



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

Projet de fin d'études
Pour l'obtention de diplôme de
Master en Fabrication Mécanique et Productique

Titre

**Modélisation par la méthode des éléments finis du contact de
l'outil de coupe avec la pièce à usiner lors d'une opération de
fraisage**

Proposé et encadré par :
Dr N. Melzi
Prof M. Temmar

Etudié par :
M.I. Tiberkak
O.A. Tounsi

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Ce travail de mémoire a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida 1.

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

Nous remercions **Docteur Melzi Nesrine** et **Professeur Temmar Mustapha** pour avoir acceptés de diriger ce mémoire, et dont l'aide précieuse nous a été indispensable sur le plan scientifique et humain.

Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

Dédicaces

- 🌀 Je dédie ce travail tout particulièrement aux personnes qui me sont les plus chères au monde ; à mes très chers **parents** pour leur patience, soutien et confiance,
- 🌀 Ma **mère** n'a pas cessé de prier pour moi, m'encourager et me soutenir et qui a su m'entourer de tout son amour et son affection,
- 🌀 Mon **père** qui s'est sacrifié afin que rien n'entrave le déroulement de mes études,
- 🌀 Je dédie ce travail également à tous les membres de ma famille,
- 🌀 Bien sur à mes **collègues** de ma promotion sortante.

Mohamed Islam

Dédicaces

🌀 Je dédie ce travail tout particulièrement aux personnes qui me sont les plus chères au monde ; à mes très chers **parents** pour leur patience, soutien et confiance,

🌀 Ma **mère** n'a pas cessé de prier pour moi, m'encourager et me soutenir et qui a su m'entourer de tout son amour et son affection,

🌀 Mon **père**, Rahimahou ALLAH Incha ALLAH, qui s'est sacrifié afin que rien n'entrave le déroulement de mes études,

🌀 Je dédie ce travail également à tous les membres de ma famille,

🌀 Bien sur à mes **collègues** de ma promotion sortante.

Oualid Abdelmoumen

Résumé

Le fraisage constitue l'un des procédés de fabrication les plus essentiels et les plus répandus dans l'industrie, grâce à son efficacité à améliorer la qualité de la surface obtenue. Cependant, ce procédé peut engendrer des problèmes thermiques, tels qu'une élévation excessive de la température de l'outil et une accélération de l'usure de la matière usinée.

Pour répondre à ce problème et assurer la fabrication de pièces de bonne qualité tout en augmentant la durée de vie de l'outil, il faut suivre une méthode claire qui prend en compte toutes les étapes, depuis la préparation de la matière première jusqu'à la finition de la pièce. La modélisation du processus de coupe est très importante, surtout pendant la finition, car c'est elle qui donne à la surface la plupart de ses propriétés, et cette étape utilise surtout des techniques d'usinage.

Dans cette étude, nous avons réalisé une simulation du fraisage à l'aide du logiciel "ANSYS 2021", en utilisant un outil en acier rapide (ARS) et une pièce en acier XC48, dans le but de déterminer les températures et leur répartition dans la zone de coupe pendant le processus.

Nous avons également réalisé une expérimentation pratique en utilisant une caméra thermique à infrarouge afin de suivre et déterminer les températures ainsi que leur répartition dans la zone de coupe pendant le processus.

Par la suite, les résultats de la simulation seront analysés et comparés à ceux de l'expérimentation pratique, dans le but d'évaluer l'effet des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) sur la répartition de la température lors du processus de fraisage.

Notre objectif est d'acquérir une meilleure compréhension des phénomènes thermiques lors du processus de fraisage, afin de fournir des informations utiles pour l'optimisation des procédés de fabrication dans l'industrie.

Mots-clés : Fraisage, température de coupe, modélisation, simulation.

Abstract

Milling is one of the most essential and widely used manufacturing processes in the industry, due to its effectiveness in improving the quality of the resulting surface. However, this process can lead to thermal issues, such as excessive temperature rise in the tool and accelerated wear of the machined material.

To address this issue and ensure the production of high-quality parts while extending the tool's lifespan, it is necessary to follow a clear methodology that considers all stages, from raw material preparation to the final finishing of the part. Modeling the cutting process is particularly important, especially during the finishing stage, as it imparts most of the surface properties and relies mainly on machining techniques.

In this study, we performed a milling simulation using the software “ANSYS 2021”, employing a High-Speed Steel (HSS) tool and a workpiece made of XC48 steel, with the objective of determining the temperatures and their distribution in the cutting zone during the process.

We also conducted a practical experiment using an infrared thermal camera to monitor and measure the temperatures and their distribution in the cutting area during the operation.

Subsequently, the simulation results will be analyzed and compared with those from the experimental study in order to assess the influence of cutting parameters such as cutting speed (V_c) and feed rate (f) on the temperature distribution during the milling process.

Our goal is to gain a better understanding of the thermal phenomena occurring during milling, in order to provide valuable insights for optimizing manufacturing processes in the industry.

Key- words: Milling, cutting temperature, modeling, simulation, cutting tool.

الملخص

تُعد عملية الطحن من بين أهم وأكثر عمليات التصنيع شيوعاً في الصناعة، وذلك بفضل فعاليتها في تحسين جودة السطح الناتج. ومع ذلك، قد تؤدي هذه العملية إلى مشاكل حرارية، مثل الارتفاع المفرط في درجة حرارة الأداة وتسريع تآكل المادة المشغلة.

ولمواجهة هذه المشكلة وضمان إنتاج قطع عالية الجودة مع إطالة عمر الأداة، من الضروري اتباع منهجية واضحة تأخذ بعين الاعتبار جميع المراحل، بدءاً من إعداد المادة الخام وصولاً إلى التشطيب النهائي للقطعة. وتُعد نمذجة عملية القطع خطوة محورية، خاصة في مرحلة التشطيب، لأنها تمنح السطح معظم خصائصه، وتعتمد هذه المرحلة أساساً على تقنيات التشغيل الميكانيكي.

في هذا البحث قمنا بإجراء محاكاة لعملية الطحن باستخدام برنامج «ANSYS 2021» باستخدام أداة مصنوعة من فولاد عالي السرعة (ARS) وقطعة من فولاد XC48 بهدف تحديد درجات الحرارة وتوزيعها في منطقة القطع أثناء العملية.

كما قمنا بإجراء تجربة تطبيقية باستخدام كاميرا حرارية بالأشعة تحت الحمراء لتعقب وقياس درجات الحرارة وتوزيعها في منطقة القطع خلال العملية.

بعد ذلك، سيتم تحليل نتائج المحاكاة ومقارنتها بنتائج الدراسة التجريبية، من أجل تقييم تأثير معلمات القطع مثل توزيع درجة الحرارة أثناء عملية الطحن. على V_c وسرعة القطع (f) التقدم (

يتمثل هدفنا في فهم أفضل للظواهر الحرارية التي تحدث أثناء عملية الطحن، بهدف تقديم معلومات قيمة تساهم في تحسين عمليات التصنيع في المجال الصناعي.

الكلمات الرئيسية: الطحن، درجة الحرارة، النمذجة، المحاكاة، أداة القطع.

Liste des symboles

Symbole	Unité	Désignation
M_c	-	Mouvement de coupe
M_p	-	Mouvement de pénétration
M_f	-	Mouvement d'avance
V_c	m/min	Vitesse de coupe
D	Mm	Diamètre
n	tr/min	Vitesse de la broche
V_f	mm/tr	Vitesse d'avance
f_z	mm/dent	Avance par dent
f	mm/tr	Avance par tour
z	-	Nombre de dent de la fraise
a_p	Mm	La profondeur de passe
a_e	Mm	Largeur de coupe
α'	°	Angle d'hélice
α	°	Angle de dépouille
β	°	Angle de taillant
γ	°	Angle de coupe
σ	Mpa	Contrainte
σ_e	Mpa	Contrainte équivalente de von mises
ρ	Kg /m ³	La densité
ε'	-	Vitesse de déformation plastique
T	°C	Température instantanée
T_0	°C	Température de fusion
ε^p	-	Déformation plastique équivalente
ε_0	-	La vitesse de déformation est prise en compte
T_{amb}	°C	Température ambiante
c	J/kg K	Chaleur spécifique
m	-	Paramètre définissant la dépendance à la température
σ_m	Mpa	La contrainte moyenne
ε_f	-	La déformation équivalente à rupture du matériau
k	W/m k	Conductivité thermique
ε_t		La limite du domaine de déformation

<i>UGV</i>	-	Usinage à grande vitesse
<i>POM</i>	-	Pièce /outil /machine

Introduction générale

L'usinage par enlèvement de matière est l'une des techniques de production les plus utilisées dans l'industrie pour l'obtention des formes désiré de pièce avec une qualité de surface élevé et une excellente précision dimensionnelle

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

En général, l'expérience de l'étude dans l'atelier mécanique prend beaucoup de temps, elle est également très chère particulièrement avec les opérations complexes et la large plage de paramètres comme ; la géométrie de l'outil, conditions de coupe etc. C'est pour cette raison que l'approche mathématique est souvent utilisée en utilisant les méthodes numériques pour les solutions des problèmes physiques. L'une des méthodes les plus courantes est la méthode des éléments finis.

Notre étude, intitulée modélisation par la méthode des éléments finis du contact de l'outil de coupe avec la pièce à usiner lors d'une opération de fraisage, s'est basée sur une simulation numérique de la coupe des pièces mécaniques en 3D et impact des paramètres de coupe sur la géométrie de ces pièces pour l'opération de rainurage en procédé d'usinage le fraisage. Nous avons opté pour les outils coupants et un procédé d'usinage par enlèvement de matière.

Notre recherche est composée de quatre chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique sera consacrée sur la coupe des métaux par enlèvements de matières et sur le procédé de fraisage.

Le chapitre II sera consacré sur les principaux éléments de théorie de la coupe des métaux

Le chapitre III sera consacré à la modélisation et à la simulation de la formation du copeau en 3D d'une opération de rainurage de procédé de fraisage à sec de l'acier XC48. A cet effet, une loi de comportement et d'endommagement de Johnson-Cook sera utilisée dans le but de prévoir la distribution de la température à l'interface outil/copeau. Par la suite, une étude mathématique sera appliquée pour modéliser la

température par la méthode des plans d'expériences. Le but est d'optimiser les paramètres de coupe et de montrer l'influence de telles conditions sur le processus de coupe et de déduire laquelle des valeurs de température peut se rapprocher d'une usure nulle qui permet d'augmenter la durée de vie de l'outil de coupe. Enfin la dernière partie concernera les principaux résultats de notre étude.

Le chapitre IV sera consacré sur les différents des étapes pratiquement de la formation du copeau d'une opération de rainurage de procédé de fraisage de l'acier XC 48 à l'aide par un caméra thermique infrarouge. Dans le but de prévoir la distribution de la température à l'interface outil/copeau et optimiser les paramètres de coupe ainsi que faire une comparaison avec la partie de la simulation et la partie expérimentale.

En effet, la température de coupe, générée à l'interface de l'outil et du copeau, est le facteur le plus influant lors de l'usinage des métaux. L'estimation de la température dans ces zones est importante car elle conduit à une fragilisation et à une usure des outils de coupe.

La dernière partie sera consacrée à une conclusion générale ou nous allons représenter les résultats de notre travail.

Chapitre I :

Généralités sur l'usinage par enlèvement de matières et le procédé de fraisage

I.1/ Introduction :

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

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

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

Aujourd'hui, des machines à commandes numériques, c'est-à-dire équipée d'un système informatique, permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure.

I.2/ Usinage :

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

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

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

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

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

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

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

I.3/ Processus d'usinage :

L'usinage est un processus complexe où interviennent plusieurs acteurs :

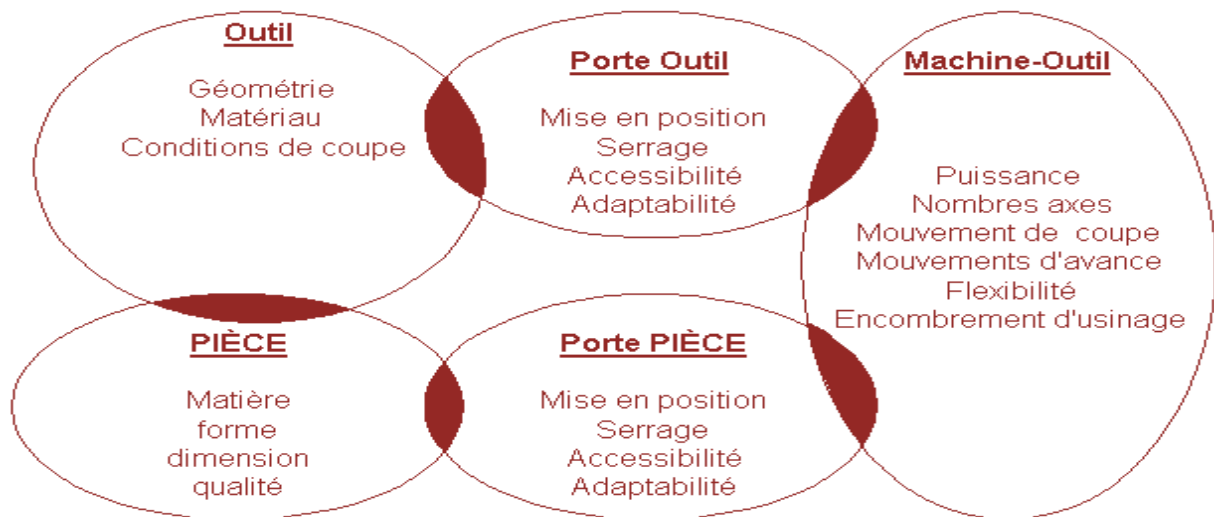


Figure I.1 : Définition du système POM : Pièce/Outil de coupe/Machine-outil

Il existe donc des liaisons :

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

I.4/ Procédé 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 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.

I.5/ Le procédé de fraisage :

Notre travail consiste à étudier ce procédé.

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de la matière. Il est caractérisé par le recours à une machine-outil appelée fraiseuse et l'utilisation d'un outil de coupe spécial (à arêtes multiples) appelé fraise. La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage des surfaces plates et permet également, si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes.

La coupe en fraisage s'effectue habituellement avec des dents placées sur le périphérique et / ou sur l'extrémité d'un disque ou d'un cylindre.



Figure I.2 : Procédé de fraisage

I.5.1/ Types de fraisage :

Le mouvement d'avance, en principe, est dirigé dans le sens contraire à la rotation, mais il peut parfois être dirigé dans le sens de la rotation.

Nous allons citer quelques types de fraisage

Fraisage en opposition : Dans le fraisage en opposition les dents de la fraise attaquent la pièce tangentielllement à la surface à usiner. Avant de pénétrer dans la matière, les dents glissent sur la pièce, en provoquant un frottement considérable. Au fur et à mesure que les dents avancent, elles pénètrent dans la matière et enlèvent un copeau en forme de virgule.

Avantage :

- L'engagement de la dent n'est pas fonction des caractéristiques de surface de la pièce usinée
- Les souillures ou écailles de la surface n'affectent pas la durée de vie de l'outil.
- Le procédé de coupe est adouci, d'autant plus que les dents de la fraise sont affûtées.

Inconvénients :

- L'outil a tendance de trembler.
- La pièce usinée a tendance d'être décalée vers le haut, ce qui implique d'importants blocages.
- Usure plus rapide de l'outil qu'en fraisant en avalant.
- Les copeaux tombent devant la fraise – évacuation difficile.

- La force ascendante a tendance à relever la pièce usinée.
- Plus de puissance est requise à cause d'une friction accrue.
- La surface de finition n'est pas bonne à cause de l'évacuation des copeaux.

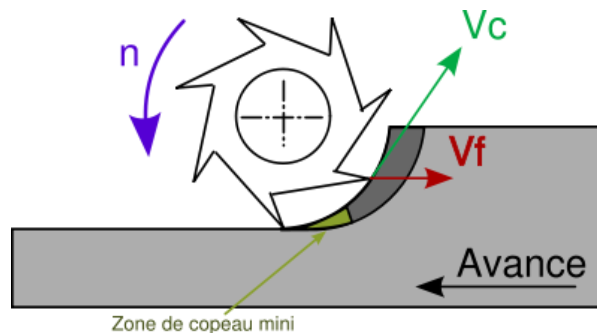


Figure I.3 : Fraisage en opposition

Fraisage en avalant : Dans le fraisage en avalant ou en concordance, les dents attaquent la surface à usiner avec une épaisseur conséquente de copeau à enlever, et subissent un choc. Ce système est adopté sur des fraiseuses qui possèdent un dispositif de rattrapage de jeu entre les vis de commande et leurs écrous.

