoulement des différents matériaux dépendent de la déformation, de la vitesse de déformation et de la température du matériau suivant l'équation :

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right] \quad (2.3)$$

Où σ^y est la contrainte d'écoulement du matériau, la déformation plastique équivalente, la vitesse de déformation plastique équivalente, est la vitesse de déformation de référence, T est la température de la pièce usinée, T_0 est la température initiale ou ambiante de la pièce et T_m est la température de fusion du matériau à usiner. La constante A est la limite d'élasticité du matériau, B est le module d'écrouissage, C'est le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, n est le coefficient d'écrouissage, m est le coefficient d'adoucissement thermique.[25]

II.9.3 Modèle de Zerilli-Armstrong :

Le modèle de Zerilli-Armstrong (1987), largement adopté dans l'étude du mouvement des dislocations dans les matériaux, propose une expression de la contrainte d'écoulement en fonction de plusieurs paramètres : la déformation plastique équivalente, la vitesse de déformation, la température, le diamètre moyen des grains et la structure cristallographique du matériau.

Pour un matériau à structure cubique à faces centrées, cette relation est donnée par :

$$\sigma = ((C_0 + C_2 \bar{\varepsilon}^p) \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \bar{\varepsilon}^p)) \quad (2.4)$$

Une autre forme de l'équation constitutive spécifique aux matériaux cubiques à faces centrées est la suivante :

$$\sigma = C_0 + C_1 \exp(-C_3 + C_4 T \ln \bar{\varepsilon}^p) + C_5 \ln \bar{\varepsilon}^p^n \quad (2.5)$$

Dans ces expressions, représente une composante de la contrainte liée à la densité de dislocations influençant l'écoulement. Les coefficients à sont des constantes caractéristiques du matériau, et désigne la température absolue.[25]

Chapitre III :

**Simulation numérique de la
distribution de la chaleur à
l'interface pièce /outil**

Et l'étude expérimentale

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

III.1 Introduction :

La simulation numérique par éléments finis est un outil puissant qui permet d'analyser et résoudre les problèmes complexes en ingénierie en fournissant des solutions approchées fiables et exploitables pour la conception et l'optimisation des systèmes physiques.

Cette méthode est largement utilisée dans l'ingénierie pour anticiper des produits sans fabrication physique, réduire les coûts et les prototypes, et optimiser la conception. Elle nécessite cependant une bonne compréhension des hypothèses et limites du modèle, ainsi qu'une validation rigoureuse des résultats, notamment par la vérification de la convergence du maillage et la cohérence physique des solutions [26].

Dans ce chapitre, nous allons modéliser et simuler en 3D la géométrie de l'outil ainsi que la formation du copeau lors d'une opération de surface en fraisage à sec de l'acier XC48, en utilisant le logiciel de conception assistée par ordinateur SolidWorks (CAO). La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Ansys/Explicit selon la méthode des éléments finis. La loi de comportement de Johnson-Cook a été utilisée pour évaluer la distribution de la température à l'interface outil-copeau. La chaleur générée par le frottement entre l'outil et la pièce influence de manière significative la durée de vie de l'outil. Par conséquent, il est crucial d'étudier cette variation thermique afin d'optimiser les conditions de coupe et de prolonger la durée de vie de l'outil.

III.2 La conception avec SolidWorks :

La modélisation 3D avec SolidWorks permet une grande flexibilité dans l'approche, tout en nécessitant un soin particulier lors de la finalisation du modèle pour en assurer la cohérence et la qualité.

III.2.1 Les étapes de conception :

1- **Plan d'esquisse :** Plan de face.

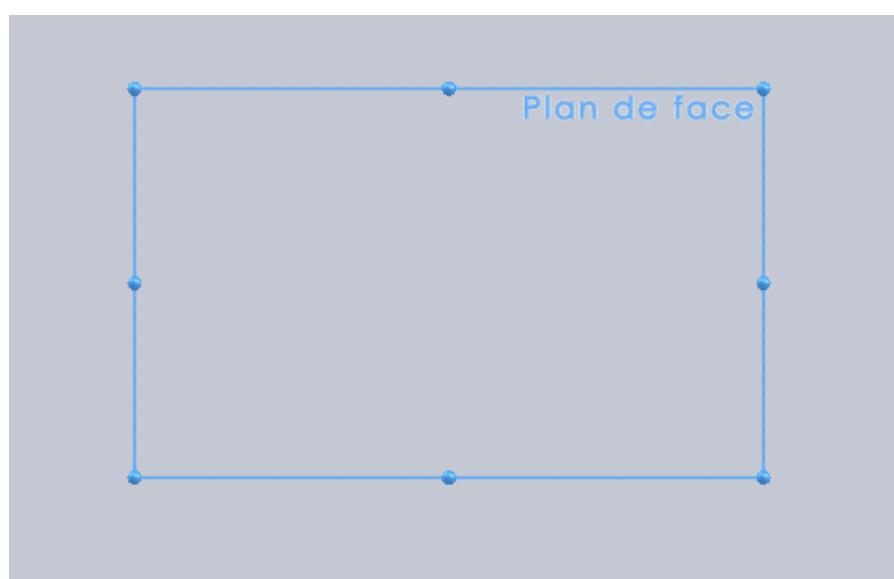


Figure III.1: Plan de face

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

2- Esquisse 2D : Dessiner la forme de base de la pièce.

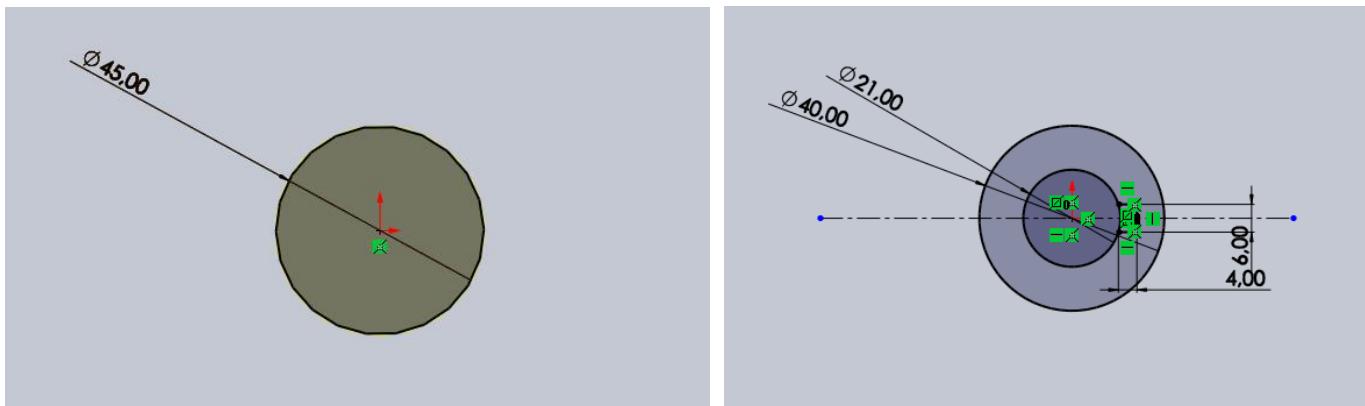


Figure III.2 : Esquisse 2D

3- Modélisation 3D : Transformer l'esquisse 2D en volume 3D par des fonctions.

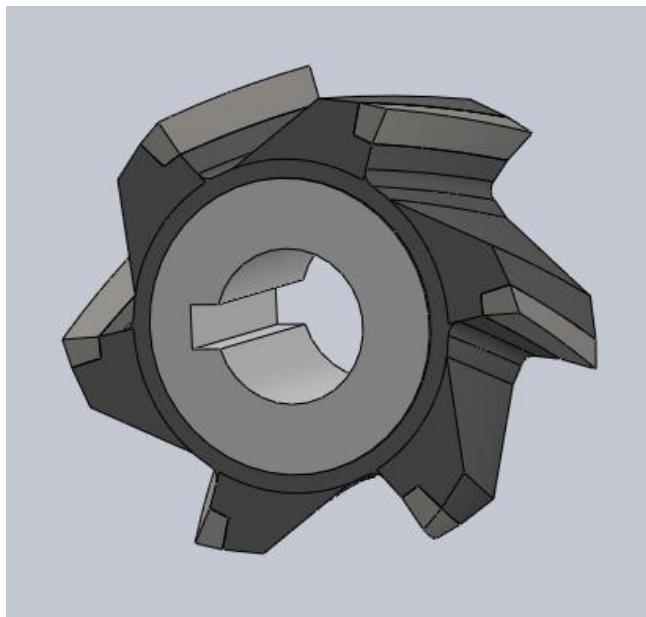


Figure III.3: Modélisation 3D d'outil

III.2.2 Assemblage :

L'assemblage mécanique réussi nécessite une attention particulière aux détails, une bonne planification et l'utilisation des bonnes méthodes et outils. Cela garantit non seulement la fonctionnalité mais aussi la durabilité des machines assemblées. Permet une grande flexibilité dans l'approche, tout en nécessitant un soin particulier lors de la finalisation du modèle pour en assurer la cohérence et la qualité.

Nous pouvons réaliser le processus d'assemblage selon les étapes ci-dessous :

- Création d'un nouveau document d'assemblage.
- Placez les pièces dans l'espace de travail en les déplaçant librement avant de les contraintes.

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

- Utilisez des contraintes telles que coïncidence, concentricité, parallélisme, distance, angle, ct, pour définir les relations géométriques entre les pièces et assurer leur positionnement correct et leur mobilité contrôlée.

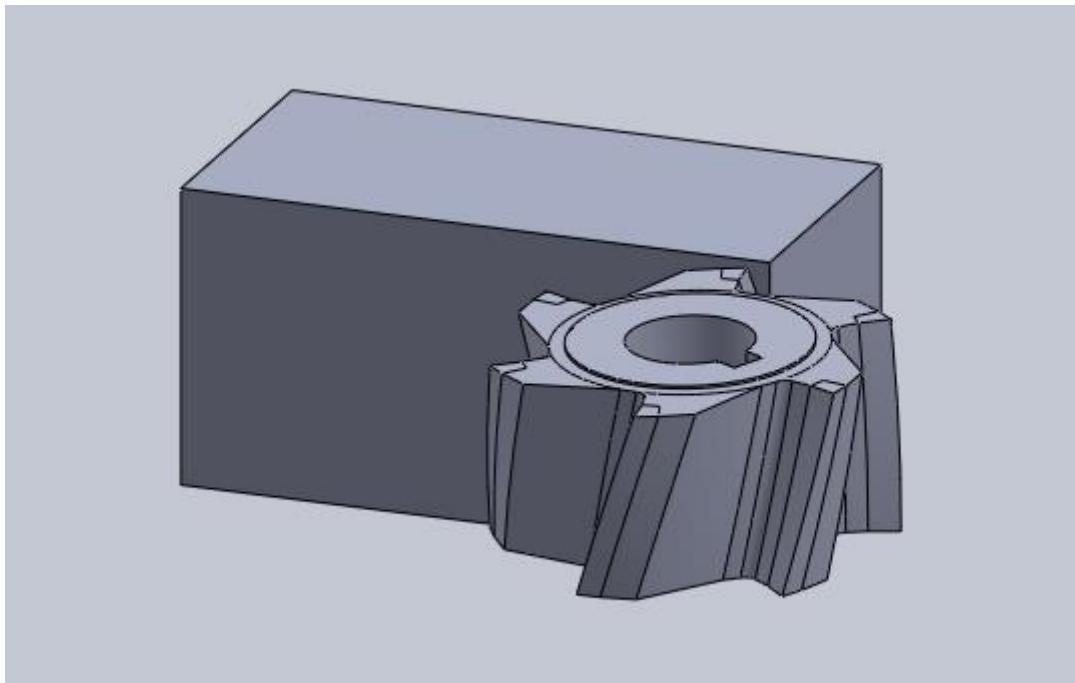


Figure III.4: Assemblage Pièce-outil

III.3 La modélisation numérique :

III.3.1 Les domaines de modélisation :

a- Domaine Statique :

Dans ce domaine, l'accélération, l'angle de coupe et le facteur temporel ne sont pas pris en compte. Cependant, la section de coupe varie avec le temps, et les efforts de coupe évoluent en fonction de l'épaisseur du matériau, tout en étant également influencés par l'angle de coupe. La modélisation dans ce contexte peut être appliquée au tournage, où la section reste constante durant la coupe, contrairement au fraisage.

b- Domaine Quasi-Statique :

Les modélisations de ce domaine prennent en considération la section réelle du copeau. Elles intègrent les hypothèses de rigidité relatives à l'outil et à la pièce, mais ne tiennent pas compte des conditions environnantes de la machine, notamment le comportement vibratoire du système Pièce-outil-Machine. La caractérisation de ce système se fait dans le domaine fréquentiel.