- Avantage :

- Les forces de coupe vers le bas permettent de maintenir la pièce usinée en place, particulièrement pour les parties peu épaisses.
- Evacuation plus facile des copeaux – Les copeaux sont évacués derrière la fraise.
- Moins d'usure – diminution de 50% de la durée de vie de l'outil.
- Finition de surface améliorée – Les copeaux sont moins emmenés par la dent.
- Moins de puissance requise – on peut utiliser une fraise avec un angle de coupe élevé.
- Le fraisage en avalant exerce une force sur la pièce à usiner.

- Inconvénients :

- Lors de l'engagement des dents dans la pièce usinée les forces ont un impact important, c'est pourquoi cette opération doit avoir un montage rigide, et tout jeu doit être éliminé.
- Le fraisage en avalant ne convient pas à l'usinage de pièces ayant un mauvais état de surface, telles que les pièces de forge et moulées. En effet les écailles sur la matière causent une usure excessive et abîment les dents, réduisant ainsi la durée de vie.

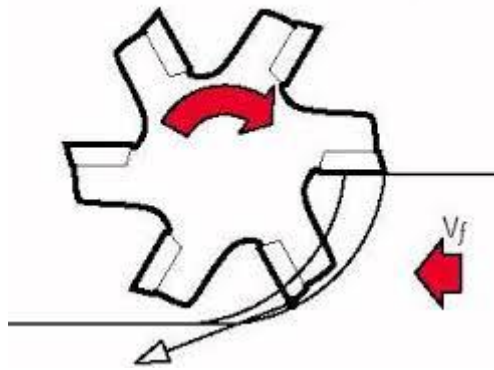


Figure I.4 : Fraisage en avalant

Rainurage :

L'usinage des rainures ou encoches est une opération typique du fraisage. La rainure peut être exécutée avec une fraise à trois tailles sur fraiseuse horizontale, ou avec une fraise à queue sur fraiseuse verticale. Au moyen de la fraise à trois tailles on obtient une rainure mieux usinée, surtout sur les flancs, qui ont de ce fait, une meilleure géométrie que celle obtenue par des fraises à queue. En effet, cette dernière peut être sujette à une rotation légèrement excentrée et à de petits fléchissements latéraux, ce qui a pour résultats de rendre moins régulière la face usinée et la géométrie des rainures. Dans certains cas particulier, comme celui de la figure B par exemple, il n'est pas possible d'employer une fraise disque et on doit nécessairement recourir à l'utilisation d'une fraise à queue.

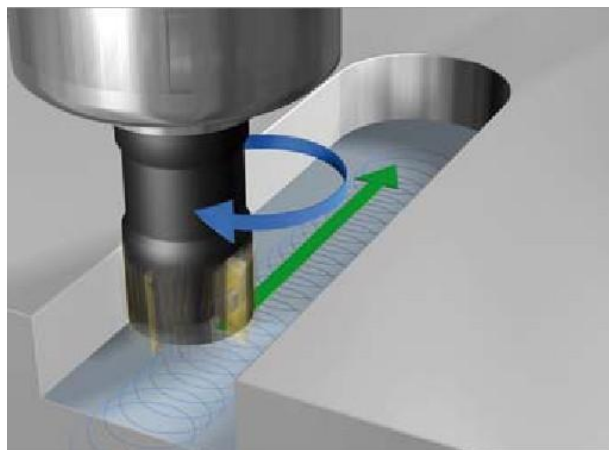


Figure I.5 : Rainurage

I.5.2/ Fraise :

L'outil employé pour le fraisage est la fraise. La fraise est un outil multiple, formé par plusieurs taillants disposés radialement sur une circonférence. Au moyen d'une fraise, il est possible d'usiner des surfaces planes ou courbes, des rainures, des dentures, etc.

I.5.3/ Caractéristiques d'une fraise :

Il faudra bien faire attention à ne pas confondre le sens de coupe et le sens de l'hélice.

a-Sens de coupe :

Les fraises sont dites « en coupe à droite » si, en vue de dessus par rapport à la broche de la machine, elles tournent dans le sens horaire appelé aussi sens anti-trigonométrique). C'est 95 % des cas. Elles sont dites « en coupe à gauche » si elles tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (sens antihoraire ou trigonométrique) environ 5 % des fraises 2 tailles.

b-Type de denture :

L'inclinaison des arêtes de coupe peut varier d'une fraise à l'autre, la fraise peut être à :

- dentures droites.
- dentures hélicoïdales (avec l'hélice à gauche ou à droite).
- dentures alternées (double hélice).

c-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.

I.5.4/ Principaux éléments géométriques de la fraise :

La forme géométrique des taillants d'une fraise, est soumise, comme pour tous les outils qui travaillent par enlèvement de copeaux, à trois angles fondamentaux formés par les faces A et P qui déterminent les angles de coupe ou angles d'affutage α , β et γ .

Pour les fraises à denture hélicoïdale, on tient compte de l'angle δ , qui détermine l'inclinaison de l'arête tranchante par rapport à l'axe de la fraise, et qui est appelé angle d'attaque.

a-Angle d'hélice ou angle d'attaque δ : C'est l'angle compris entre l'axe longitudinal de la fraise et l'inclinaison de la denture. L'angle sera faible (environ 5°) pour l'usinage de métaux à copeaux courts tels que la fonte et ira en augmentant pour les métaux légers (aluminium) (25°) ou l'usinage des aciers spéciaux : inox par exemple.

b-Angle de taillant β : C'est l'angle qui constitue la partie coupante de la dent de la fraise. Plus il est aigu, plus il est fragile.

c-Pente d'affûtage ou Angle de coupe γ : Cet angle influe sur la façon dont se forme le copeau sur la face de coupe. Plus il est grand, plus l'effort de coupe diminue. L'angle de coupe est plus important pour l'aluminium que pour la fonte par exemple.

d-Angle de dépouille α : C'est l'angle qui évite le frottement (talonnage) de l'arrière de la dent sur la partie de la pièce déjà usinée.

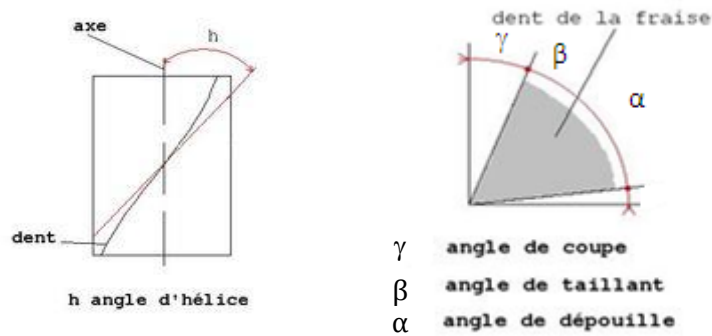


Figure I.6 : Angles d'affûtages

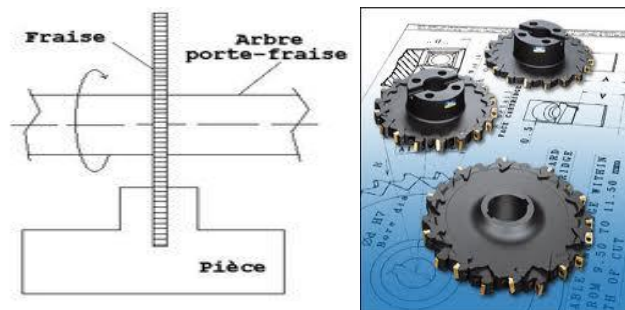
I.5.4/ Exemples des principales fraises :

Les fraises peuvent être à queue ou à trou. On distingue principalement quatre familles de fraises :

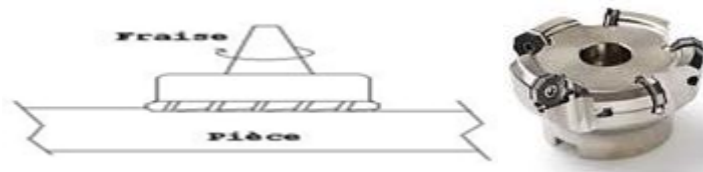
- Les fraises à surfacer et à contourner.
- Les fraises disques.
- Les fraises à rainurer.
- Les fraises de profil.

Ci-joint, quelques modèles de fraise :

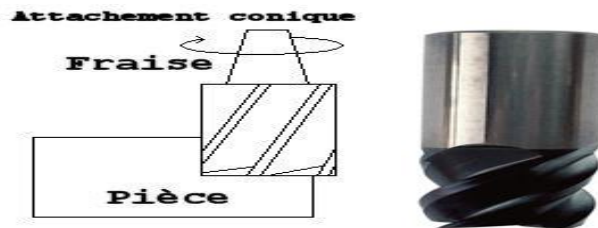
a) La fraise scie :



b) La fraise à surfacer :



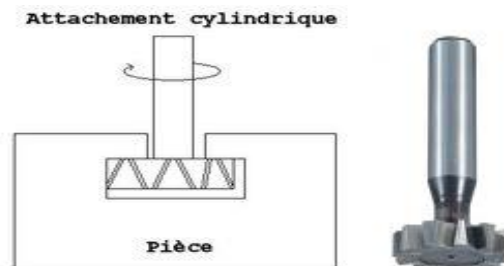
c) La fraise à 2 tailles :



d) La fraise à rainurer 2 dents :



e) La fraise pour rainures en T :

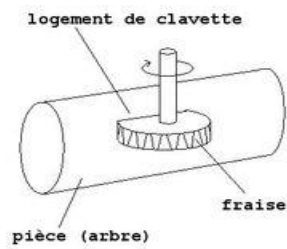


Cette fraise qui ressemble à une fraise 3 tailles, sert à usiner les deux parties qui sont en retrait dans une rainure en T.

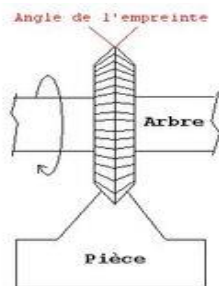
Les rainures en T sont très employées sur les machines-outils (tables) et également sur de nombreux outillages pour la fixation de matériels.

Pour l'usinage, il faut tout d'abord faire une rainure droite (col de la rainure) avec une fraise 3 tailles, puis usiner les deux parties en retrait de la rainure en T.

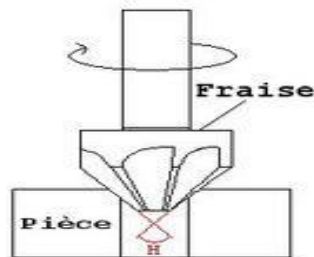
f) La fraise pour logement de clavette-disque :



g) La fraise isocèle :



h) La fraise à chanfreiner : disponible avec deux valeurs de l'angle de pointe H : **60° et 90°**.



Pour le montage, le plus classique est le montage : mandrin, cône.

Par exemple, on utilise une douille de type standard américain, le cône creux est type morse sur lequel s'emmanche la queue de la fraise et son tenon.



Figure I.7 : Montage de fraises

I.6/ Fraiseuses :

Les machines-outils utilisées pour le fraisage sont appelées fraiseuses. Ces fraiseuses se caractérisent par la position de l'arbre porte fraise ou de la broche, et par la possibilité de mouvement de la table porte-pièce ainsi que par leur rendement (production unitaire ou de série). On distingue essentiellement trois types de fraiseuses :

- Les fraiseuses mono broche d'outillage (horizontale, verticale et universelle)
- Les fraiseuses mono broche de production (à cycle, à commande numérique...)
- Les fraiseuses multibroches (à table rotative, à banc fixe...).

A/ Fraiseuse horizontale : Elle utilise des fraises montées sur un arbre porte-fraise horizontal. Elle est utilisée pour le surfacage, pour l'exécution de rainures et de profils rectilignes.

B/ Fraiseuse universelle : Elle dérive de la fraiseuse horizontale. Elle permet, aussi bien, d'employer des fraises montées sur un arbre porte-fraise horizontal que sur une broche verticale. Elle peut également, assumer différentes inclinaisons. Elle est utilisée pour exécuter de nombreuses formes de fraisage, y compris les formes hélicoïdales.

C/ Fraiseuse verticale : Elle est équipée d'une broche porte-fraise verticale et inclinable. Elle est employée soit pour le surfacage, soit pour l'exécution de rainures et de contours droits ou circulaires.

D/ Fraiseuse pour outillage : Elle est une machine très souple, aux multiples possibilités de mouvements de têtes horizontales et verticales ainsi que la table porte-pièce. Elle est employée pour le fraisage de pièces légères, mais de formes compliquées.

E/ Fraiseuse à banc fixe (genre raboteuse) : C'est une fraiseuse de production. Elle peut travailler en même temps, avec une plusieurs fraises montées sur un ou plusieurs arbres. Elle est utilisée pour dresser des pièces de grandes dimensions.

F/ Fraiseuse à fileter : Conçue uniquement pour le taillage de vis.

G/ Fraiseuse à copier ou à reproduire : Elle est munie d'un dispositif qui permet de reproduire des contours même compliqués, suivant un modèle ou gabarit qui guidera la fraise

le long de la forme à exécuter. Elle est utilisée pour l'exécution de pièces aux formes compliquées et irrégulières.

La figure suivante représente une fraiseuse universelle.

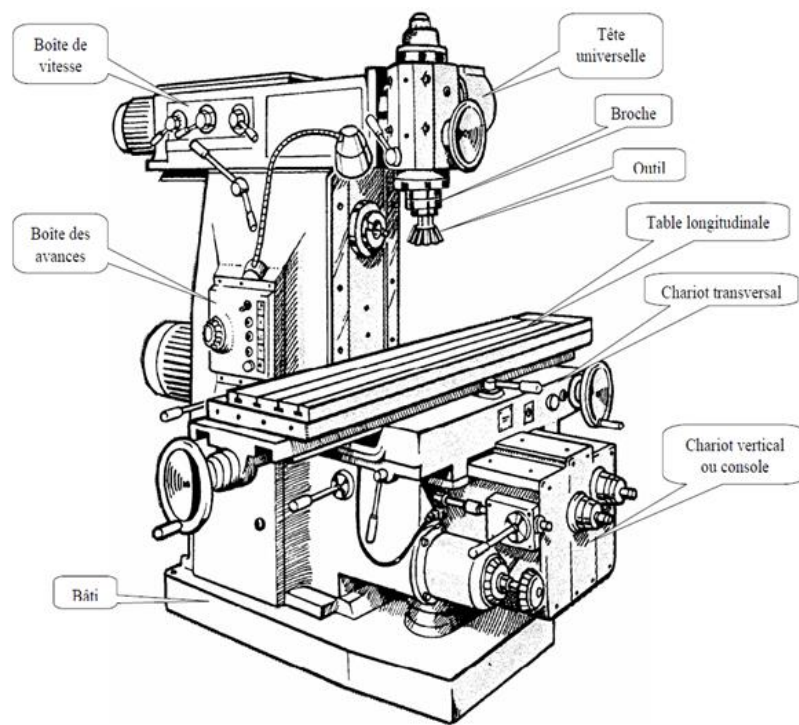


Figure I.8 : Fraiseuse universelle

I.7/ Mouvements relatifs entre l'outil et la pièce à usiner :

Les mouvements relatifs, entre l'outil et la pièce, exigés par le fraisage sont le mouvement de coupe, le mouvement d'avance et le mouvement de pénétration.

- Mouvement de coupe **M_c** : C'est le mouvement principal qui produit l'enlèvement de la matière, il est donné par la rotation de l'outil.
- Mouvement de pénétration **M_p** : C'est le mouvement rectiligne qui règle la profondeur de la pénétration dans la matière. Il est généralement donné à la pièce, mais dans certaines machines particulières il est donné à l'outil.
- Mouvement d'avance **M_a** : C'est le mouvement rectiligne donné à la pièce pendant l'usinage. L'outil rencontre ainsi constamment de la matière à enlever.

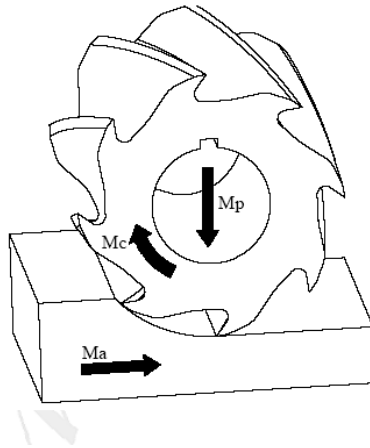


Figure I.9 : Mouvements relatifs en fraisage

I.8/ Lubrification :

La lubrification ou le graissage est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement, l'usure entre deux éléments en contact et, en mouvement l'une par rapport à l'autre. Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion... Dans ces situations, les écoulements fluides sont parallèles aux surfaces, ce qui simplifie leur description et leur calcul (théorie de la lubrification).

On parle de lubrification dans le cas où le lubrifiant (mécanique) est liquide et de graissage dans le cas où il est compact.

En mécanique, on lubrifie les pièces de métal ou de céramique avec un corps gras, comme de l'huile ou de la graisse. Les lubrifiants sont des produits liquides, pâteux ou solides d'origine minérale (hydrocarbures pour l'essentiel), animale, végétale ou synthétique.

Son rôle permet de changer le coefficient de frottement entre deux éléments afin de faciliter le glissement ou le roulement entre elles ainsi que d'éviter ou de minimiser l'usure et les échauffements.

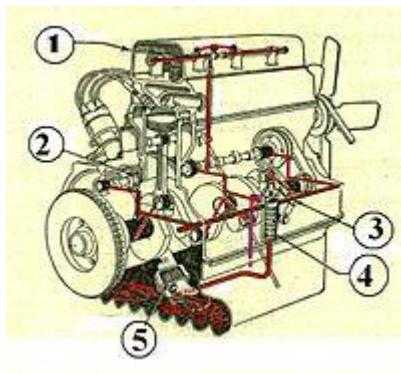
Les lois physiques qui régissent ce domaine (la tribologie) sont très complexes et sont fondées à la fois la résistance des matériaux et la mécanique des fluides. Il est intéressant de comprendre des phénomènes tels que :

- la formation d'un coin d'huile ou d'un film d'huile entre deux pièces en mouvements,
- la notion d'épilamen,
- le changement de propriétés physiques des huiles en fonction de la pression et de la température.



Figure I.10 : Lubrification ponctuelle

La première méthode consiste à mettre le lubrifiant avant le mouvement ou durant le mouvement. Cela peut se faire de manière manuelle, par exemple en déposant des gouttes d'huile avec une burette, en plaçant de la graisse avec les doigts (si celle-ci n'est pas toxique), ou bien en appliquant le lubrifiant avec un pinceau. C'est par exemple le cas de la lubrification d'une chaîne de vélo, des gonds d'une porte... Cette lubrification peut aussi s'effectuer par projection à l'aide d'un aérosol (bombe).



- 1=culbuteurs,
- 2=Arbre à cames,
- 3=vilebrequin,
- 4=filtre,
- 5=pompe

Figure I.11 : Lubrification continue

La lubrification continue touche tous les mécanismes en mouvement et est constituée par un système de conduites qui amène, par l'intermédiaire d'une pompe, le lubrifiant vers les divers organes (paliers, coussinets, roulement à billes) à lubrifier. Le lubrifiant retourne au bac pour y être réfrigéré puis remonte en traversant un filtre qui retient les impuretés.

- C'est le cas notamment de l'huile pour un moteur à combustion interne. Le lubrifiant se dégrade, en particulier sous l'effet de la forte chaleur, et se charge en débris d'usure : il faut donc vidanger régulièrement le réservoir et le remplir avec du lubrifiant neuf. Dans certains

cas (qui a tendance à se généraliser), l'huile passe par un radiateur de refroidissement, avant de retourner lubrifier les organes qui utilisent le même fluide (moteur, boîte-pont, turbo).

- Dans le cas du moteurs à deux temps, le carburant est mélangé avec un pourcentage d'huile spéciale (appelée huile 2 temps) qui assure le graissage des organes en mouvement. Il n'y a pas, ensuite, de récupération d'huile, car celle-ci est brûlée en même temps que le carburant.
- Sur les machines fixes par rapport au sol, on peut également faire tremper la mécanique dans un lubrifiant liquide, on parle alors de *bain d'huile* ou de barbotage. Comme dans le cas des moteurs thermiques, le carter doit être rempli en respectant les niveaux mini et maxi.
- Le graissage à bague : le système est utilisé dans les paliers pour le graissage des tourillons et consiste en une bague, posée librement sur l'arbre, et d'un diamètre suffisamment grand pour tremper dans un réservoir à la partie inférieure du palier. Pendant le mouvement de rotation de la bague, l'huile qui y adhère est entraînée pour venir graisser le tourillon.
- L'usinage des pièces mécaniques nécessite une lubrification afin d'assurer le refroidissement des outils et des pièces et de limiter les efforts de coupe au strict nécessaire permettant l'enlèvement de matière (copeaux).

Dans le cas d'une lubrification automatique, l'appareil peut être équipé d'un bac de récupération qui permet de retraiter le lubrifiant en excès ou usagé.

Les machines-outils : tour, fraiseuse, etc, ..., outre le lubrifiant pour le fonctionnement du mécanisme, utilisent des huiles de coupe pour faciliter le refroidissement de la pièce usinée et de l'outil, le glissement du copeau sur l'outil, augmenter la vitesse de coupe.

- Lubrification continue : Le lubrifiant est généralement versé en jet continu et ensuite, récupéré dans un bac sous la machine, filtré et renvoyé dans le circuit. Le fluide employé est de l'huile de synthèse ou un mélange, de 5 à 10 % d'huile soluble (lubrifiant) et d'eau (réfrigérant), appelé *eau de savon* de par sa couleur laiteuse.
- Lubrification ponctuelle : peut aussi se faire de manière automatique, en général sous forme d'aérosol ; c'est le cas par exemple de l'usinage avec un tour à commande numérique. Ou avec un pinceau et un fluide spécifique pour le métal à usiner : huile de lin, pétrole (pour l'aluminium).

Chapitre II : Principaux éléments de théorie de la coupe des métaux

II.1/ Introduction :

Le facteur qui a le plus d'impact sur l'usinabilité des métaux est la température de coupe, produite à l'interface entre l'outil et le copeau.

L'augmentation de la température provoque une diminution de la résistance à l'abrasion des outils et active les phénomènes de diffusion des composés du substrat vers le copeau et diminution la durée de vie des outils de coupe.

L'analyse de température dans la zone de coupe est très complexe et difficile. En effet, les forts gradients thermiques et le mouvement des différents antagonistes (pièce, outil, copeau) nécessitent d'avoir un système de mesure de température qui prend en compte toutes ces spécificités. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes permettant de remonter à la température de l'arête de coupe de l'outil. Dans ce qui suit, nous ferons un état de l'art sur quelques techniques permettant la détermination de la température à l'arête de coupe lors de l'usinage. Nous ne considérons que les techniques les plus utilisées en usinage.

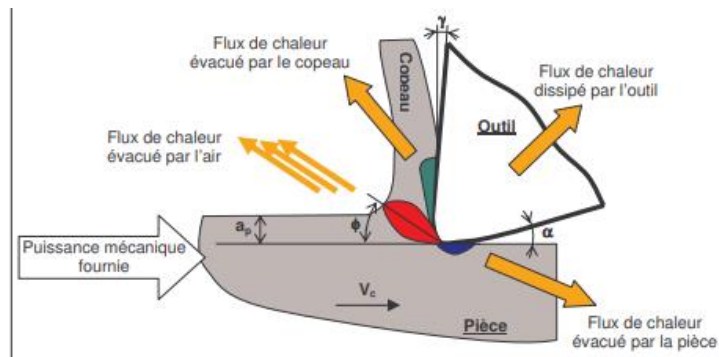


Figure II.1: Flux généré à l'interface de contact outil/copeau

II.2/ Température de coupe :

La température de coupe est une valeur moyenne du champ thermique dans une zone spécifiquement sollicitée, comme l'interface entre l'outil et le copeau pour un outil donné.

Il convient donc d'examiner les préoccupations suivantes :

- Outils pour mesurer la température de coupe.

- Provenance et bilan thermique lors de la coupe.
- Distribution de la température de coupe.
- Paramètres ayant un impact.
- Modélisation de la température de coupe.

II.2.1/ Méthodes et moyens de mesure de la température de coupe :

À l'exception du calorimètre, qui sert à déterminer la quantité de chaleur générée, et des peintures thermosensibles, qui ne sont plus employées compte tenu de leur sensibilité très limitée, les techniques principales pour mesurer la température de coupe sont les suivantes :

➤ Mesure par thermocouple :

Le principe du thermocouple repose sur l'observation suivante : lorsqu'on soude deux métaux à leurs extrémités et qu'on expose une de ces jonctions à une température précise, tandis que l'autre est maintenue à une température distincte, on pourra constater une force électromotrice entre les deux jonctions. L'appréciation de cette force, qui est liée aux matériaux employés, représente la température évaluée. Les thermocouples ont l'avantage d'être simples et flexibles à mettre en œuvre et à utiliser pour des acquisitions basiques, tout cela à un coût réduit. On distingue plusieurs sortes de thermocouples, les plus courants étant les modèles standard et dynamique. [4].

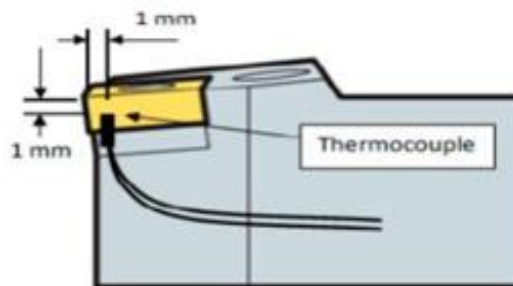


Figure II.2 : Mesure de la température par thermocouples.

C'est la méthode la plus couramment utilisée pour mesurer la température. Dans le domaine de l'usinage, l'emploi de ces thermocouples requiert la réalisation de forages où les thermocouples sont ensuite positionnés. Pour évaluer la température au niveau de la zone de coupe et établir une cartographie thermique à l'intérieur de l'outil, notre objectif est d'installer un ou plusieurs thermocouples aussi près que possible de la zone

sollicitée. Le bénéfice de cette technique réside dans la faculté de les employer dans toutes les procédures de coupe.

➤ Mesure par lunettes pyrométriques :

Se produit soit sur la surface extérieure du copeau, soit sur la surface de l'instrument dégagée pendant une brève période. Ces dernières sont délicates, car les premières prises sont essentielles pour calibrer un modèle, mais il est à noter que les températures internes du copeau, déduites à partir de mesures effectuées sur la surface de l'outil dégagé, se produisent en des intervalles de temps très brefs. Il est extrêmement ardu d'extrapoler les données externes. [5]. [6].



Figure II.3 : Mesure par lunettes pyrométriques

II.2.2/ Effets de la température :

La température c'est le facteur qui a le plus d'impact sur l'usinabilité des métaux.

➤ Effet de la température sur l'outil de coupe :

L'outil à chaud est particulièrement affecté par la température, surtout lorsqu'on dépasse le seuil conseillé pour le matériau de coupe sélectionné. L'usure causée par une température de coupe élevée est plus prononcée dans les aciers au carbone et les aciers rapides, en raison de leur résistance relativement faible à la chaleur. Ce phénomène est interprété dans la figure suivante : [7]. [8].

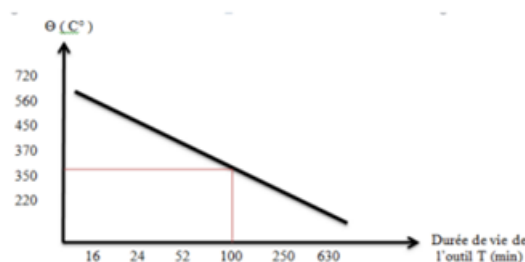


Figure II.4 : Température de coupe / la durée de vie de l'outil

➤ Effet de la température sur la pièce :

Contribue à la formation du copeau par la réduction des efforts de coupe mais :

- Risque de déformation (contraintes résiduelles dilatation - retrait),
- Difficulté de contrôle dimensionnel (écarts de température),
- Danger de la pression sur les appuis (dilatations),
- Mauvais état de surface (microsoudures et arrachement).

II.3/Formulation des modèles :

Il existe trois types de formulation majeur utilisé dans la simulation de l'usinage par la méthode des élément finis : formulation Lagrangienne, formulation Eulérienne et formulation arbitraire Lagrangienne – Eulérienne.

II.3.1 : Formulation de lagrangienne :

La description Lagrangienne est utilisée principalement dans les problèmes de la mécanique des solides. Pour la coupe, le maillage est attaché à la pièce permet d'éviter l'utilisation d'un critère de séparation du copeau. Néanmoins, le critère de séparation peut être défini pour la simulation de la coupe avec copeaux discontinus.

Pour cette méthode, le métal en cours de la coupe est exposé à d'énormes déformations plastiques qui peuvent causer la distorsion des éléments. Ainsi, le remaillage et le critère de séparation deviennent nécessaires ; d'où, un appel au maillage adaptatif ou bien la technique de remaillage automatique.

III.3.2/ Formulation Eulérienne :

Dans la formulation eulérienne, le maillage est réparé spatialement du flux de matière qui coule à travers le volume de contrôle qui élimine la distorsion de l'élément pendant le processus. En outre, moins d'éléments nécessaires à l'analyse, réduisant ainsi

temps de calcul. La coupe est simulée à partir de l'état d'équilibre et, par conséquent, il n'est pas nécessaire de critères de séparation dans les modèles à base d'Euler.

L'inconvénient de la formulation eulérienne est le besoin de déterminer les limites et la forme de copeau avant la simulation, aussi l'épaisseur des copeaux et la longueur de contact outil-copeau, en plus les conditions de contact entre l'outil et le copeau doivent être maintenues constantes au cours de l'analyse ce qui rend la formulation eulérienne ne correspond pas à la réalité du processus de déformation lors de la coupe.

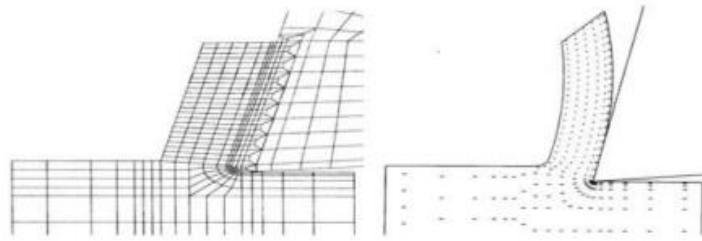


Figure II.5 : Configuration initiale et finale issues du modèle de Kim, Lee et Sin

III.3.3/ Formulation Arbitraire Lagrangienne Eulérienne (ALE) :

En effet, pour réaliser ce type de simulation, l'approche Lagrangienne est très bien adaptée à la modélisation de la structure mobile et/ou déformable alors que l'approche Eulérienne se prête parfaitement à l'écoulement du fluide. Il serait donc intéressant et nécessaire de combiner les avantages de chaque approche tout en évitant les problèmes associés. Cette technique est associée à une configuration dite Lagrangienne-Eulérienne-Arbitraire.

Dans le cadre de cette approche, le maillage n'est pas fixe spatialement ni attaché à la matière.

Les mailles suivent l'écoulement du matériau et le problème est résolu pour les déplacements dans l'étape Lagrangienne et les mailles sont repositionnées et le problème est résolu pour les vitesses en étapes Eulériennes.