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

c- Domaine Dynamique :

Dans ce domaine, les incrément de temps sont très rapprochés, et l'analyse prend en compte l'accélération, la masse et l'amortissement du système Pièce-Outil-Machine.

III.3.2 Le modèle numérique :

Les modèles numériques de simulation de l'usinage ont déjà été développés grâce au logiciel d'éléments finis ANSYS, en intégrant la loi de Johnson-Cook [27]. Pour réaliser une modélisation efficace de l'usinage, il est indispensable de considérer plusieurs paramètres clés. Notre objectif est de simuler, par éléments finis, la formation du copeau. Par la suite, nous avons optimisé notre modèle en ajustant les dimensions des différents composants afin d'améliorer la précision des résultats. La procédure suivante décrit les étapes à suivre pour simuler en 3D l'opération de fraisage de l'acier XC48 avec ANSYS.

III.3.3 La dynamique explicite :

ANSYS Explicite est un logiciel de simulation numérique spécialisé dans l'analyse dynamique et non linéaire des structures et des matériaux. Contrairement aux méthodes implicites, ANSYS Explicite utilise des méthodes de calcul explicites pour résoudre des problèmes complexes, notamment ceux impliquant des événements transitoires rapides, tels que les impacts, les explosions, ou les déformations plastiques.

III.4 Critère d'endommagement de Johnson-Cook :

Le critère d'endommagement de Johnson-Cook [28] est un modèle fréquemment utilisé pour anticiper la rupture ductile des matériaux métalliques soumis à de fortes déformations, à des vitesses de déformation élevées ainsi qu'à des variations de température. Ce critère, associé à la loi de comportement de Johnson-Cook, intègre trois paramètres essentiels : la contrainte équivalente, la vitesse de déformation et la température, qu'elle soit ambiante, de transition ou proche du point de fusion du matériau.

$$\varepsilon_f = \left(D_2 + D_2 \exp D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 + D_5 \frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right) \quad (3.1)$$

Où :

D1, D2, D3, D4, D5 : Sont les contraintes matérielles spécifiques au modèle d'endommagement Johnson-Cook.

ε_f : La déformation équivalente à rupture du matériau.

σ_m : La contrainte moyenne.

σ_{eq} : La contrainte équivalente de Von Mises.

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

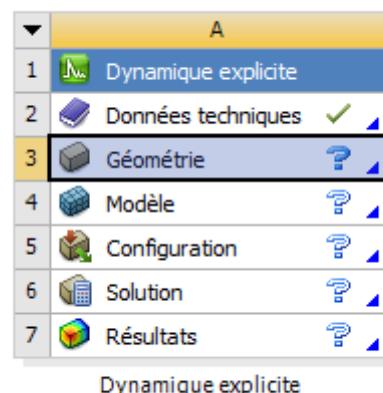
III.5 Partie I : Simulation Numérique

III.5.1 La simulation de problème avec ANSYS :

Le logiciel d'éléments finis ANSYS 21 R2 est utilisé dans cette étude pour simuler le comportement du contact avec frottement entre deux corps (pièce et outil de coupe) lors d'une opération de fraisage. Ce code intègre des algorithmes avancés de gestion du contact avec frottement, reposant sur la méthode des multiplicateurs de Lagrange ou sur une approche de Lagrangien augmenté, permettant de modéliser précisément les interactions mécaniques à l'interface des deux solides. La création du modèle dans ANSYS Workbench constitue une étape essentielle, où il convient de sélectionner l'analyse dynamique explicite afin d'adapter la résolution au caractère transitoire et non linéaire du contact avec frottement entre la pièce et l'outil.

III.5.2 Les étapes de simulation :

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



III.5.3 Les données techniques :

Les données techniques du matériau peuvent être sélectionnées directement depuis la bibliothèque intégrée du logiciel Ansys, ou bien un nouveau matériau peut être créé manuellement et ajouté à cette bibliothèque, comme illustré dans l'exemple suivant :

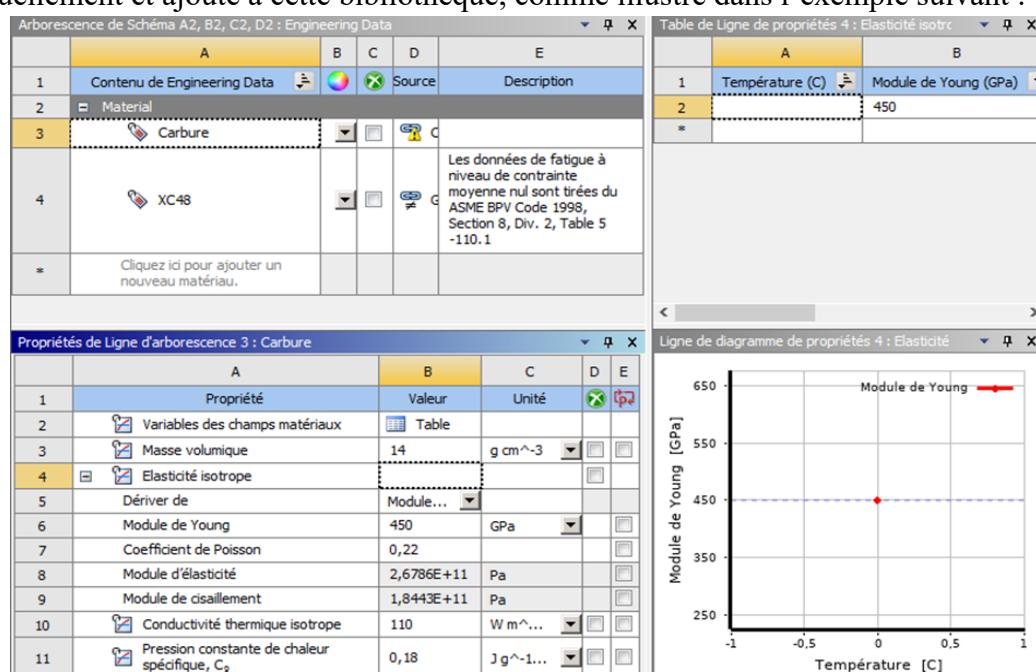


Figure III.5 : Bibliothèque des données technique

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

III.5.4 La Géométrie :

Notre étude porte sur la modélisation numérique des différentes étapes du fraisage périphérique de l'acier XC48 à l'aide d'une fraise en carbure. Dans ce modèle, la fraise est considérée comme totalement rigide, tandis que la pièce usinée est flexible. Les propriétés thermomécaniques, incluant la plasticité et l'endommagement, sont décrites par le modèle de Johnson-Cook et intégrées dans la simulation. Le contact entre la fraise et la pièce prend en compte ces caractéristiques thermomécaniques, avec une température ambiante de 20 °C.

Le coefficient de frottement outil- pièce est estimé à $\mu=0.4$ dynamique et $\mu=0.1$ statique. Nous avons opté pour une approche lagrangienne afin de simuler le procédé, car elle permet de reproduire de manière réaliste le comportement du fraisage, notamment la formation et la déformation du copeau le long de la pièce.

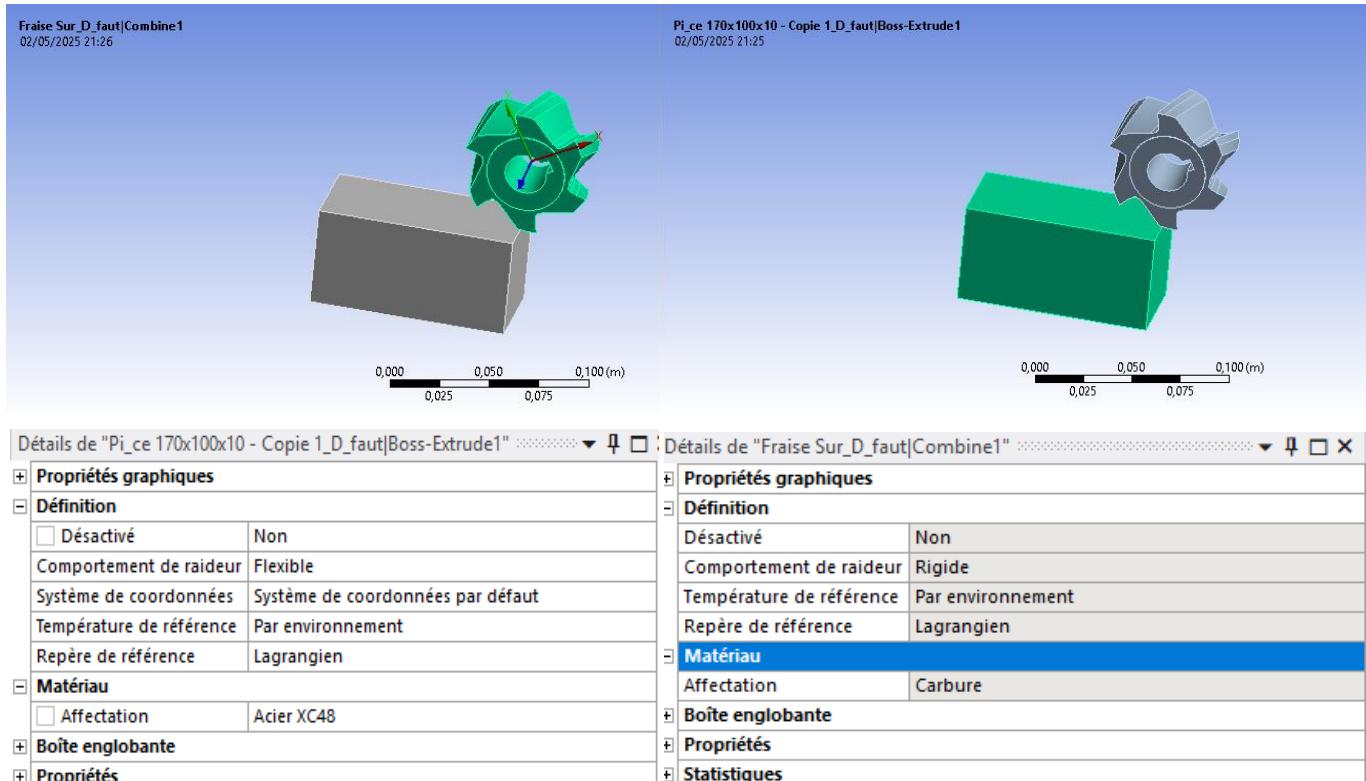


Figure III.6: Les propriétés graphiques de l'outil et la pièce

a- Les tableaux suivants donnent les paramètres et les critères de la loi de Johnson-Cook de l'acier XC48 :[29]