L'idée utilisée dans la simulation de la coupe des métaux est d'utiliser la méthode Eulérienne pour modéliser l'aire autour du processus de coupe. Ainsi, sans remaillage, différents éléments sont détruits. L'approche Lagrangienne est utilisée pour l'écoulement des matériaux sans contraintes et pour des frontières libres. En plus la

formation du copeau a lieu comme fonction de la déformation plastique du matériau. Cette situation est illustrée par le schéma de la figure qui suit :

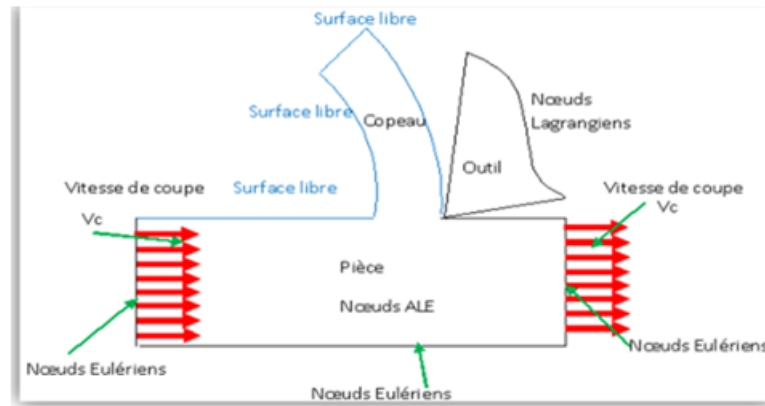


Figure II.6 : Conditions aux limites Lagrangiennes et Eulériennes

II.4/ Le maillage :

Dans la méthode des éléments finis, une zone continue est segmentée en unités distinctes connues sous le nom d'éléments. On appelle ce processus de discrétisation ou de maillage, qui est purement géométrique. Les mailles initiales des EF ne sont pas capables de conserver leur configuration générale et risquent de se détériorer en raison de diverses déformations plastiques lors de la coupe ou du façonnage des métaux. L'irrégularité causée par la non-linéarité entraîne des erreurs numériques. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de créer une nouvelle maille EF en vue de modifier la taille, un processus que l'on nomme procédure de maillage adaptatif.

La technique de remaillage continu, qui fait partie des méthodes de maillage adaptatif, implique la création de nouvelles mailles éléments finis en dehors des mailles existantes qui ont été détruites. La deuxième technique est appelée technique de raffinement basée sur l'augmentation de la densité des mailles locales par la réduction de la taille de l'élément local, comme est montré sur la figure suivante :

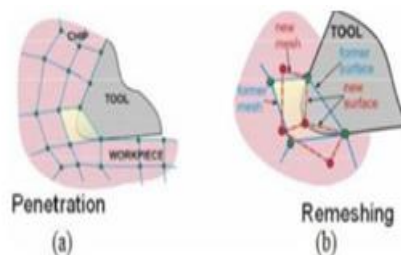


Figure II.7 : Raffinement : (a)maille locale initiale, (b) réduction de la taille de l'élément

La dernière technique des mailles adaptative est le lissage qui a pour objet la réallocation des nœuds pour avoir de meilleures formes d'éléments comme est montré sur la figure II.8. La procédure de maillage adaptative réduit les erreurs de la solution durant les calculs, ainsi elle améliore l'exactitude de la simulation. Pour ces raisons, la procédure des mailles adaptative doit être utilisée dans la simulation des EF y compris la déformation plastique comme la mise en forme des métaux.

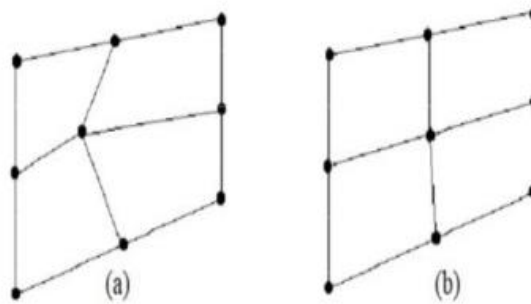


Figure II.8 : Lissage (a)maille locale initiale, (b) Réallocation des nœuds

II.5/ Les différents domaines de modélisation :

Lors de la modélisation d'une pièce mécanique, différents domaines peuvent être considérés en fonction du comportement souhaité et des conditions d'application. Les principaux domaines de modélisation sont la statique, la quasi-statique et la dynamique. Voici une brève description de chacun de ces domaines :

II.5.1/ Domaine statique :

La modélisation statique se concentre sur l'équilibre des forces appliquées à la pièce mécanique dans des conditions stationnaires. Elle permet d'analyser les contraintes internes, les déformations et les déplacements résultants des charges statiques appliquées sur la pièce. Ce domaine est couramment utilisé pour évaluer la résistance structurelle et la stabilité des composants.

II.5.2/ Domaine Quasi-statique :

La modélisation quasi-statique est utilisée lorsque les charges appliquées évoluent lentement par rapport à la réponse de la pièce mécanique. Ce domaine est souvent utilisé pour des applications où la vitesse de chargement est relativement faible par rapport aux propriétés dynamiques de la pièce, mais où des déformations significatives peuvent se produire.

II.5.3/ Domaine dynamique :

La modélisation dynamique considère le comportement d'une pièce mécanique soumise à des charges variables dans le temps. Elle prend en compte les effets des forces, des masses, des déplacements, des vitesses et des accélérations, ainsi que les interactions entre les différents composants.

II.6/ Les lois empiriques :

L'un des sujets les plus importants dans la simulation de coupe de métal est la modélisation appropriée d'écoulement de contraintes de la pièce pour obtenir de vrais résultats. Il dépend de la déformation, de la vitesse de déformation et de la température et elle est représentée par des formes mathématiques d'équations constitutives. Les plus utilisés dans les simulations de coupe de métal sont les modèles constitutifs des matériaux : Johnson-Cook, Johnson et Cook modifié et Zerilli-Armstrong.

II.6.1/ Modèle de Johnson et Cook :

Johnson et Cook (1993) [25] développent un modèle pour les matériaux 'barre de Hopkinson' pour une large gamme de vitesse de déformation et de température.

La contrainte équivalente est exprimée par le modèle de Johnson-Cook sous la forme d'une fonction de trois constantes du matériau :

La déformation plastique ϵ^p

La vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$

La température instantané T

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

La loi de comportement de Johnson-Cook requiert la détermination de 5 paramètres, à savoir A, B, C, n et m. Les paramètres et sont associés à la réponse élasto-plastique du matériau, ils permettent de caractériser la réactivité face à la vitesse de déformation, tandis que m représente la réactivité du matériau à la température. Les températures indiquent une température de référence et une température de fusion.

II.6.2/ Loi de Johnson et Cook modifiée :

Marusich et Ortiz ont élaboré en 1995 une version modifiée de la loi de Johnson et Cook. Elle implique la division de la gamme des vitesses de déformation en deux zones distinctes afin de considérer le changement de sensibilité à la vitesse lors des sollicitations à grande vitesse. On définit donc le comportement comme suit :

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

$$\sigma = (A + B(\varepsilon^p)^n) \left(1 + \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{(C_1 - C_2)} (\dot{\varepsilon}_0)^{C_2} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right)^m \right] \text{ Pour } \dot{\varepsilon} \geq \dot{\varepsilon}_t$$

Avec

$\dot{\varepsilon}_t$: Est la limite du domaine de déformation.

II.6.3/ Modèle de Zerilli et Armstrong :

Zerilli et Armstrong développent deux équations constitutives microstructurales : Cubique à face centrée et cubique centré pour analyser leur température et haute vitesse de déformation et signalent une différence significative entre ces métaux ainsi ils développent 2 modèles distincts. L'équation constitutive pour les métaux CFC et CC peut être écrite comme suit :

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

Dans le cas d'un matériau cubique centré :

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

Dans ces équations, C_0 est la composante de contrainte qui correspond à la densité de dislocation sur les contraintes d'écoulement C_0, C_1, \dots, C_5 et n sont des constantes du matériau, T température absolue.

Chapitre III :

Modélisation et simulation en 3D avec ANSYS pour une opération de rainurage par la méthode des éléments finis

I.1/ Introduction :

De nombreuses industries recherchent une compréhension globale du processus de coupe des métaux pour améliorer la fabrication, la qualité, les performances des outils de coupe et réduire les coûts.

Dans cette partie de notre travail, nous nous intéressons aux mesures de température lors de l'opération de rainurage lors du fraisage de l'acier XC48, car il est

très important de connaître la température de coupe car elle a une grande influence sur le choix du matériau et les conditions de coupe optimales.

L'objectif de toute simulation est d'optimiser les conditions de coupe et de déduire quelles valeurs de température permettent une usure proche de zéro. De nombreuses industries recherchent une compréhension globale du processus de coupe des métaux pour améliorer la fabrication, la qualité, les performances des outils de coupe et réduire les coûts.

Pour cela, on a utilisé la loi de comportement et d'endommagement de Johnson Cook dans le but de prévoir la distribution de la température à l'interface outil/copeau.

Nous utiliserons pour notre démarche de simulation, la version explicite du logiciel ANSYS.

III.2/ Analyse par la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est une technique numérique utilisée pour résoudre des problèmes complexes en mécanique et dans d'autres domaines de l'ingénierie. Il permet de résoudre approximativement les problèmes d'un système en le subdivisant en éléments plus simples. [9]. [10].

Chaque élément est caractérisé par un ensemble de propriétés, telles que la géométrie, le matériau et les conditions aux limites. À l'aide de techniques d'approximation, les équations mathématiques décrivant le comportement du système sont résolues pour chaque élément séparément. Ces équations sont ensuite combinées dans un système global qui est résolu pour obtenir la solution complète du problème.

III.3/ Application au modèle numérique :

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

Il y a plusieurs paramètres importants à prendre en compte pour la modélisation de l'usinage. On donne dans ce qui suit la démarche à effectuer pour simuler la coupe orthogonale 3D de l'acier XC48 avec le logiciel ANSYS. [11]. [12].

III.4/ ANSYS explicite :

Pour notre approche de simulation, nous utiliserons la version explicite du logiciel ANSYS : un produit d'analyse par éléments finis qui utilise un schéma

d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques non linéaires et quasi-statiques.

Cette norme de base intégrée permet également une gestion simplifiée des contacts (frottements), que nous appliquons dans notre cas à la découpe des métaux.

III.5/ Loi de comportement d'Acier XC 48 :

Le choix de la loi de comportement adaptée est primordial dans l'établissement d'un modèle numérique. Pour décrire le comportement mécanique et thermomécanique de la pièce en Acier XC48 afin de simuler la coupe orthogonale 3D, la loi de type Johnson Cook a été choisie.

III.5.1/ Comportement mécanique de la pièce :

Un modèle 3D de coupe orthogonale basé sur une approche lagrangienne a été employé pour mener à bien une analyse couplée thermomécanique dans le code de calcul ANSYS.

Le modèle se compose d'une pièce déformable et d'un outil rigide.

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

Avec :

σ : est la contrainte équivalente qui représente la limite d'écoulement plastique.

$\bar{\epsilon}^p$: La déformation plastique équivalente

$\dot{\epsilon}$: est la vitesse de déformation plastique

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

T_{amb} : est la température ambiante ou de référence

T_0 : est la température de fusion.

A, B et n : sont les paramètres représentant l'écrouissage

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

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

III.5.2/ Critère d'endommagement de Johnson-Cook :

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

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

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 \exp D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 + D_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right) \right)$$

Avec :

ε_f : La déformation équivalente à rupture du matériau.

σ_m : La contrainte moyenne.

σ_{eq} : La contrainte équivalente de von mises.

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

III.6/ Modélisation de l'outil et de la pièce (Création du modèle) :

Le logiciel SolidWorks est utilisé pour modéliser des pièces mécaniques et des outils de coupe. Ce dernier dispose d'une interface ergonomique qui facilite le dessin de pièces mécaniques complexes. Une autre raison de ce choix était que, dans le cadre de notre cursus universitaire, nous avons l'opportunité de nous former et de pratiquer SolidWorks en travaux pratiques au Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida 1.

III.6.1/ Les étapes suivi pour réalisation de la pièce :

Le premier élément à être modélisé sur Solid Works était la pièce à usiner. Voici la séquence des phases de modélisation :

- Choisir le plan pour débiter dessiner. (Voir la figure suivante)

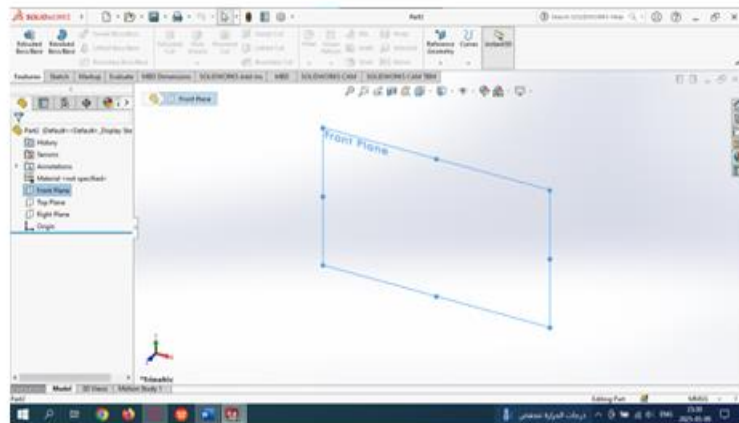


Figure III.1 : Sélectionner le plan

- Dessiner un rectangle présentant une longueur de 100 mm et une largeur de 60 mm. (Voir la figure suivante)

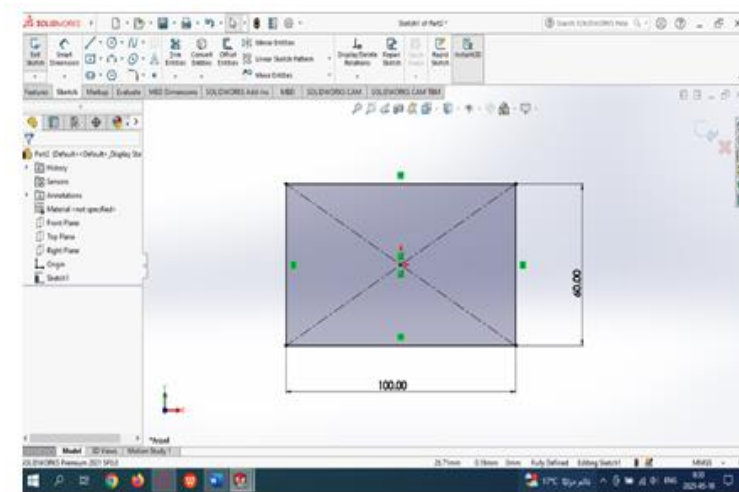


Figure III.2 : Elaboré le rectangle

- Extruder le rectangle dessiné sur une hauteur de 10 mm (Voir la figure suivante)

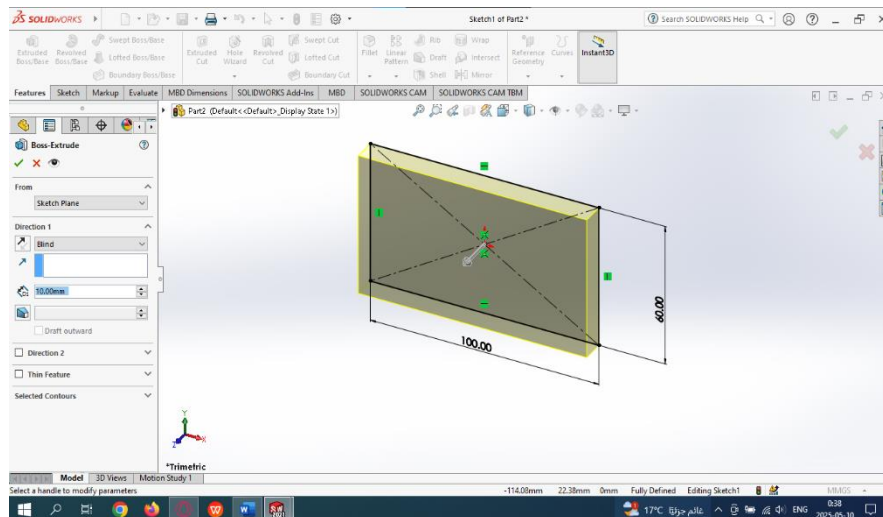


Figure III.3 : Extrude le rectangle

- Enregistrer la géométrie finale sous le format : SLDPRT. (Voir la figure suivante)

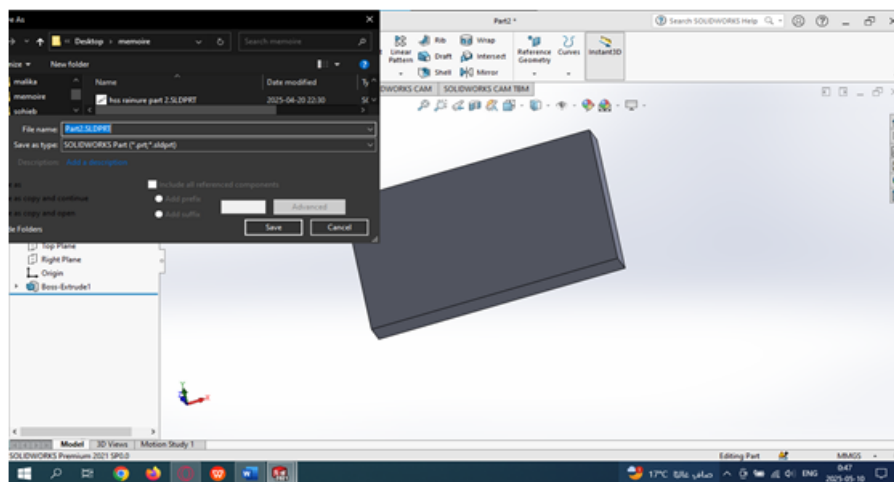


Figure III.4 : Enregistrer la pièce

III.6.2/ Réalisation de l'outil de coupe (la fraise) :

Dans le contexte de cette étude, l'outil de coupe sélectionné est une fraise équipée de deux tailles et quatre dents.