A [MPa]	B [MPa]	C (-)	n (-)	m (-)	T ₀ (k)
553.1	600.8	0.0134	0.234	1	1733

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

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

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

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

b- Les propriétés physiques et mécaniques de l'outil :



Carbure



Physique	
Masse volumique	12800 kg/m ³
Structural	
▼ Elasticité isotrope	
▼ Elasticité	
Dériver de	Module de Young et coefficient de Poisson
Module de Young	8e+11 Pa
Coefficient de Poisson	0,22000
Module d'élasticité	4,7619e+11 Pa
Module de cisaillement	3,2787e+11 Pa
▼ Coefficient isotrope instantané de dilatation thermique	
Coefficient de dilatation thermique	4,9e-06 1/°C
Thermique	
▼ Conductivité thermique isotrope	
Conductivité thermique	82,000 W/m.°C
▼ Pression constante de chaleur spécifique	
Chaleur spécifique	226,00 J/kg.°C

Figure III.7: Les propriétés mécaniques et physiques de l'outil de coupe

c- Les propriétés physiques et mécanique de la pièce :



XC48



Structural	
▼ Elasticité isotrope	
▼ Elasticité	
Dériver de	Module de Young et coefficient de Poisson
Module de Young	2,1e+11 Pa
Coefficient de Poisson	0,30000
Module d'élasticité	1,75e+11 Pa
Module de cisaillement	8,0769e+10 Pa
▼ Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique	
Coefficient de dilatation thermique	1,19e-06 1/°C
Thermique	
▼ Conductivité thermique isotrope	
Conductivité thermique	47,000 W/m.°C
▼ Pression constante de chaleur spécifique	
Chaleur spécifique	432,00 J/kg.°C

Figure III.8: Les propriétés mécaniques et physiques de la pièce utilisée

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

III.5.5 Contact pièce /outil :

Ce processus comprend les étapes suivantes :

- Attribution des matériaux : L'outil définie en carbure tandis que la pièce en acier XC48.
- Définition des repères : Les systèmes de coordonnées global et local sont mis en place.
- Paramétrage des contacts : Les connexions sont établies en spécifiant les coefficients de frottement pour modéliser l'interaction entre la pièce et l'outil.
- Dernière étape est le maillage.

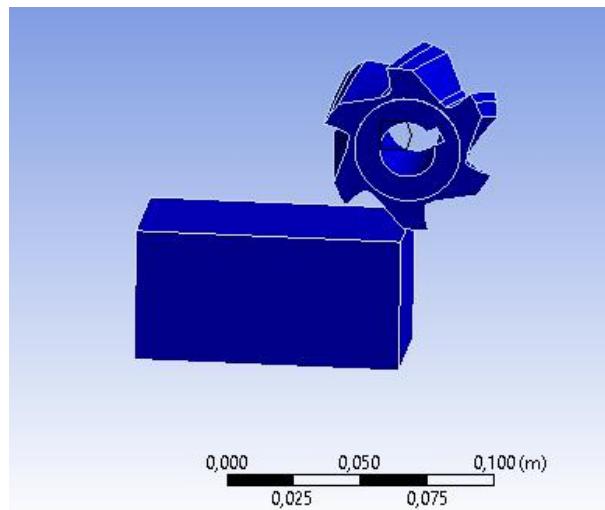


Figure III.9: Ensemble pièce-outil

a- Système de coordonnées :

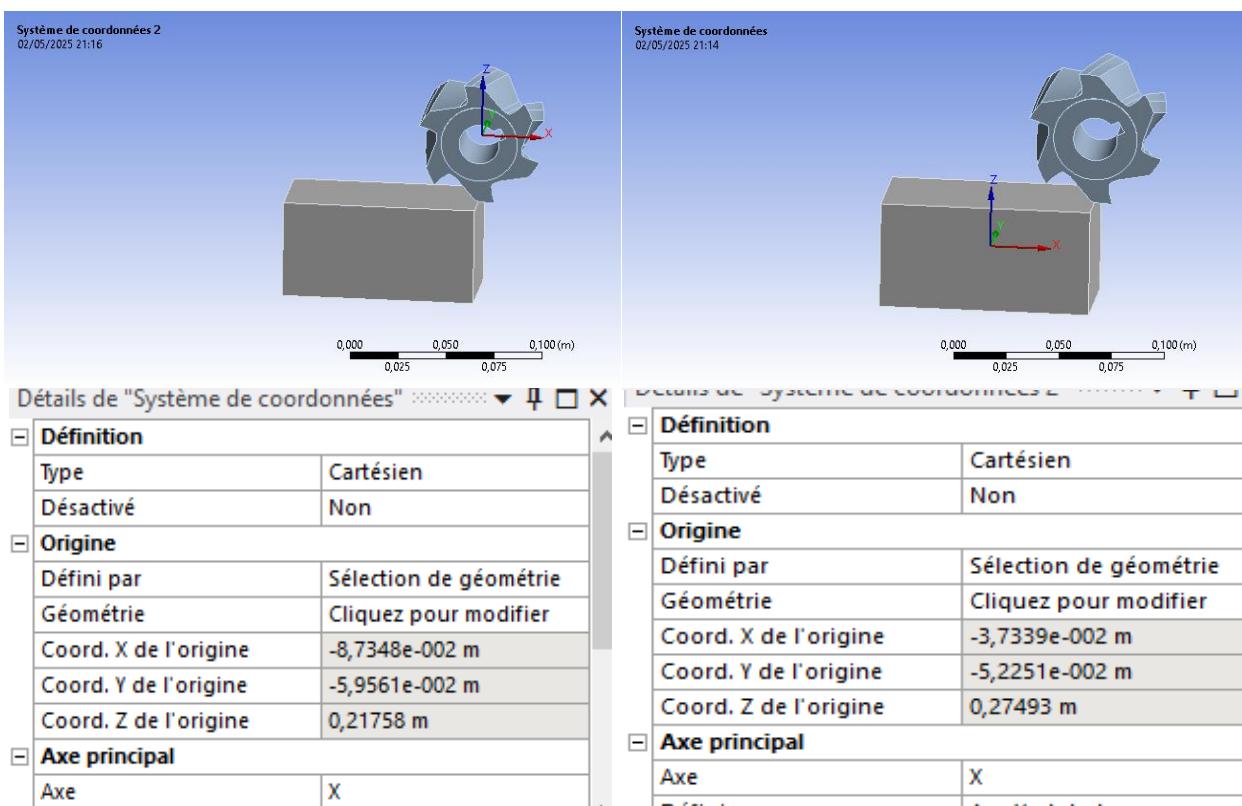


Figure III.10: Système de coordonnées

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

b- Les conditions initiales aux limites :

Les conditions initiales aux limites thermiques sont définies comme suit :

$$T(x, y, z, 0) = T_{\infty}$$

$$-k \frac{\delta T}{\delta \eta} = h (T - T_{\infty})$$

La condition de contact outil/ pièce

$$-k \frac{\delta T}{\delta \eta} = \begin{cases} Wn & 0 < t < t_c \\ 0 & t > t_c \end{cases}$$

Avec :

T : Température ($^{\circ}\text{C}$),

k : Conductivité thermique (W/m K),

c : Chaleur spécifique (J/kg K).

c- Maillage :

Une fois la structure modélisée, l'étape suivante consiste à générer le maillage. La pièce est maillée avec des éléments hexaédriques structurés, tandis que l'outil est discréteisé avec des éléments tétraédriques non structurés adaptés à sa géométrie complexe.

Le maillage structuré convient bien aux formes simples, car il est précis et demande peu de temps de calcul. Le maillage non structuré, quant à lui, s'adapte facilement aux formes complexes. Combiner ces deux types de maillage est un bon choix pour réaliser une simulation mécanique réaliste, comme dans le cas d'une analyse de contact, d'impact ou d'usure entre deux pièces.

L'outil de coupe est modélisé à l'aide de 49 125 éléments et 14 932 nœuds. Un couplage thermomécanique est intégré dans la simulation afin d'anticiper l'élévation de température lors de la coupe, avant la réalisation de l'expérience réelle.

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

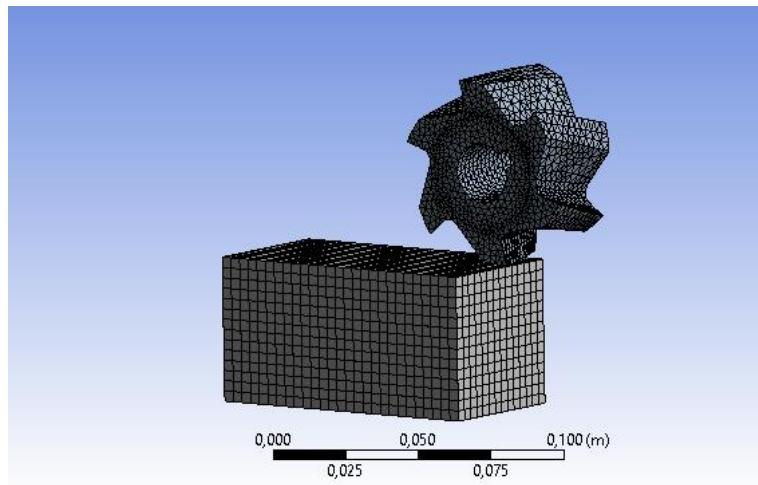


Figure III.11: Génération de maillage

d- Contact :

La figure suivante montre le contact avec frottement entre deux corps pièce/outil. Le bloc rouge représente la pièce à usiner, définie comme corps de contact, tandis que la fraise dentée bleue correspond à l'outil de coupe, défini comme corps cible. Ce contact prend en compte les effets du frottement, ce qui permet de simuler de manière réaliste les interactions mécaniques entre les deux pièces, notamment les forces de coupe, la résistance au glissement et l'échauffement local. Cette configuration est essentielle pour prédire avec précision le comportement thermomécanique du système avant toute expérimentation réelle.

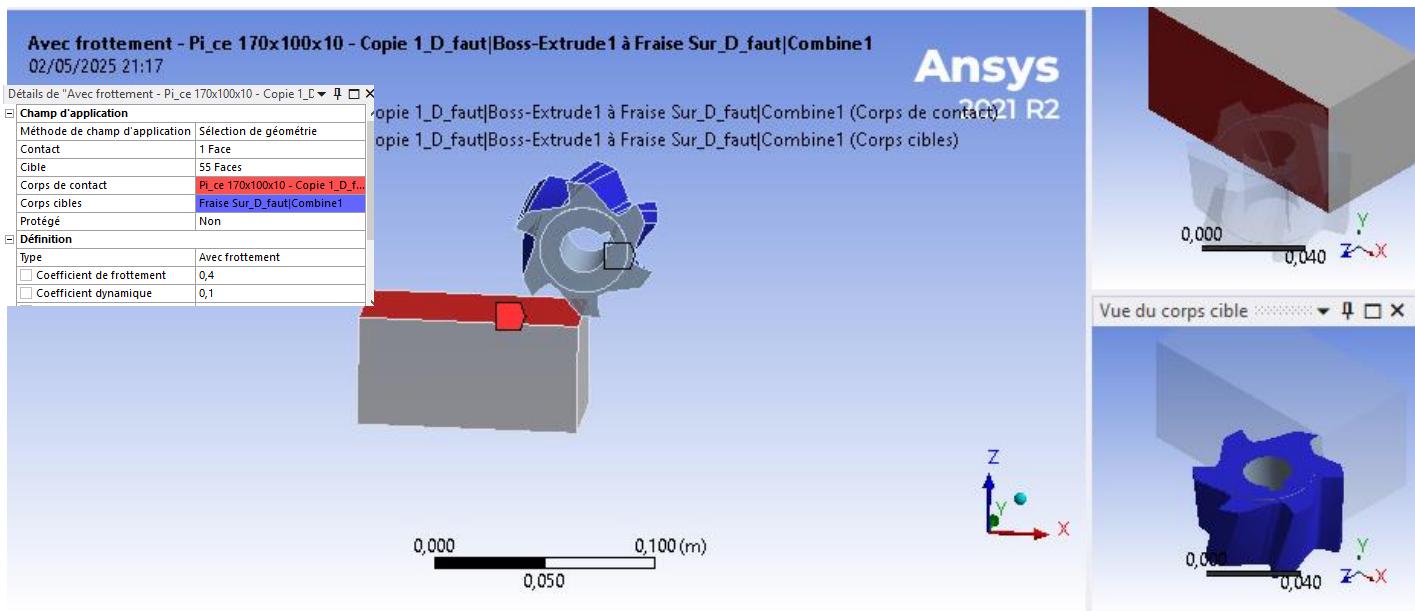


Figure III.12: Gestion de contact

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

III.5.6 Configuration :

Dans le cadre de notre étude, cette phase se caractérise notamment par une focalisation spécifique sur les conditions initiale qui influençant le phénomène observé :

- La vitesse d'avance de la pièce
- La vitesse angulaire de la broche.
- Les déplacements.
- Réglage d'analyse : Heure de fin.

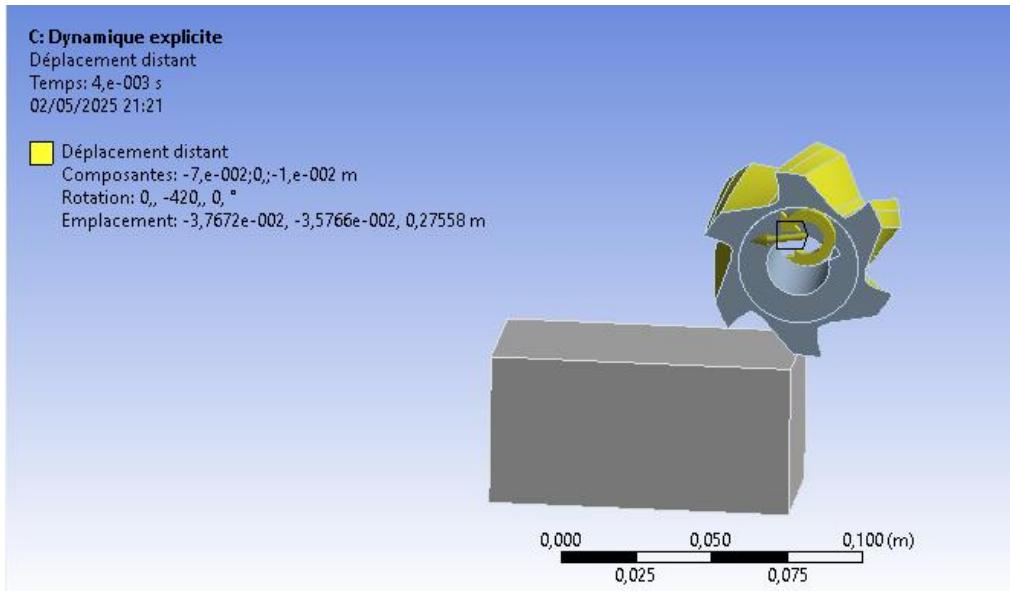


Figure III.13: Déplacement distant

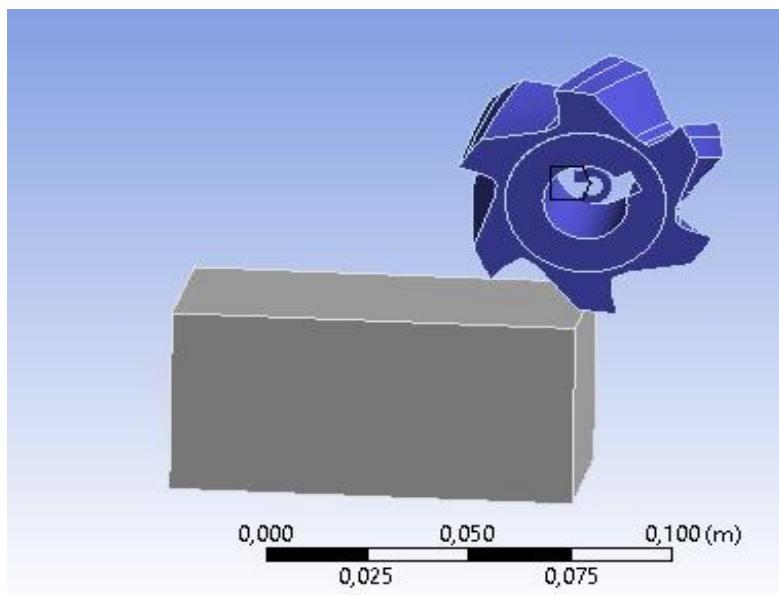


Figure III.14: Vitesse angulaire de broche

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

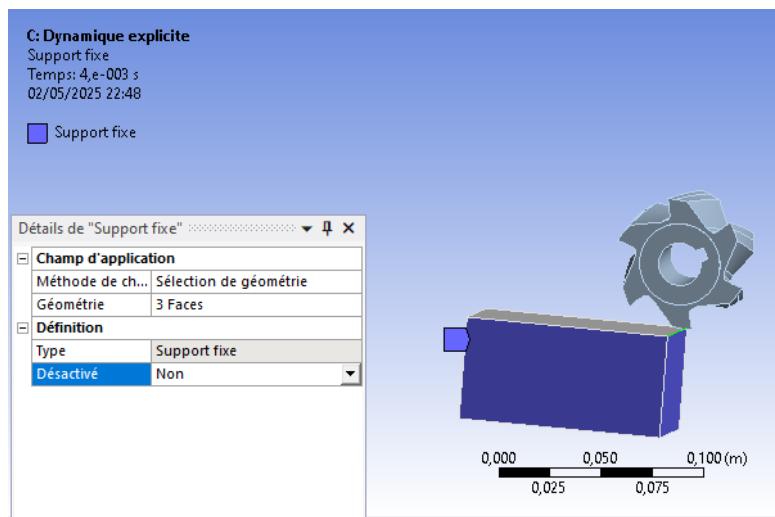


Figure III. 15: Support fixe

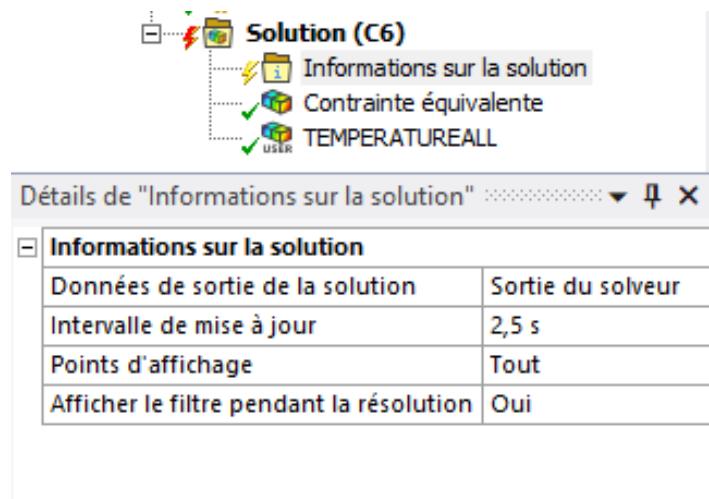


Figure III. 16: Résolution de solution

III.6 Partie II : Etude expérimentale

Dans cette partie, nous décrivons l'ensemble des matériels et outils employés dans le cadre d'une démarche expérimentale, ainsi que pour la validation des résultats obtenus par ANSYS.

Cette présentation inclut les différents équipements et appareils utilisés lors de l'opération de surfaçage par procédé de fraisage.

III.6.1 Méthode de travail :

Pour la réalisation nous citerons l'ensemble de l'opération étape par étape :

a- Découpage de matériau :

Pour faire notre expérience nous avons choisi l'acier XC48, dans cette phase on a cisaillé à l'aide d'une scie une pièce de dimensions (100x50x50).

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale



Figure III.17: Découpage par la scie

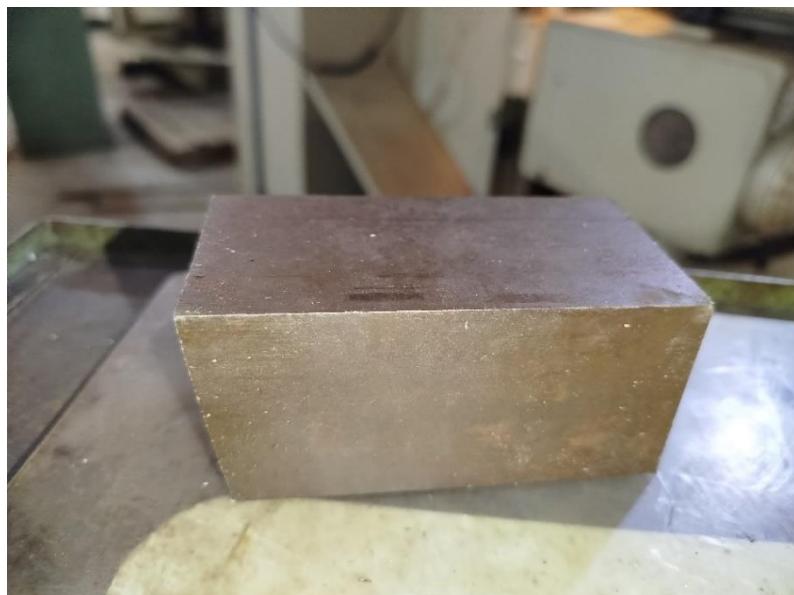


Figure III.18: Pièce coupé (100x50x50)

b- Fabrication de pièce :

- 1. La machine :** En première étape on a à adapter la machine de fraisage (Fraiseuse) pour faire l'opération de surface.