Cette dernière a été modélisée en suivant les étapes ci-après :

- Choisir le plan pour débuter dessiner. (Voir figure suivante)

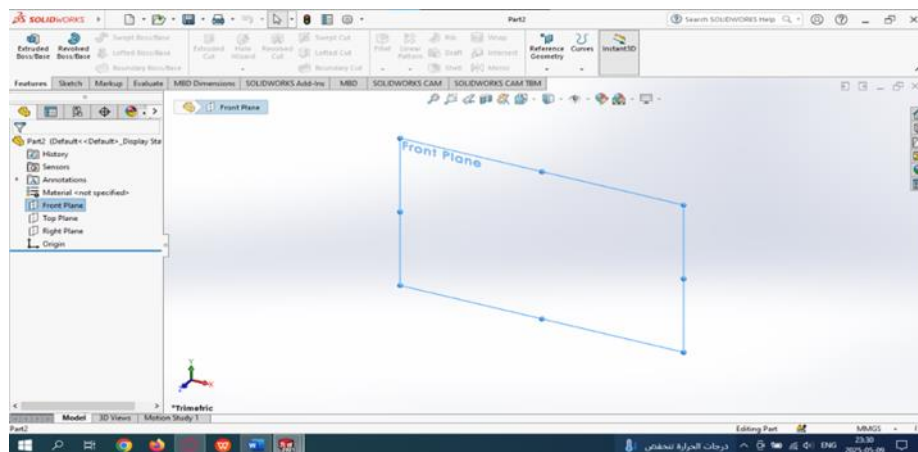


Figure III.5 : Choisir le plan

- Nous avons dessiné le cercle 1 avec un diamètre 20 mm comme indiqué sur la figure ci-dessous.

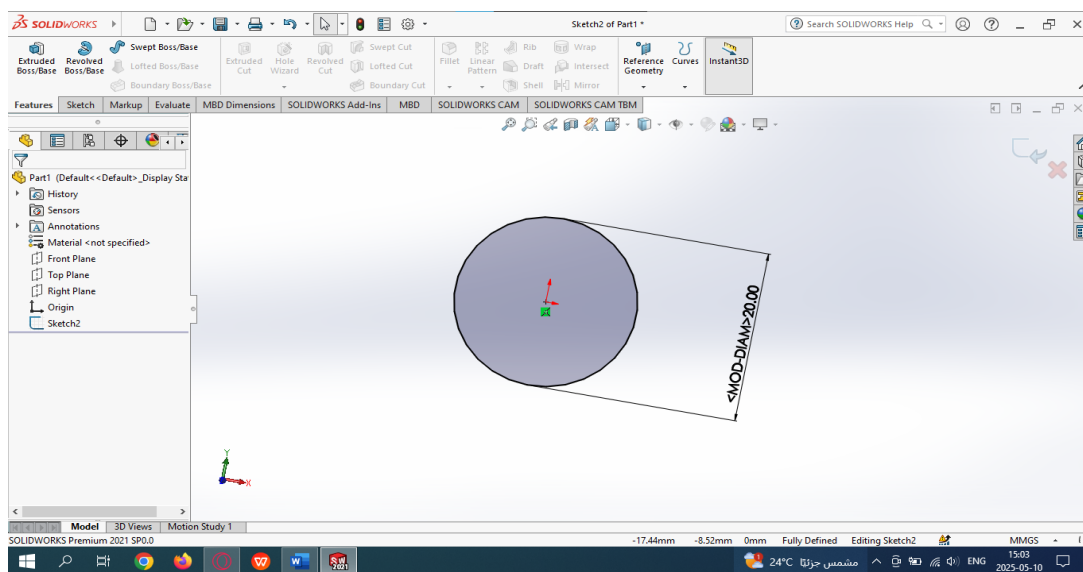


Figure III.6 : Dessiner le cercle

- Extruder le cercle 1 de 104mm vers le haut comme indiqué sur la figure suivante :

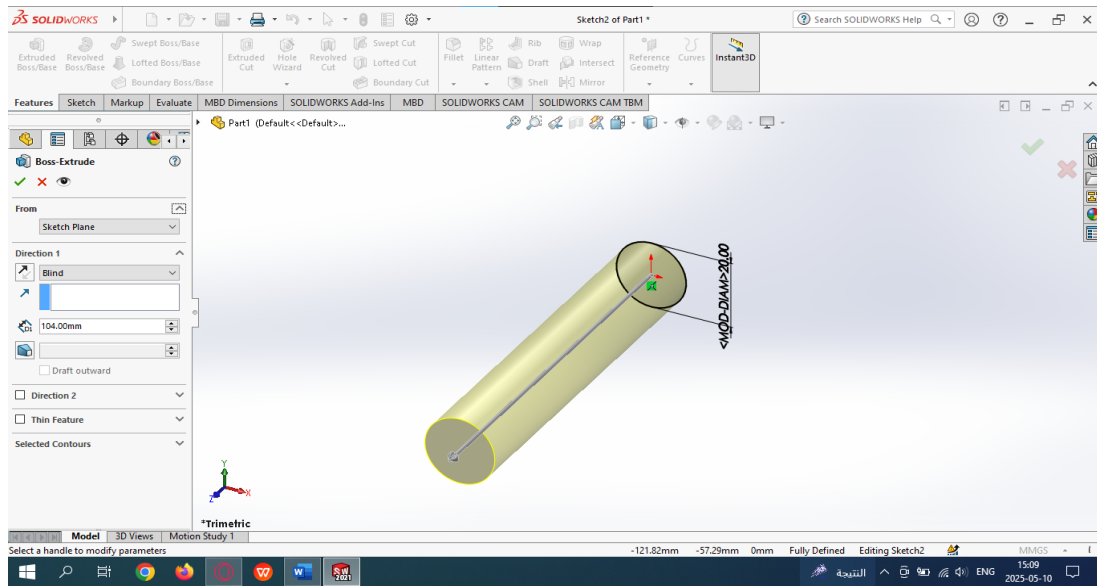


Figure III.7 : Extrude le cercle 1

➤ Puis, nous avons tracé le cercle 2 à la base de l'élément (dans le même plan), précisément au centre du cercle 1, avec un diamètre de 12mm. Par la suite, deux lignes divisant nos cercles en quatre sections sont mises en place pour assurer la symétrie. Dans l'une de ces quatre sections, nous avons tracé la ligne 1 qui joint les deux cercles. À partir du point qui coïncide avec le cercle intérieur (cercle 2), nous avons esquisé l'arc 1 d'un rayon de 8 mm en direction du cercle extérieur (cercle 2) pour constituer la base du volume qui sera enlevé. Deux autres tracés (2 et 3) sont créés à l'extérieur de la pièce, reliant le point initial de la ligne 1 au point terminal de l'arc 1 après avoir finalisé l'esquisse comme montré sur la figure ci-dessous :

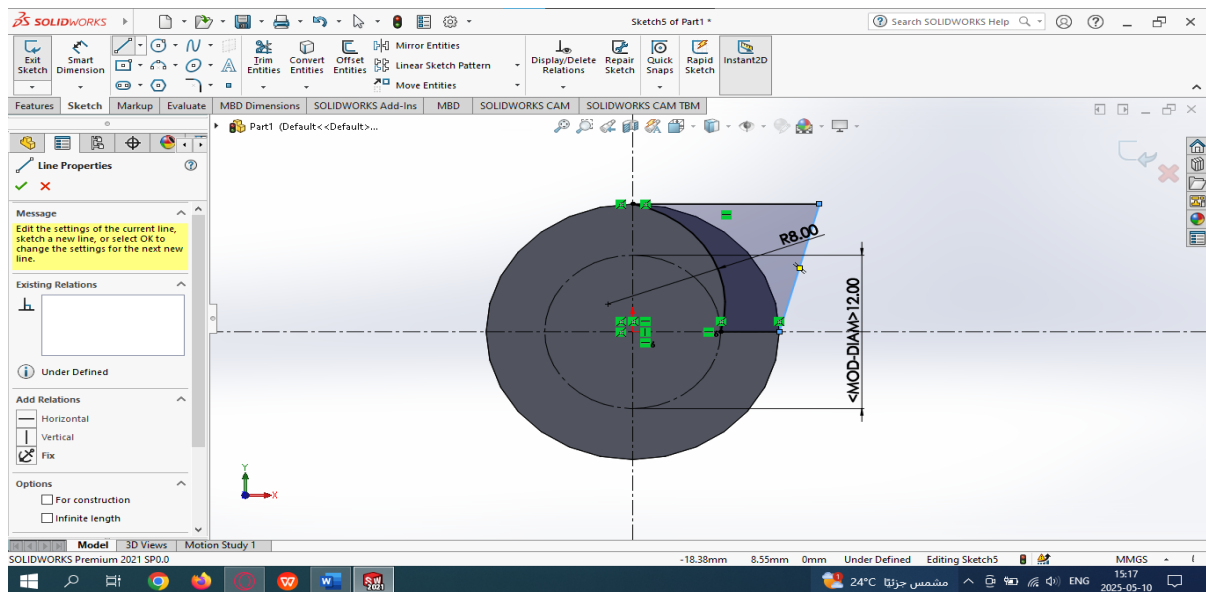


Figure III.8 : Dessin le cercle 2 et le rayon 1

➤ Dans la vue de face, nous avons tracé la ligne 4 à partir du premier point de la ligne 1, qui monte vers le haut avec une élévation de 34mm. Par la suite, nous avons tracé l'arc 2 à partir du sommet de la ligne 4, en direction de l'extérieur de la pièce avec un rayon de 30mm, puis nous avons finalisé le croquis.

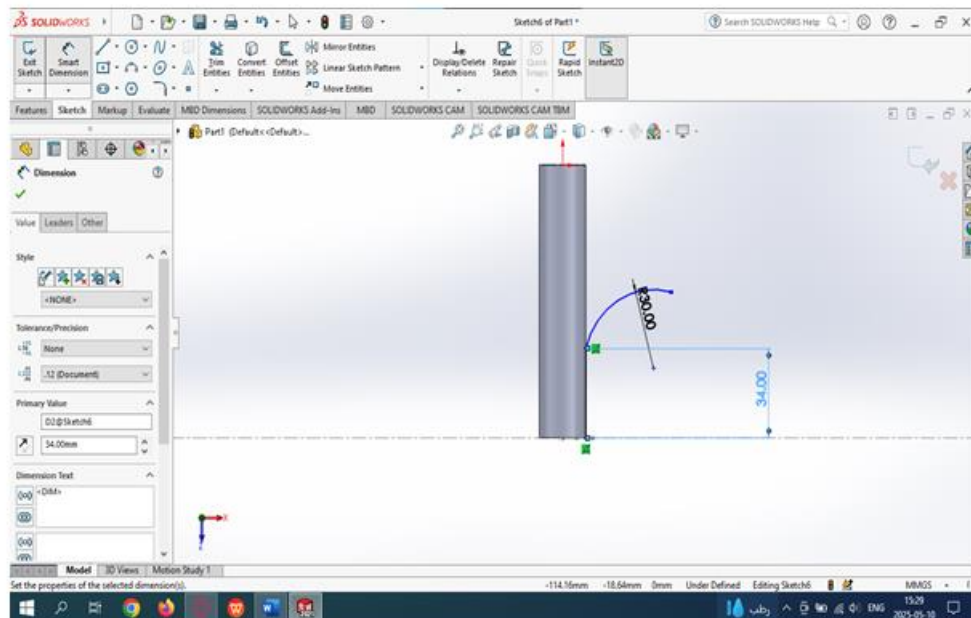


Figure III.9 : Dessin la ligne 4 et le rayon 2

➤ Nous avons fait une coupe avec une option « Swept Cut » qui enlève la matière pour former une dent de la fraise.

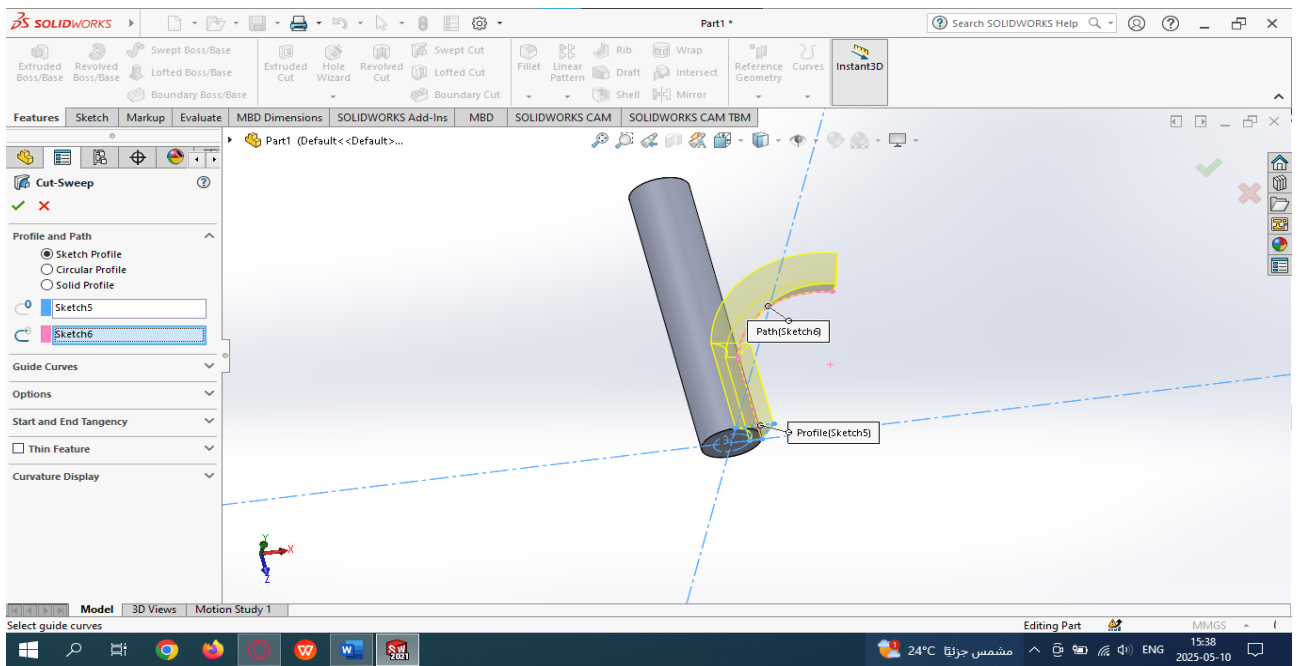


Figure III.10 : Former une dent de la fraise (Vue 1)