Les caractéristiques de la machine :

La machine F250x1000/2 est une fraiseuse horizontale, console comprenant deux réalisations standard, une 2tant avec table non pivotable, le FW 250x1000/2, et l'autre

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

avec table pivotable, le FU 250x1000/2.

- Fabriqué en République Démocratique Allemande.
- Le N° de fabrication : 3115/89.
- Le poids total : 2t.
- Schéma de circuit 203.10-9000 :72.
- Schéma de montage : siehe Dok.
- Gamme de température : +5...+40°C.
- Courant/ fréquence 3N.../50 HZ.
- Tension nominale : 380 V.
- Tension de commande : 220 V.
- Puissance connectée : 6.5 KW.
- Course x : 1120mm.
- Course y : 345mm.
- Course z : 400mm.
- Couple à la broche : 280 kpm.
- Plage de vitesse : 28-1400/18step tr/min.
- Avance : X/Y : 16-800 et Z : 5-250mm/min.



Figure III.19: Fraiseuse conventionnelle

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

2. **Le choix d'outil de coupe :** Nous avons choisi une fraise à disque en carbure.

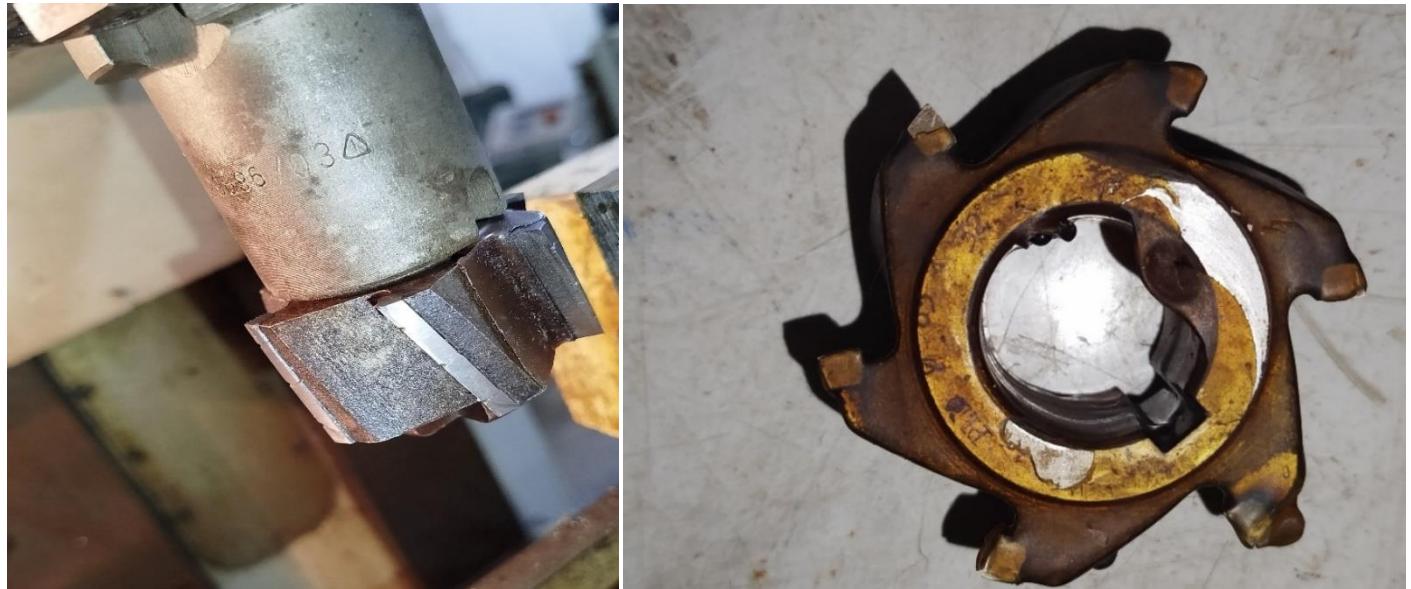


Figure III.20: Fraise de surface en carbure

3- Fixation de la pièce et de l'outil

La pièce, en acier XC48, est fixée dans un étau pour l'usinage, tandis que l'outil, en carbure, est monté dans un porte-outil.



Figure III.21 : Fixation de la pièce et de l'outil

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

4- Le choix de paramètre de coupe Lors de cette étape, la pièce a été fabriquée par usinage à grande vitesse, afin de servir de support à l'obtention des résultats expérimentaux.

5- Les paramètres utiliser sont :

La vitesse de coupe V_c en(m/min).

L'avance par tour f .

Fréquence de rotation de la broche N en (tr/min).

Profondeur de passe (ap).

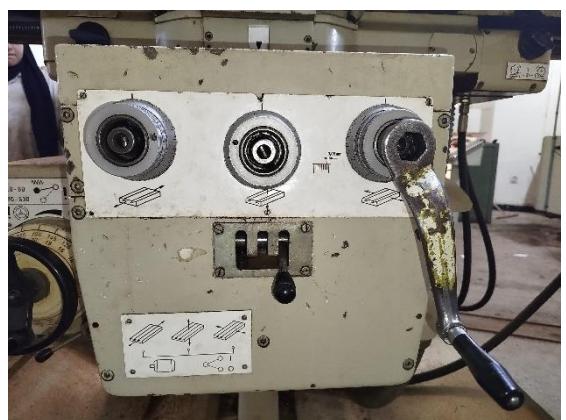


Figure III.22: Réglage de paramètres de coupe

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

6- L'opération de surfacage : On a surfacé les faces de la pièce choisi.



Figure III.23: Usinage de la pièce



Figure III.24: Pièce finie

c- Mesure de température :

Nous avons opté pour l'utilisation d'une caméra thermique afin de mesurer la température au cours de l'expérience.

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

Les propriétés de la caméra thermique :

- Écran tactile TFT compact et portable de 5 pouces (320×240 pixels). Résolution infrarouge : 120×90
- Plage de mesure de la température : -20°C à 400°C . Analyseur d'écran : 1 point / 1 rectangle alarme automatique pour haute/basse température
- Suivi automatique du point chaud/point froid Capture d'image Modes d'image : thermique, fusion, image visuelle, PIP
- Résolution de l'appareil photo numérique : 640×480 . Zoom numérique : $1,0 \sim 8x$ (zoom continu). Palettes de couleurs : 6 (blanc chaud, noir chaud, fer à repasser, arctique, médical)
- Lampe torche LED PC Analyse du logiciel) Connexion Wi-Fi via application mobile Batterie Li-ion rechargeable USB 6,35 mm Trou de montage IP54 1 m résistant aux chutes.



Figure III.25: La caméra thermique

Chapitre III : Simulation Numérique de la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil Et l'étude Expérimentale

d- **La température ambiante :** Une température de travail de 20 °C a été choisie pour la réalisation de notre expérience.

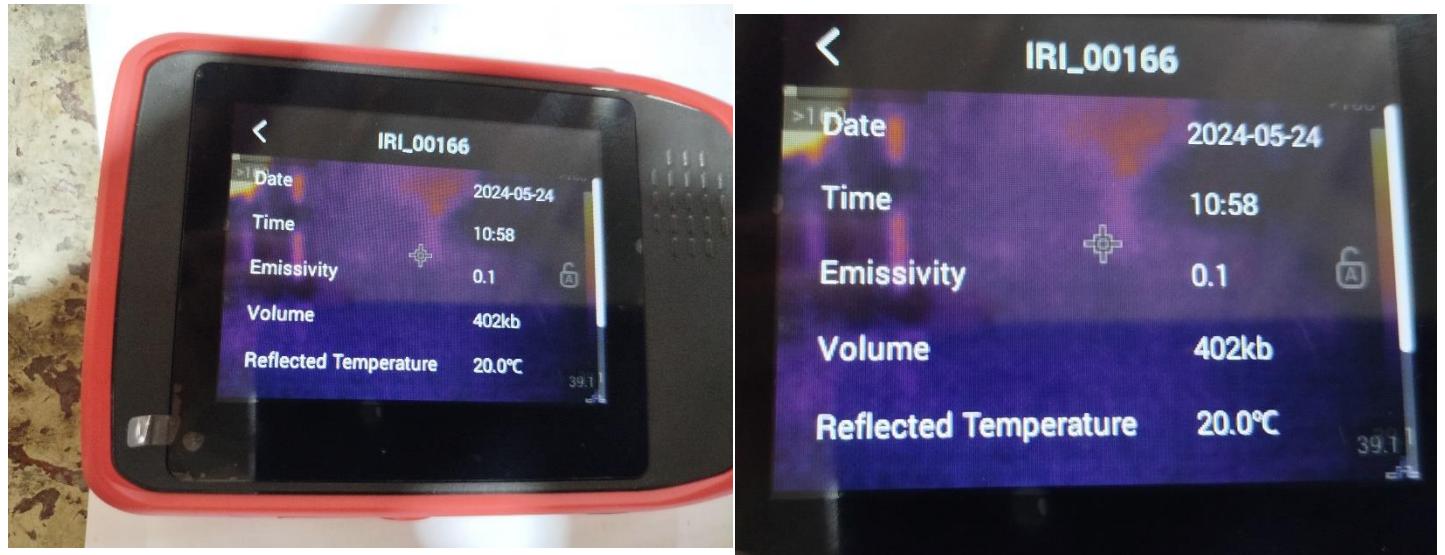


Figure III. 26: La température ambiante

Chapitre IV :

Résultats et interprétation

IV.1 Introduction :

Ce chapitre est dédié à l'analyse critique et à l'interprétation des résultats issus à la fois de la simulation numérique et de l'expérimentation. L'objectif est d'étudier la répartition des températures ainsi que les contraintes mécaniques obtenues, puis de comparer ces résultats aux données expérimentales disponibles en vue de valider le modèle utilisé.

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

Cette partie présente l'analyse de la distribution de la température à l'interface outil/pièce lors de l'usinage de l'acier XC48, en faisant varier deux paramètres fondamentaux : l'avance par dent (f_z) et la vitesse de rotation (N), qui influencent directement la vitesse de coupe (V_c). Quatre cas sont étudiés, permettant d'observer l'impact de ces paramètres sur l'élévation thermique à l'interface, ce qui est essentiel pour évaluer l'usure de l'outil et la qualité du procédé d'usinage.

1^{er} cas : $f_z = 0,01\text{mm/dt}$ et $N = 900 \text{ m/min}$

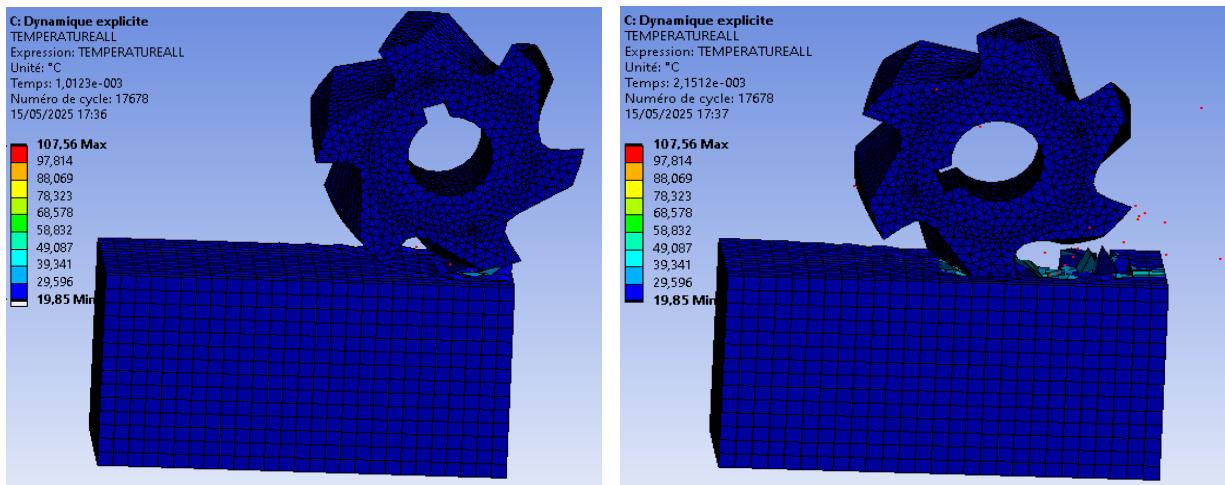


Figure IV.1: La distribution de la température à l'interface outil/ pièce ($V_c=100 \text{ m/min}$)

2^{ème} cas : $f_z = 0,02\text{mm/dt}$ et $N = 900 \text{ m/min}$

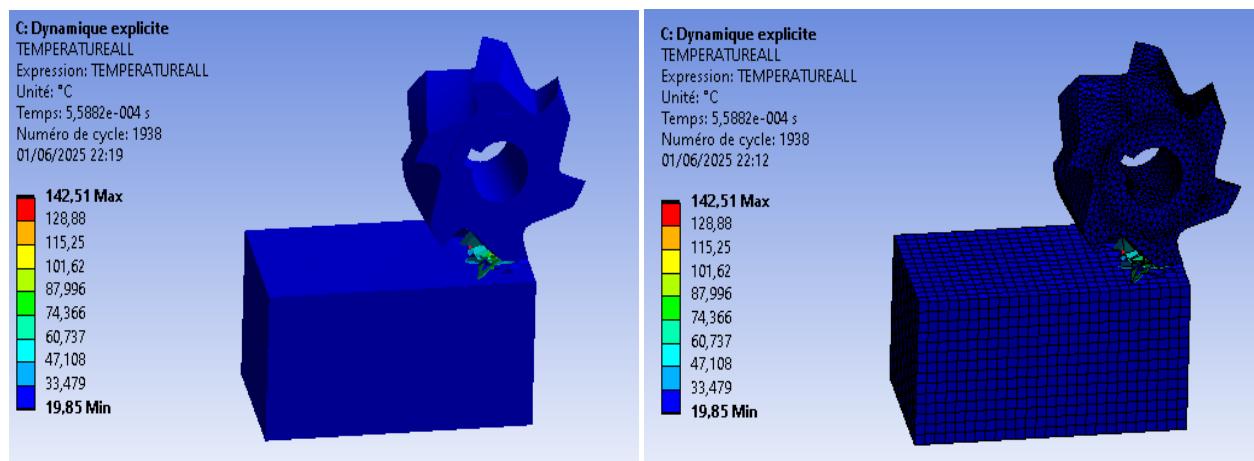


Figure IV.2:La distribution de la température à l'interface outil-pièce ($V_c= 100\text{m/min}$)

Chapitre IV :

Résultats et interprétation

3^{ème} cas : $f_z = 0,03\text{mm}/\text{dt}$ et $N = 900 \text{ m/min}$

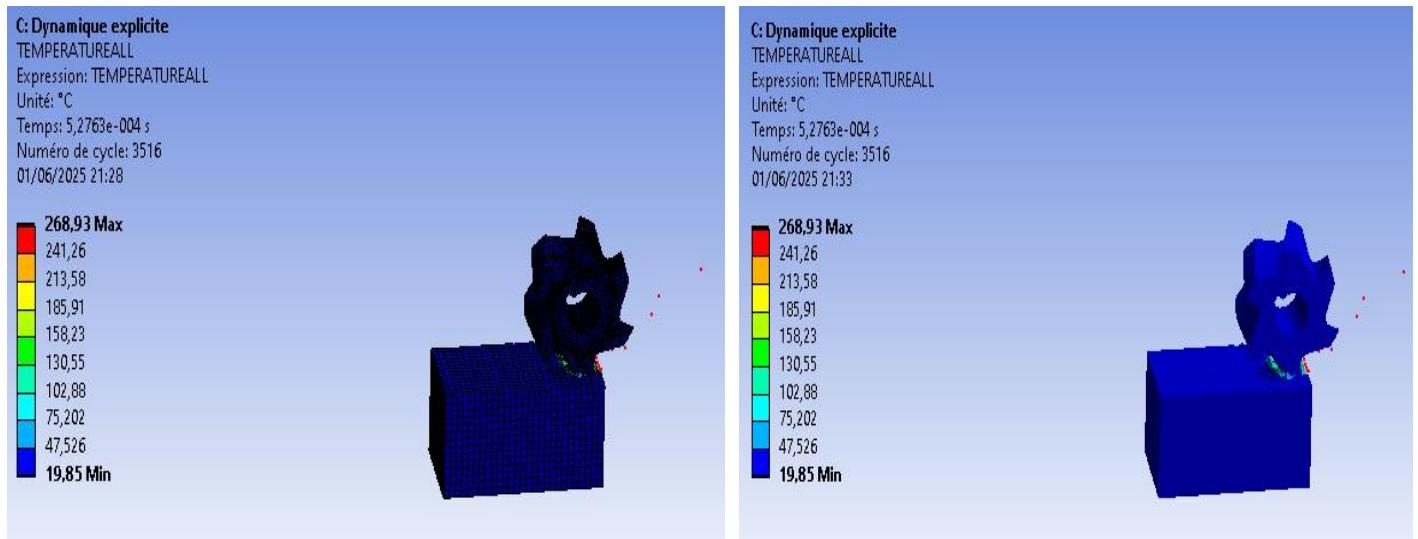


Figure IV.3: La distribution de la température à l'interface outil/pièce ($V_c = 100\text{m/min}$)

4^{ème} cas : $f_z = 0,02\text{mm}/\text{dt}$ et $N = 1120 \text{ m/min}$

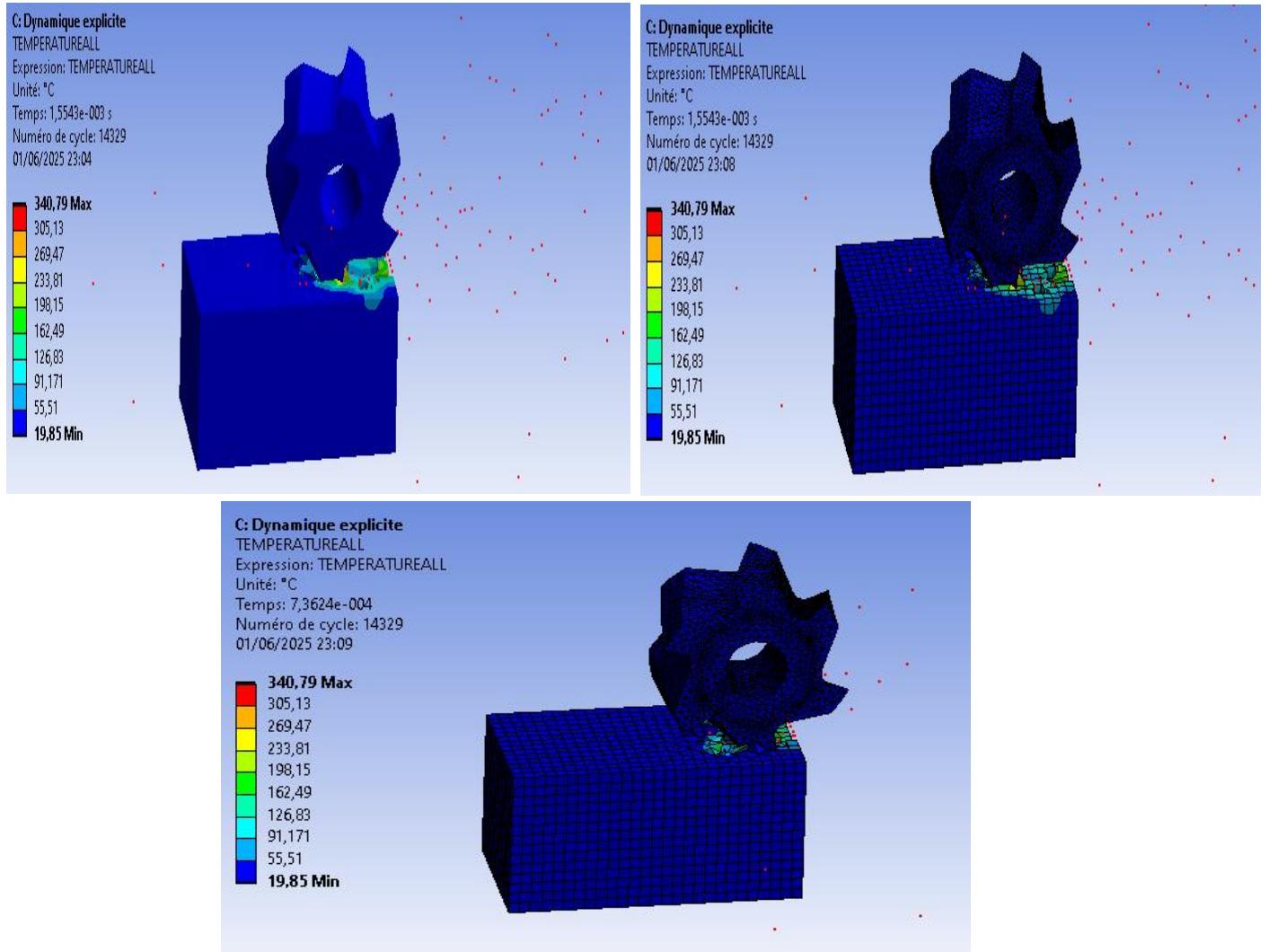


Figure IV.4: La distribution de la température à l'interface outil/pièce ($V_c = 112\text{m/min}$)

VI.3 La distribution des contraintes à l'interface outil/pièce de l'acier XC48 :