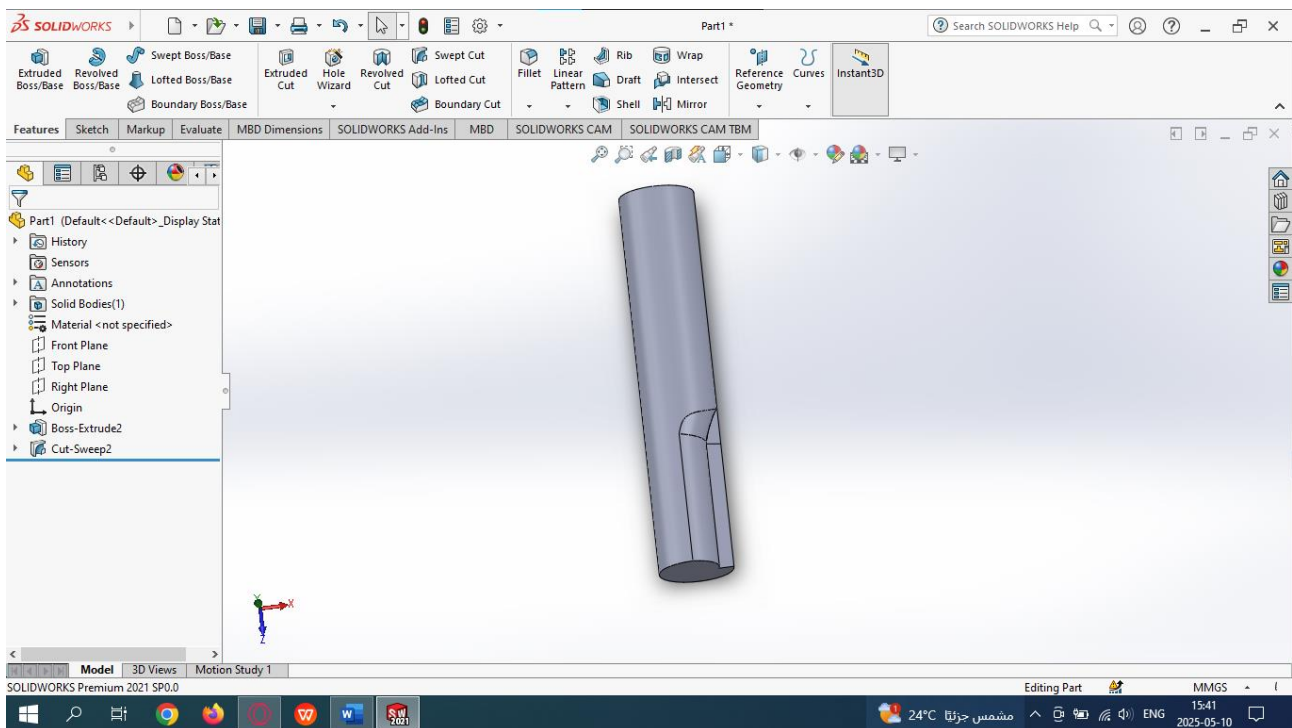


Figure III.10 : Former une dent de la fraise (Vue 2)

- A ce stade, nous cliquons sur une option « Circular Pattern » pour obtenir les 3 dents restantes et nous avons un total de 4 dents.

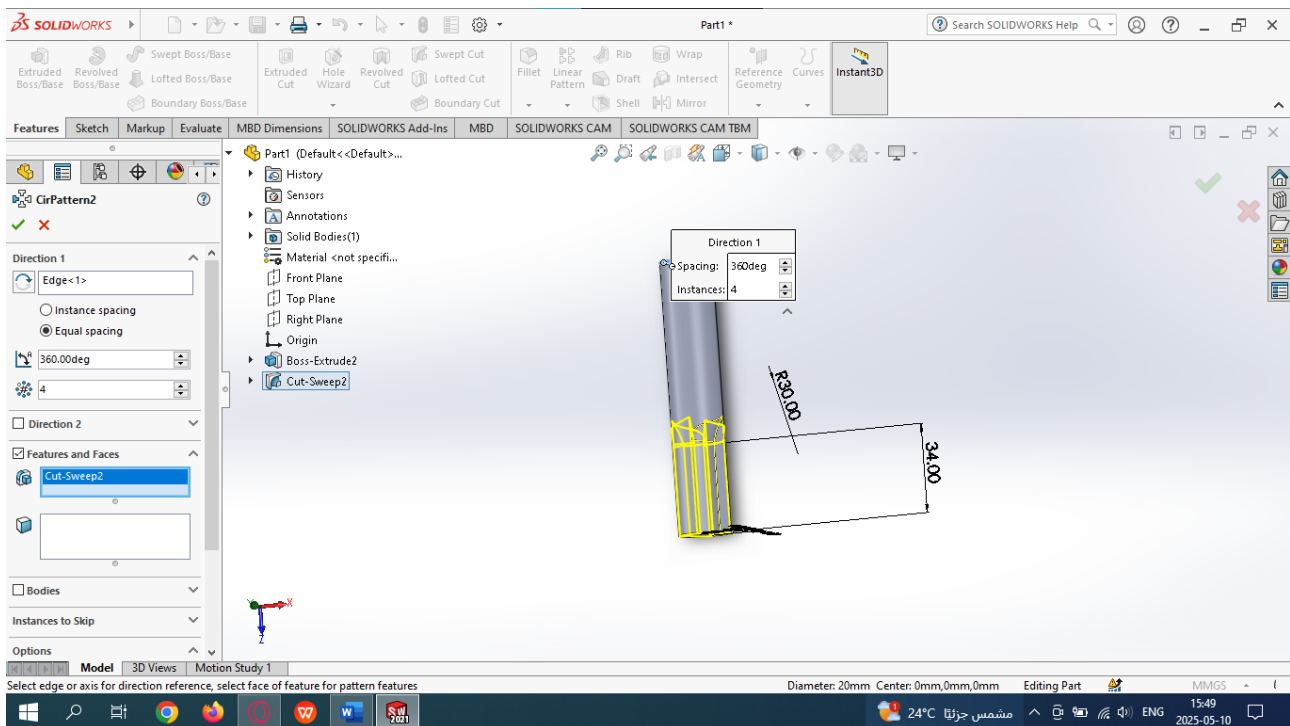


Figure III.11 : Former les 3 dents restantes (Vue 1)

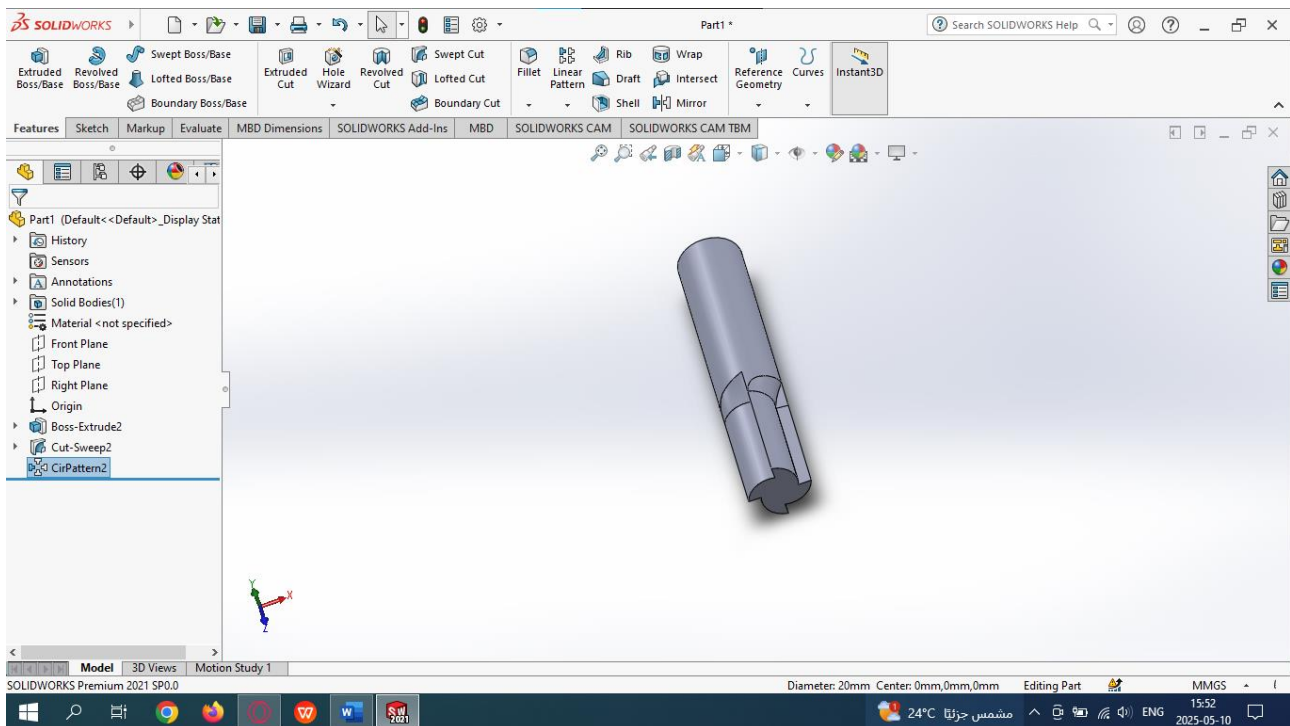


Figure III.11 : Former les 3 dents restantes (Vue 2)

➤ Obtenir la forme finale de la fraise comme indiqué sur la figure ci-dessous :

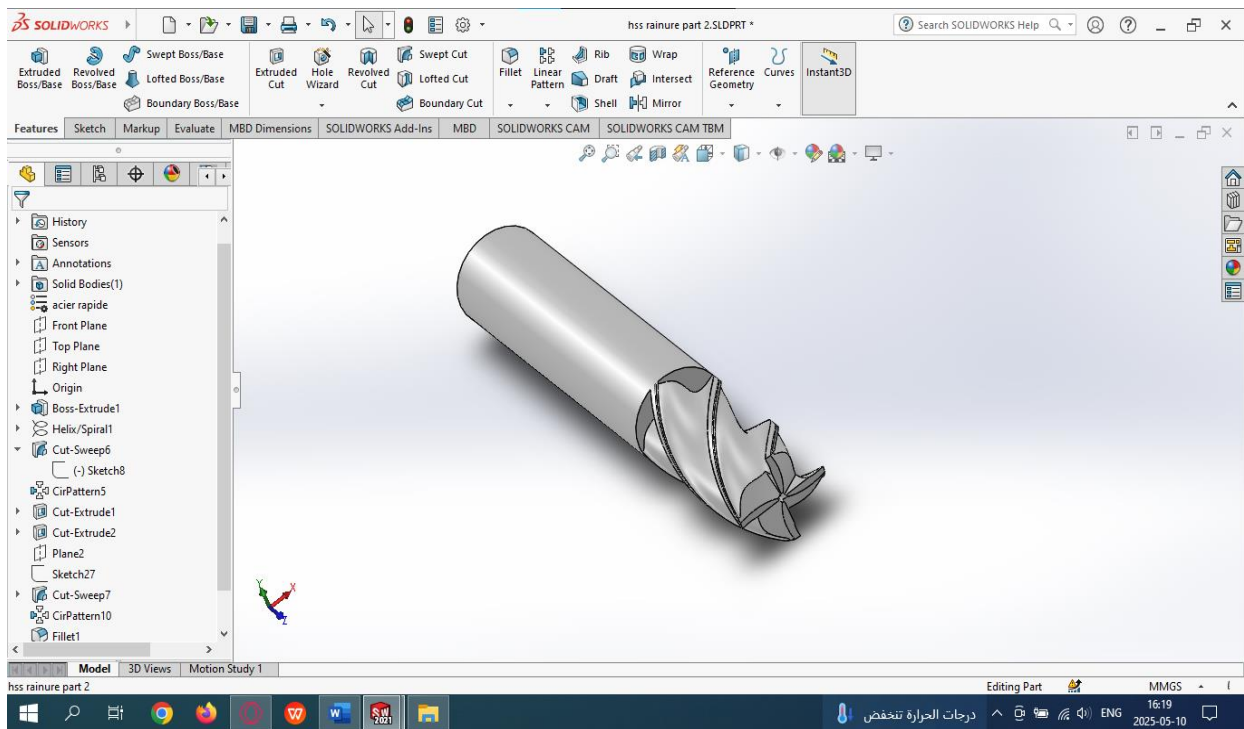


Figure III.12 : Génération le volume final

➤ Enfin, enregistrer cet outil de coupe sur un fichier SLDPRT.

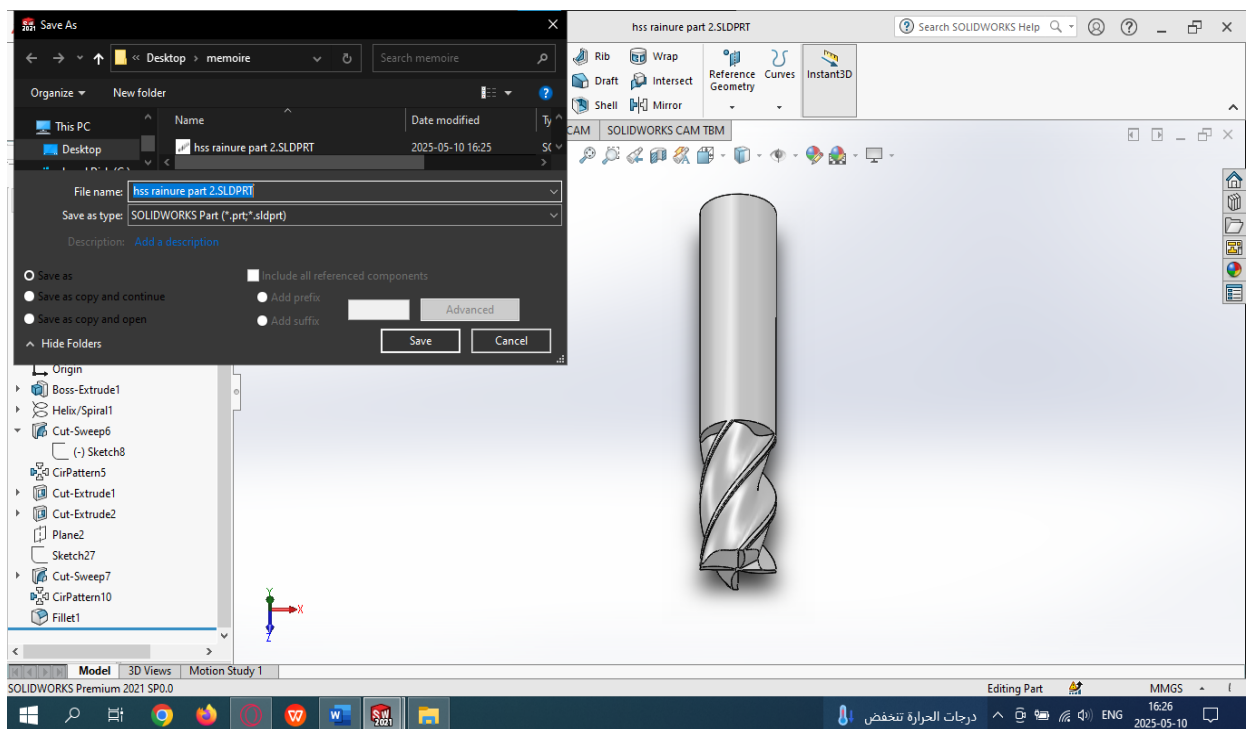


Figure III.13 : Enregistrer de l'outil de coupe

III.6.3- Assemblages :

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

On a suivi les étapes suivantes pour effectuer l'assemblage :

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

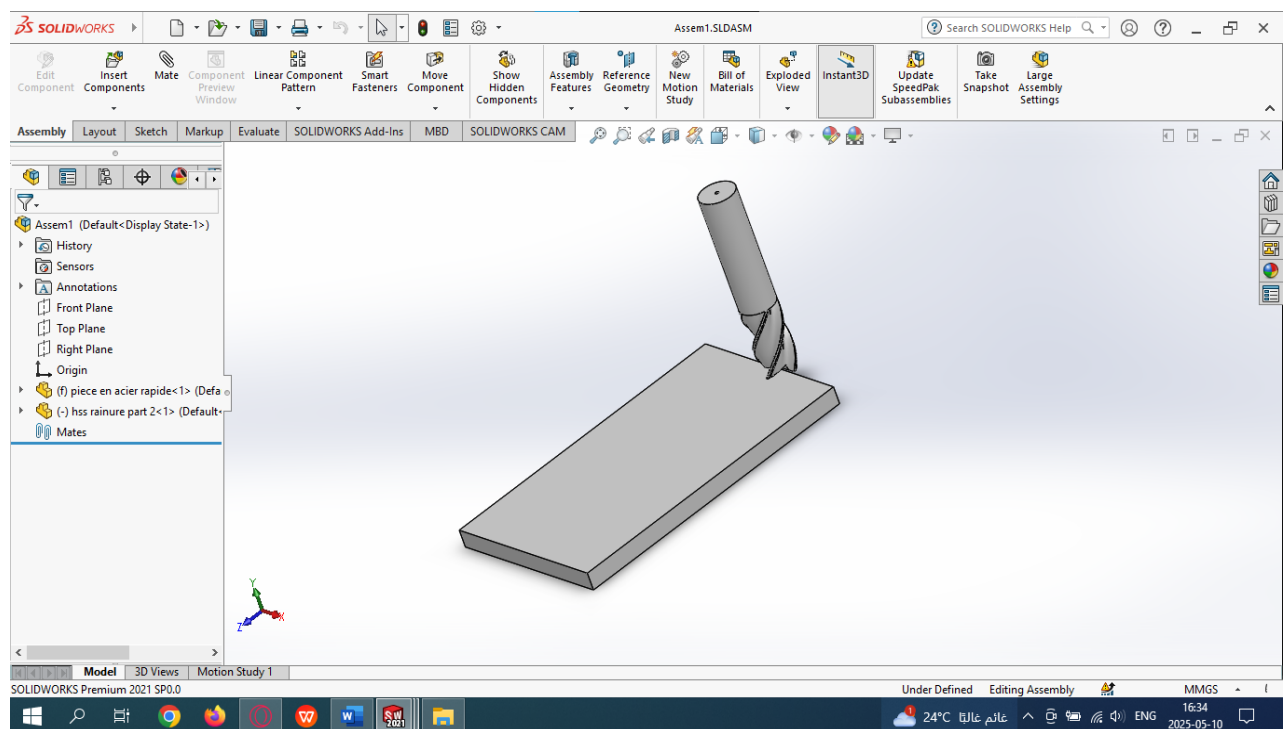


Figure III.14 : L'ensemble outil/pièce

III.7/ Simulation du problème en ANSYS :

Dans cette section, on utilise le code ANSYS 15.0.7 pour simuler le comportement du mécanisme de contact par frottement entre les deux éléments (l'outil et la pièce) lors d'une opération de rainurage dans le cadre d'un procédé de fraisage. Ce

code intègre des algorithmes de gestion du contact avec frottement qui reposent sur la technique des multiplicateurs de Lagrange, ou une méthode améliorée du Lagrangien.