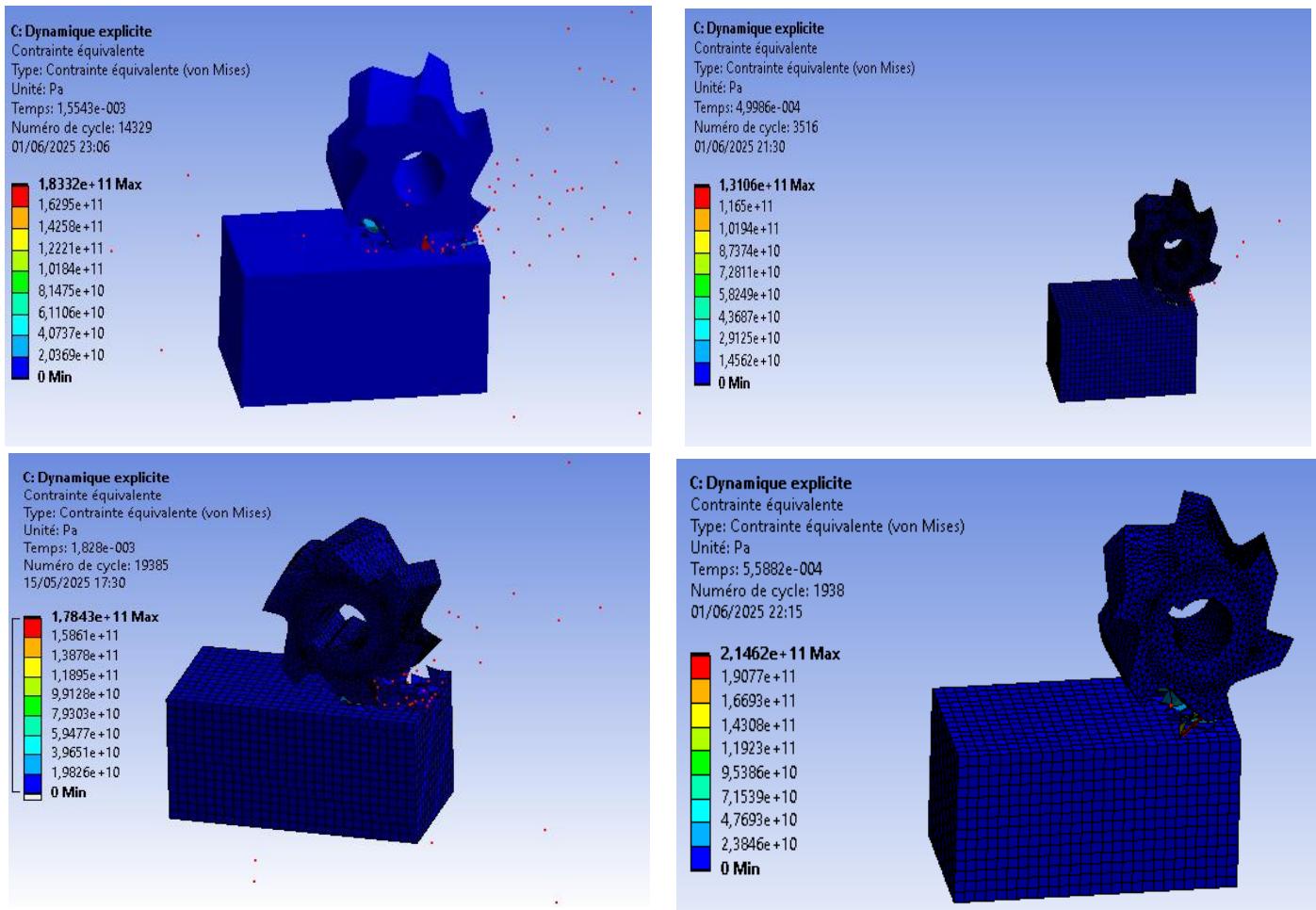


Figure IV.5: La distribution des contraintes à l'interface outil/pièce

IV.4 Discussion des résultats de la simulation numérique :

Les figures (IV.1), (IV.2), (IV.3), (IV.4), (IV.5), illustrent les résultats de simulation numérique en 3D de l'opération de fraisage.

On observe, à travers les figures (IV.1), (IV.2), (IV.3) que la température de la pièce augmente au contact de l'outil. Pour une vitesse de coupe 100m/min, avance de 0,01mm/dt la température maximale atteint $T_{max}=107,56^{\circ}C$ tandis qu'elle est de $T_{max} =142,51^{\circ}C$ pour une avance de 0,02mm/dt, et pour une avance de 0,03mm/dt, la température maximale atteint $T_{max}=268,93^{\circ}C$.

La figure (IV.4) révèle que la température au niveau de la pièce augmente au contact de l'outil. Pour une vitesse de coupe 112m/min, avance 0,02mm/dt, la température maximale atteint $T_{max}=340,79^{\circ}C$ (indiquée par une flamme rouge).

Cette variation s'explique principalement par la taille de la zone de contact entre la pièce et l'outil, plus cette zone est étendue, plus la température s'élève. Ces résultats confirment que la température dans la zone de coupe croît avec la vitesse de coupe.

Lorsqu'on maintient une vitesse de coupe constante et qu'on augmente l'avance et la profondeur de passe, on observe une augmentation de la température à l'interface entre l'outil et la pièce.

En appliquant la méthode lagrangienne, la température apparaît uniformément répartie sur les surfaces, ce qui améliore la morphologie du copeau, comme montre la figure (IV.4).

Le phénomène de conduction est indiqué en rouge, tandis que les dégradés de couleur correspondent au phénomène de convection. La zone éloignée de la surface de contact complètement refroidie est colorée en bleu. Par ailleurs, plus la conductivité thermique du matériau est fiable, plus la température atteint des valeurs élevées.

La figure (IV.5) montre la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction du temps de simulation. On y distingue clairement la zone de séparation du métal au niveau de la pointe de l'outil, où ce dernier exerce une pression de compression sur le matériau qui se divise alors en deux parties : le copeau et la pièce usinée. On remarque également l'apparition des zones de cisaillement primaire (en rouge) et secondaire (en orange).

En résumé, les résultats montrent que la température à l'interface outil/pièce augmente à la fois avec l'avance par dent et avec la vitesse de coupe. Un compromis doit être trouvé entre ces paramètres pour garantir une bonne productivité tout en préservant la durée de vie de l'outil et la qualité de la pièce usinée. L'optimisation des conditions de coupe est donc essentielle pour maîtriser la température générée pendant l'usinage et éviter des dégradations prématuées de l'outil.

IV.5 Comparaison de la répartition de la température à l'interface outil/pièce entre les mesures obtenues par caméra thermique et les résultats de la simulation numérique

1^{er} cas : Vc =100 m/min ; fz=0,01mm/dt

Dans ce premier cas, les températures obtenues par la caméra thermique et celles issues de la simulation numérique présentent une **concordance remarquable**. La température maximale mesurée expérimentalement est de **105,2 °C**, tandis que la simulation prévoit une température maximale de **107,56 °C**, avec une température minimale de **19,85 °C**. L'écart entre les deux valeurs maximales est inférieur à 3 %, ce qui témoigne d'un **bon accord entre le modèle numérique et la réalité physique**.

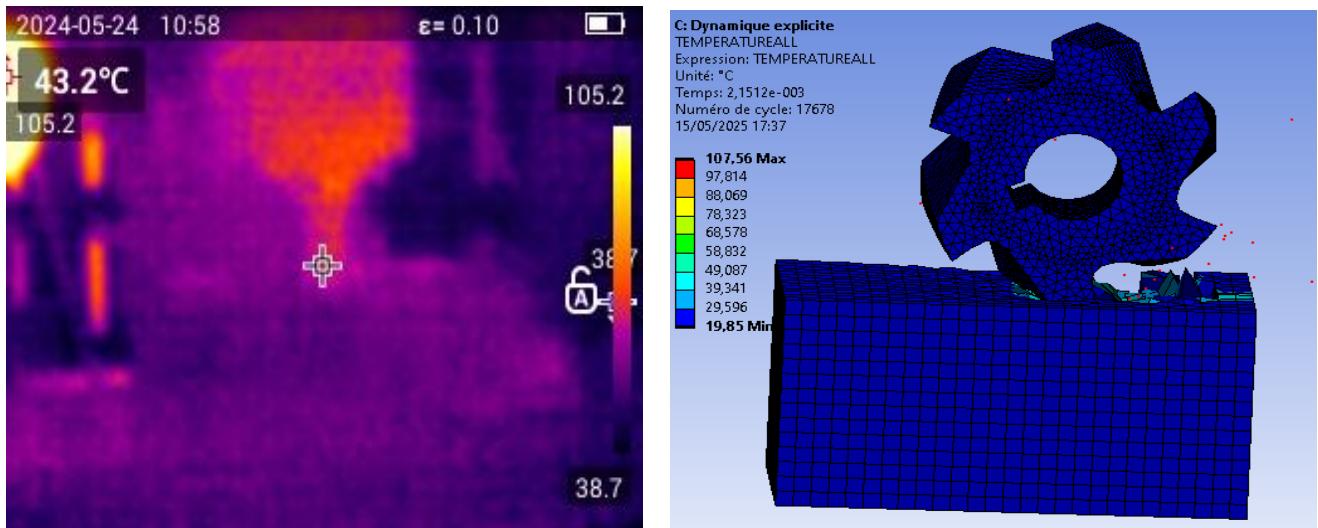


Figure IV.6: Comparaison des températures à l'interface outil/pièce entre les mesures thermiques et la simulation numérique pour ($V_c = 100$; $f_z = 0,01$ mm)

2^{ème} cas : $V_c = 100$ m/min ; $f_z = 0,02$ mm/dt

Dans le deuxième cas, une augmentation de l'avance par dent (de 0,01 à 0,02 mm/dt) entraîne une élévation notable de la température maximale. La caméra thermique indique une température de 123,9 °C, tandis que la simulation estime une température maximale de 142,51 °C, soit un écart d'environ 15 %. Bien que la différence soit plus marquée que dans le cas précédent, la tendance reste cohérente : l'augmentation de la charge de coupe induit une génération thermique plus importante à l'interface de contact.

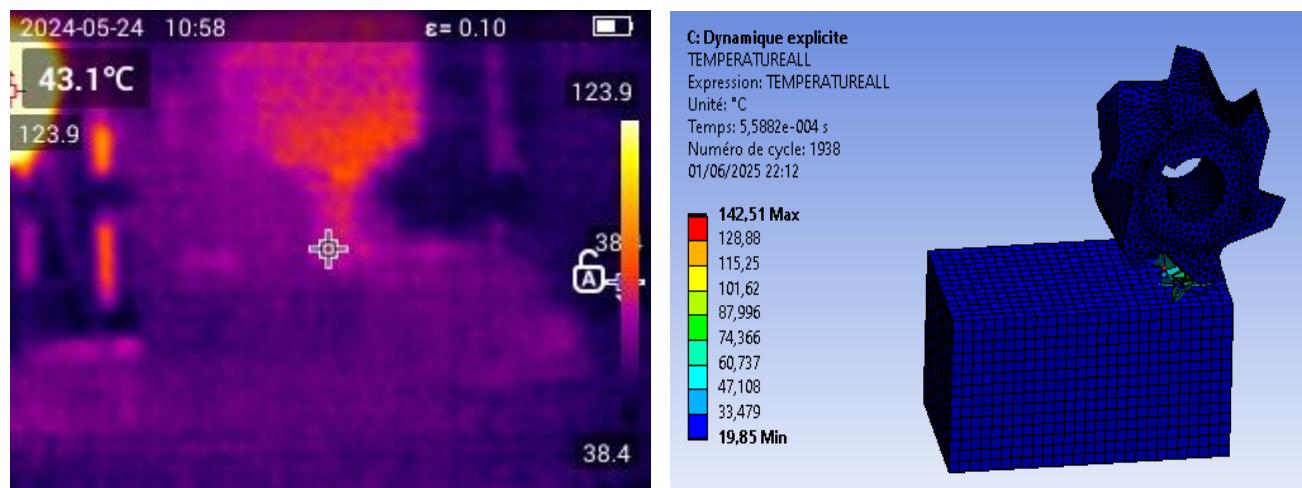


Figure IV.7: Comparaison des températures à l'interface outil/pièce entre les mesures thermiques et la simulation numérique ($V_c = 100$ m/min ; $f_z = 0,02$ mm)

3^{ème} cas : Vc = 112 m/min ; fz= 0,03mm/dt

Dans le troisième cas, un écart important est observé. La caméra thermique montre des températures maximales dépassant 160 °C dans certaines zones, bien que la valeur affichée la plus élevée soit de **43,6 °C** avec une température minimale de **39,1 °C**. La simulation, en revanche, indique une température maximale de **340,79 °C**, et une température minimale constante de **19,85 °C**. Cette forte divergence peut s'expliquer par les limitations de la caméra thermique.