III.8/ Les procédures pour la modélisation :

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

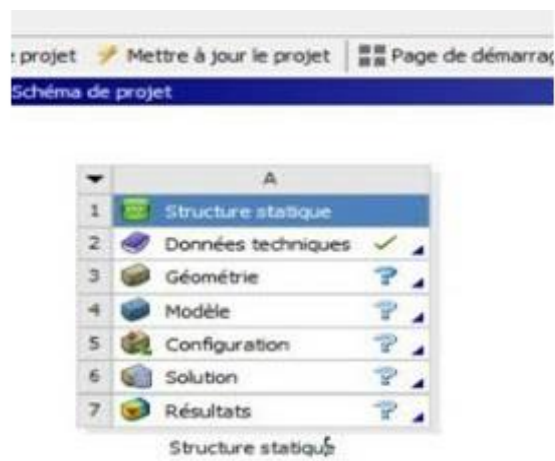


Figure III.15: Les procédures à suivre

III.8.1- Les données techniques :

Cette étape implique la détermination du matériau. On sélectionnera les matériaux à partir de la bibliothèque du logiciel en définissant pour chaque élément leurs propriétés mécaniques et physiques.

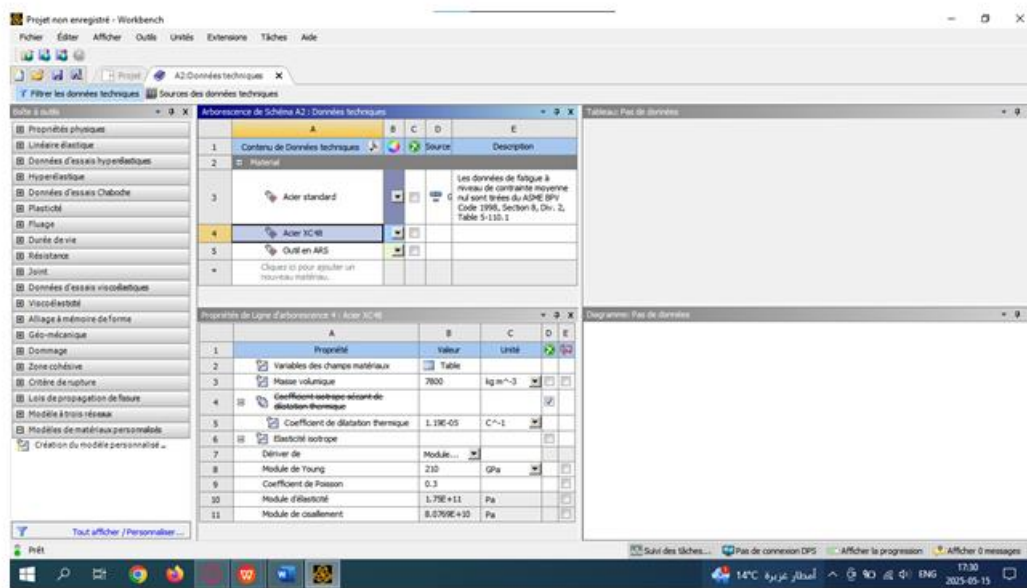


Figure III.16 : Les données techniques

III.8.2/ Géométrie (Modélisation de l'outil de coupe et de la pièce) :

Nous allons modéliser numériquement les différentes phases du processus de fraisage périphérique de l'acier XC48 à l'aide d'une fraise en acier rapide ARS de deux tailles et quatre dents.

La fraise est parfaitement rigide, alors que la pièce est déformable. Les propriétés thermomécaniques de Johnson Cook de plasticité et d'endommagement sont introduites dans le tableau suivant, le contact a des propriétés thermomécaniques, la température ambiante est égale à 20°C.

Le coefficient de frottement est $j = 0.4$, la méthode de simulation choisie dans notre cas est l'approche Lagrangienne pour les avantages qu'elle nous offre sur le comportement réel de l'usinage comme la formation du copeau et sa courbure le long de la longueur de la pièce.

L'outil de coupe est une fraise à 2 tailles et 4 dents, de diamètre D est égal à 20mm, il est assimilé à un corps indéformable (rigide), aucun champ de déformation sur le corps.

Le tableau suivant donne respectivement les critères et les paramètres de la loi de Johnson Cook de l'acier XC 48 :

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

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

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	ϵ_0
0.25	4.38	2.68	0.002	0.61	1

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

✓ **Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce en acier XC 48 :**

Les propriétés thermomécaniques de l'acier XC48 sont représentées dans le tableau suivant :

Propriétés	XC48
Module de Young (GPa)	210
Coefficient de Poisson	0.3
Conductivité (W/mk)	47
Chaleur spécifique (J/kg k)	432
Coefficient de dilatation thermique (m/m°C)	11.9×10^{-6}
Densité (kg/m3)	7800

Tableau III.3 : les propriétés thermomécaniques de matériau XC 48

✓ **Les propriétés physiques et mécaniques de l'outil en acier rapide HSS :**

Les propriétés thermomécaniques de l'acier rapide HSS sont représentées dans le tableau suivant :

Propriétés	ARS
Densité (kg/m3)	7816
Module de Young (GPa)	200
Résistance à la traction ultime (MPa)	1200
Limite d'élasticité (MPa)	1000
Capacité thermique (J/g·K)	470
Point de fusion (°C)	1430

Tableau III.4 : les propriétés thermomécaniques de l'outil de coupe en ARS

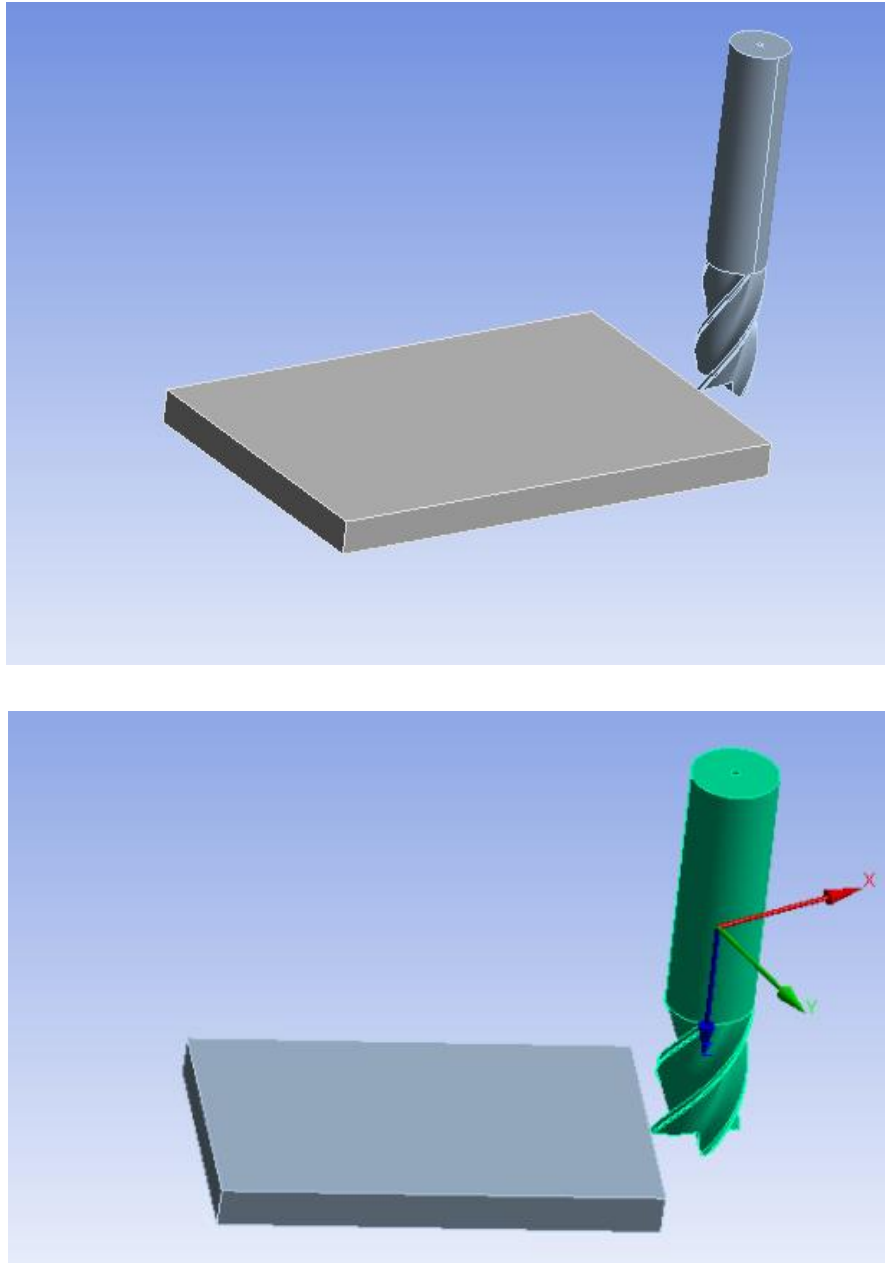


Figure III.17 : Géométrie de ce modèle

III.8.3/ Modèle :

Plusieurs étapes sont engendrées :

- ✓ L'affectation des matériaux sur les géométries de modèle est effectuée dans cette étape. Pour la simulation la pièce est en acier XC 48 et l'outil de 2 tailles et 4 dents est en acier rapide ARS.

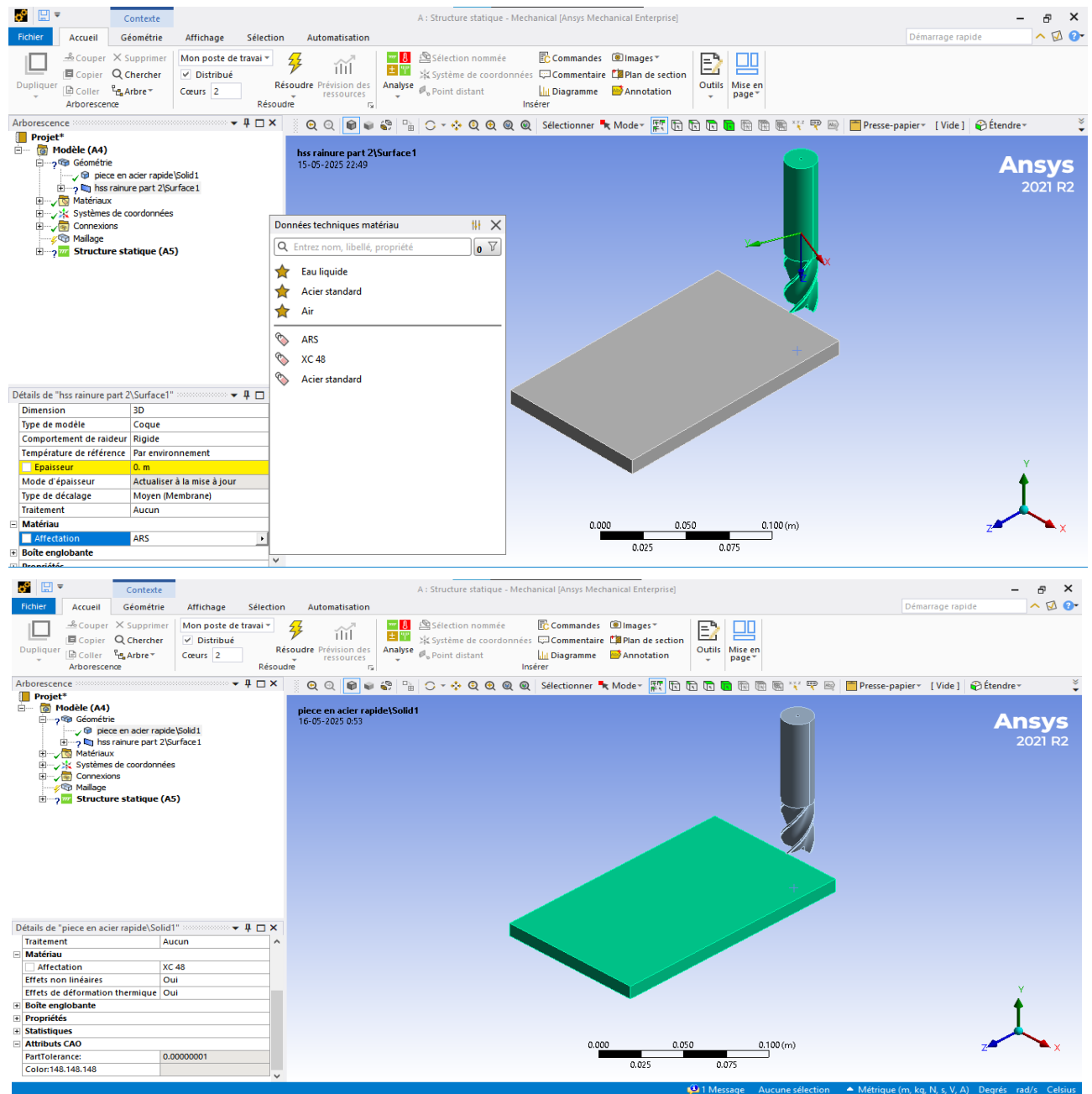


Figure III.18 : Affectation des matériaux pour l'outil et la pièce

✓ Définition des systèmes de coordonnées globale et locale.