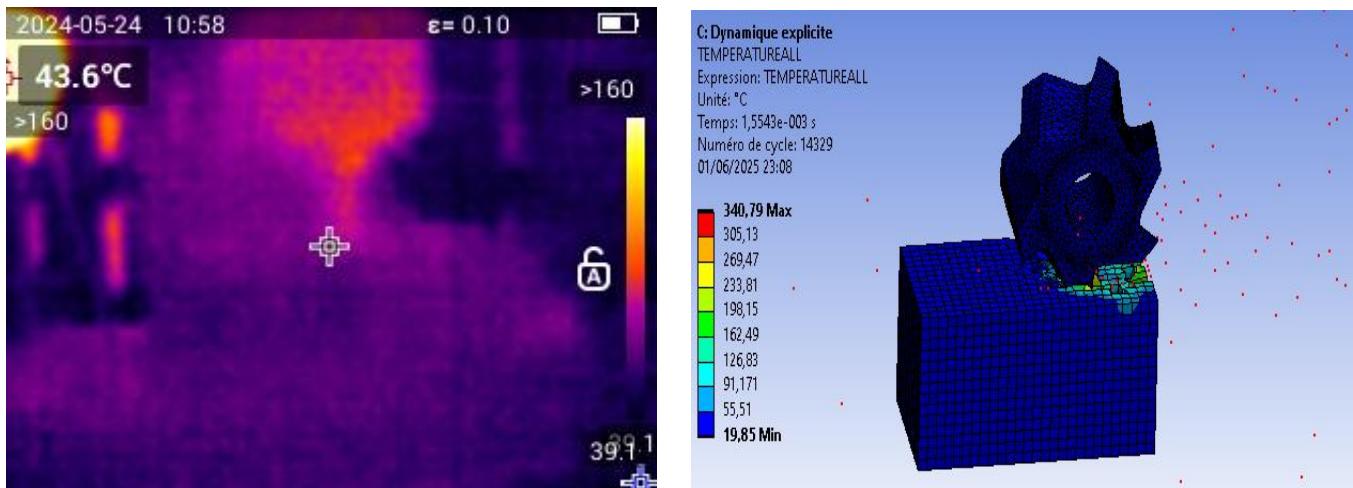


Figure IV.8: Comparaison des températures à l'interface outil/pièce entre les mesures thermiques et la simulation numérique (Vc= 112 m/min ; fz=0,03mm)

IV.6 Validation de résultats :

Dans cette étude, nous avons confronté les résultats de la simulation numérique réalisée avec le logiciel ANSYS aux données expérimentales collectées lors des essais pratiques en atelier sur l'opération de fraisage. Cette démarche avait pour objectif de valider le modèle thermomécanique et d'évaluer la précision de la simulation par rapport aux phénomènes observés sur le terrain.

Les résultats révèlent une bonne corrélation globale (concordance générale) entre les températures simulées et celles mesurées expérimentalement. Plus précisément, la distribution thermique obtenue par simulation correspond bien aux relevés effectués à l'aide des capteurs thermiques pendant les essais. Cette concordance atteste de la fiabilité du modèle numérique pour représenter les transferts thermiques lors du fraisage.

Le ci-dessous nous montre les valeurs expérimentales, les valeurs de simulation numérique et la différence d'erreur entre elles :

Vitesse de coupe (m/min)	Profondeur de passe (mm/tr)	Valeurs expérimentales de la température (°C)	Valeurs de la température obtenues par simulation (°C)	Erreur %
100	0,10	105,2	107,56	2,243%
100	0,20	123,9	142,51	15,020%
112	0,20	>160	340,79	

Tableau IV.1 : Comparaison de la distribution de la température, obtenue expérimentalement et par simulation, pour différentes vitesses de coupe et profondeurs de passe, accompagnée du calcul du pourcentage d'erreur

Conclusion générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à la modélisation thermomécanique et à la simulation numérique 3D d'une opération de surfaçage par fraisage, en utilisant la méthode des éléments finis. La validation du modèle a été effectuée par une comparaison avec les résultats expérimentaux de température obtenus à l'aide d'une caméra thermique.

Cette modélisation thermomécanique consiste un outil essentiel pour comprendre et anticiper les interactions complexes entre les efforts de coupe, la génération de la chaleur et impacts thermiques sur la pièce et d'outil. Grâce à cette approche, il est possible de prévoir les zones critiques de concentration de chaleur, susceptibles de provoquer une usure prématuée de l'outil ou des altérations métallurgiques de la pièce.

Les résultats obtenus soulignent :

- L'importance d'un choix sélectionner des paramètres de coupe tels que la vitesse, avance, profondeur de passe pour minimiser les effets thermiques néfastes.
- Préserver l'intégrité de la pièce et prolonger la durée de vie de l'outil.
- Montrent une bonne concordance entre la simulation et l'expérimentation ce qui confirme la pertinence du modèle pour prédire les impacts thermomécaniques dans le fraisage.
- Le prélèvement de la distribution de la température le long de l'outil, pièce et copeau.
- La méthode par élément finis permet de diminuer le besoin d'expérimentation.
- La chaleur générée lors de la coupe est principalement évacuée par les copeaux (Environ 80%).

Cette étude met en évidence l'apport fondamental de simulation thermomécanique dans l'optimisation du procédé de fraisage, et les paramètres de coupe pour une avancée majeure vers un usinage plus performant, fiable et éco-efficace notamment pour les matériaux industriels courants comme l'acier XC48.

Références :

[1] **Ait Larbi Mohamed Oulhocine, Ikhlef Yacine**, Simulation par la méthode des plans d'expérience d'une opération de fraisage, Université Saad Dalab, 2021-2022.

[2] **N. Melzi**, La stabilité du système POM en usinage Master 1, Fabrication mécanique, Université Saad Dahlab Blida1-(2023-2024).

[3] **H. Hadjsad**, Choix Optimal d'une Technique D'optimisation des Conditions de Coupe en Tournage, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.

[4] **DJAMAA Mohamed Cherif**, Cours fabrication mécanique, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2020.

[5] **A. Belloufi**, Cours procédés de Fabrication, Master Maintenance industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2010.

[6] **Brigitte Remache, Bld Reyers 80,1030- Bruxelles** formation if pm (2015,9), Usinage tournage fraisage, Récupéré sur if mp formation : <https://www.ifpm.be/servlet/Repository/usinage.Pdf?ID:9793f> Save Files : true & save File : true.

[7] **Mohamed DJENNANE**, « Thèse : Optimisation de l'usinage multi passes et multi stage par la méthode du simplexe et la méthode des algorithmes génétiques » Algérie, Université Batna2.

[8] **G. Albert, O. cahue** « Etude expérimentale de la coupe en fraisage » 18 -ème congrès Français de Mécanique.Grenoble,27-31 aout 2007.

[9] **ALIA. Riadh. GUEMAZ. Slimane**, Optimisation des Paramètres de coupe pour Minimiser la consommation d'Energie Pendant le Fraisage. Université Kasdi Merbah, Ouargla,2014-2015.

[10] **M.Lantonomena**, Cours de fraisage et classification des outils, INPF (Institut National Polytechnique), 2010.

[11] **Hayes.G, Moulin.J**, Guide pratique de l'usinage : Fraisage, Paris, 1992.

[12] **Tarek Baafou HAMMOUYA, Med Fares BOUGHABA**, « Mémoire : Prédiction de la Température de coupe Pendant le fraisage de l'Acier AISI 1060 en Utilisant la Logique Floue, Université KasDI Merbah, Ouargla,2016.

[13] **Florea FLORIAN**, « Résumé théorique et guide de travaux pratiques » Maroc, Direction Recherche et Ingénieur, Université Ouargla,2018.

[14] **F. Lorey**, Endommagement des outils de coupe de techniques d'ingénieur, traité mécanique et chaleur, Université de Toulon et du Var, France, B7042,1,2007.

[15] **A. Benyoucef**, « Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique » Thèse de magistère, Laboratoire de Recherche en Productique (U. BATNA), Juin 2006.

[16] **Yao Venunye Avevor**, « Effets thermomécaniques en usinage à sec : une modélisation analytique _numérique ». Matériaux. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017 LORR0112. Tel_01736224.

[17] **M. Temmar**, Cours sur les généralités sur l'usinage des métaux, pp14-22, Université Saad Dahlab Blida1.

[18] **N. Melzi**, cours usinage à grande vitesse Master 2, Fabrication mécanique, Université Saad Dahlab Blida1(2024-2025).

[19] **J. Paulo Davim** «High-Speed Machining: A Comprehensive Guide, Université Aveiro, Springer ,2013.

[20] **F. Benabid**, Etude des Transferts Thermiques au Cours d'une Opération d'Usinage - Influence sur l'Usinage à Grande Vitesse, Thèse de Doctorat, Université de Batna,2015.

[21] **S. Benchiheub**, Etude de l'Interaction « Outil - Pièce lors de l'Usinage des Matériaux Durcis, Thèse de Doctorat Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.

[22] **T.B. Bouchnak**, Etude du Comportement en Sollicitation Extrêmes et de l'Usinabilité d'un Nouvel Alliage de Titane Aéronautique, Thèse de Doctorat École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2010.

[23] **T.D. Marusich, M. Ortiz**, Modeling and simulation of machining, international Journal for Numerical Methods in Engineering (Volume 38, pp 3675-3694) , 1995.

[24] **BENABID, Farida**. Etude des transferts thermiques au cours d'une opération d'usinage, influence sur l'usinage à grande vitesse, Université de Batna,2015.

[25] **Maxime Dawoua Kaoutoing**, « Contributions à la modélisation et la simulation de la coupe des métaux : vers un outil d'aide à la surveillance par apprentissage » Institut National Polytechnique de Toulouse _ INPT ; Université de Ngaoundéré (Cameroun), 2020.

[26] **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.

[27] **Lionel GENDRE**, « Introduction à la simulation par éléments finis », école normale supérieur, Paris_saclay,10/01/2013.

[28] **M.Barge**, « Etude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion » Thèse de doctorat de l'école Centrale Lyon, Juillet 2005.

[29] **J. Rech, C. Claudin, E. D7Eramo**, —Identification of a friction model4 Application to the context of dry cutting of an AISI 1045 annealed steel with a TiN- coated carbide tool, Tribol. Int., 42 (2009) 738-744.