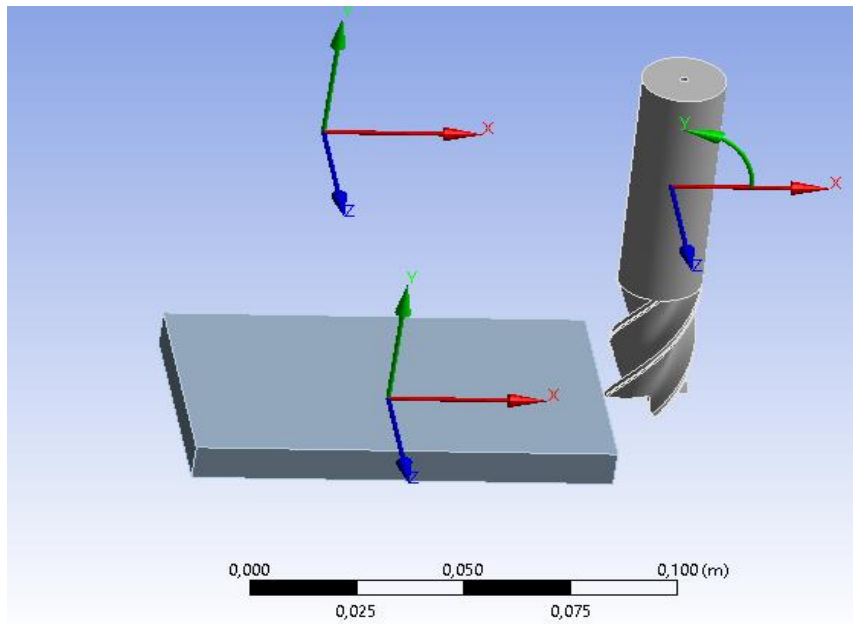


Figure III.19 : Système des coordonnées

- ✓ Définition des connexions : l'interaction de la pièce et de l'outil de coupe. Les propriétés de contact adoptées sont les suivantes : coefficient de frottement, coefficient dynamique et la température initiale de la pièce et l'outil de 20 °.

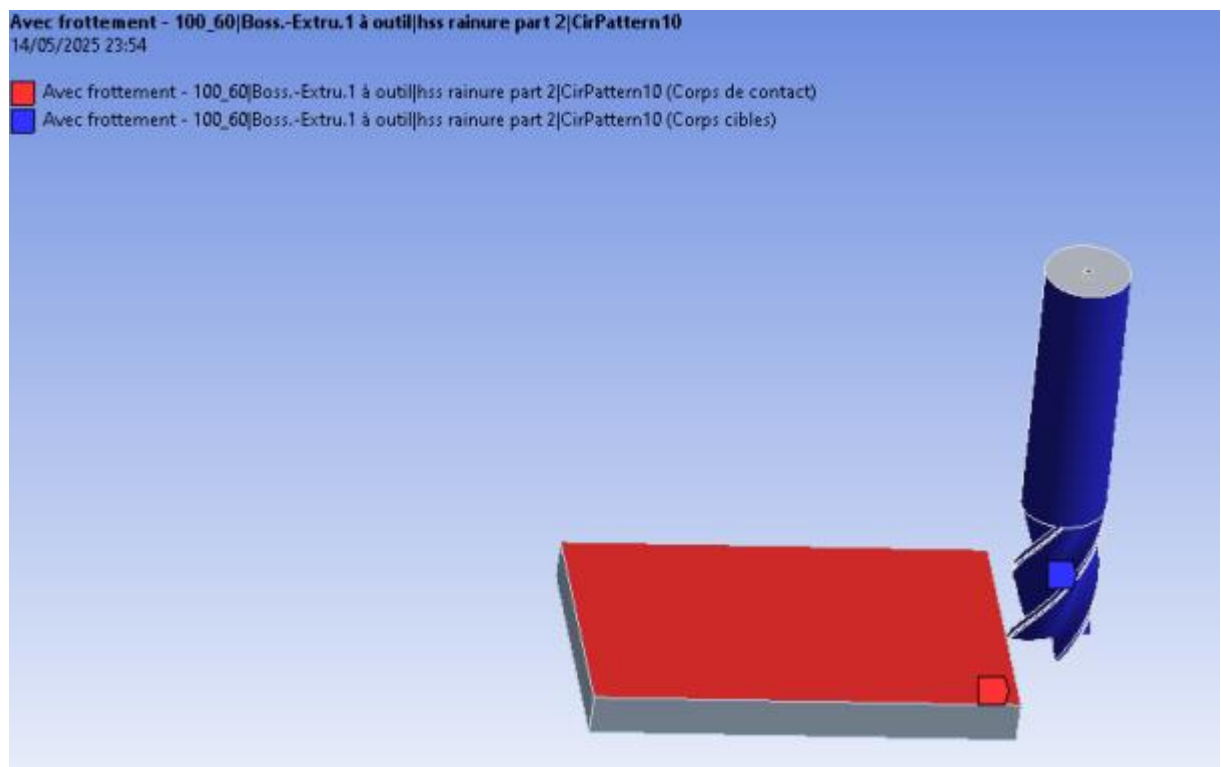


Figure III.20 : Interaction entre l'outil de coupe et la pièce à usiner

III.8.4/ Conditions aux limites :

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

Le modèle ci-dessous représente une opération de rainurage du procédé de fraisage. Les essais de coupe à sec ont été conduits selon plusieurs vitesses de coupe et avances.

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

Le 1ère cas : $f = 0.4$ mm/tr et $V_c = 900$ m/min

Le 2ème cas : $f = 0.2$ mm/tr et $V_c = 720$ m/min

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

A- Les conditions initiales aux limites :

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

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

La condition de contact outil/ pièce

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

Avec :

T : Température (°C)

k : Conductivité thermique (W/m K)

c : Chaleur spécifique (J/kg K)

B- Le modèle thermique 3D du dispositif de coupe :

Le modèle thermique 3D est développé pour décrire la répartition de la température dans la coupe régulière et le processus de refroidissement.

Les coordonnées cartésiennes de diffusion peuvent être écrites :

Avec :

T : Température ($^{\circ}\text{C}$)

k : Conductivité thermique (W/m K)

c : Chaleur spécifique (J/kg K)

ρ : Densité (Kg/m^3)

III.8.5/ Le maillage :

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

Le couplage thermomécanique est introduit. La distribution des mailles est uniforme sur toute la surface de l'outil. La méthode de raffinement de maillage a été faite pour améliorer la précision des solutions, une densité de maillage est très élevée sur la face d'attaque de l'outil pour obtenir plus de résultats comme la température. Le frottement de Coulomb est déterminé par le contact entre l'outil et la pièce à usiner, les propriétés de contact sont : coefficient de frottement est de 0.4, le coefficient dynamique est de 0.2 et la constante de dégradation est égale à zéro, La température initiale de la pièce et de l'outil est de 20°C .

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

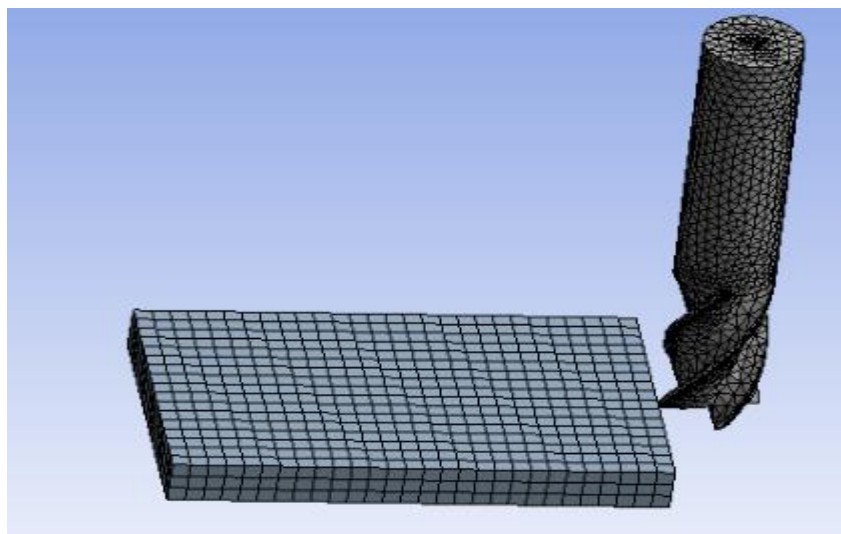


Figure III.21 : Génération du maillage et raffinement

III.8.6- Configuration :

Dans cette étape on spécifie les conditions initiales :

- Vitesse angulaire de la broche,
- Vitesse d'avance pour la pièce,
- Les déplacements,
- Des réglages d'analyse : spécification de l'heure de fin.

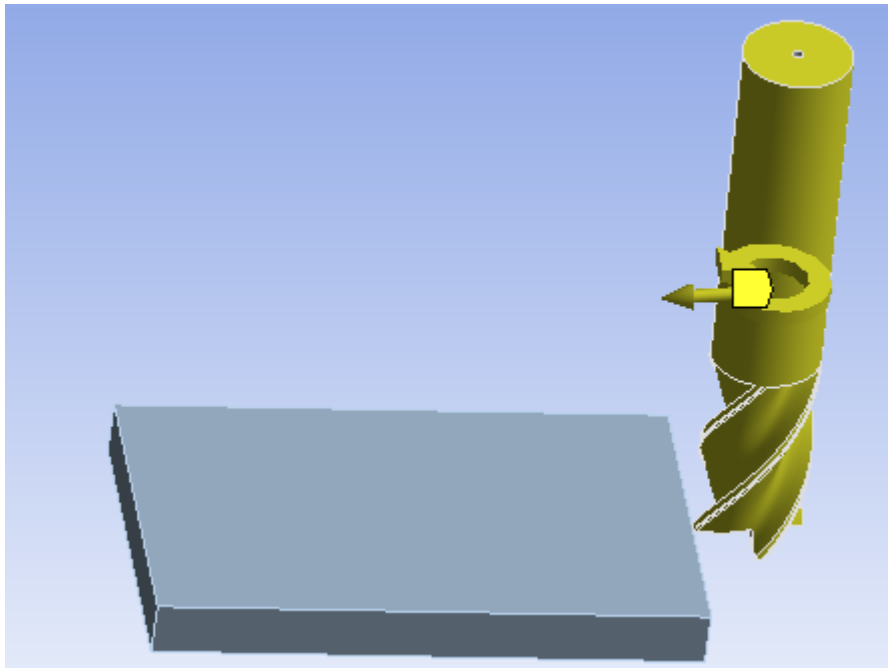


Figure III.22 : Configure les déplacements

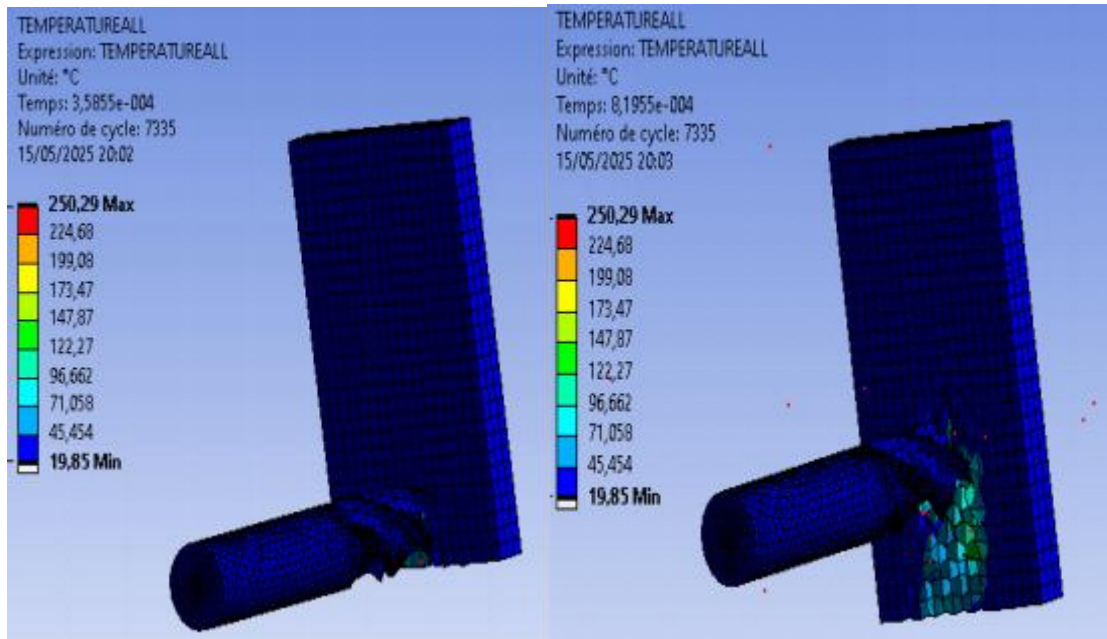
III.8.7/ Résultats de la simulation :

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

A- Distribution de la température à l'interface outil/pièce/copeau :

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

- 1^{ère} Cas : $V_c = 900$ m/min, $f = 0,2$ mm/tr



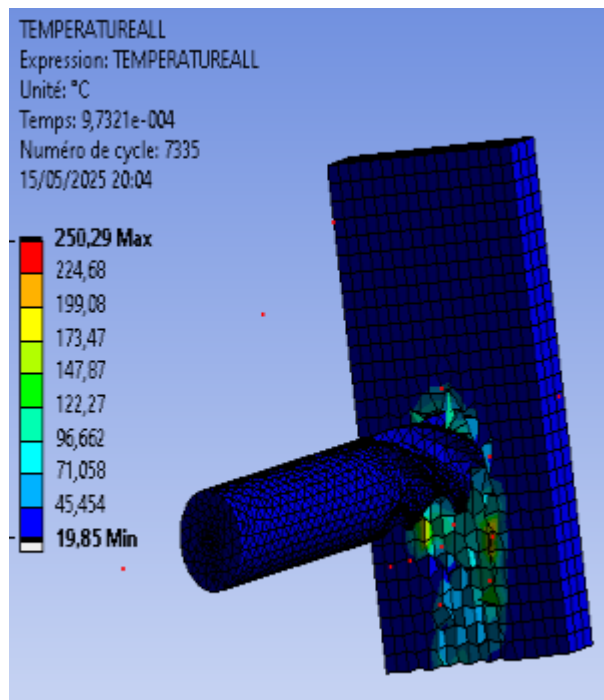
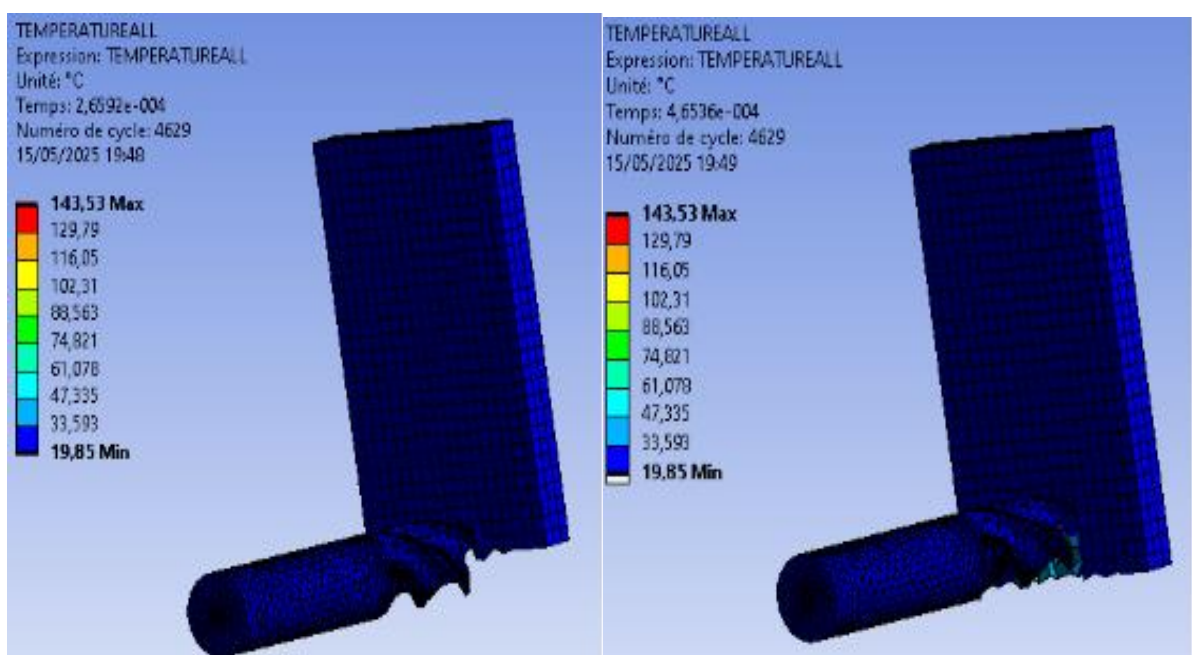


Figure III.23 : La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48

($V_c = 900$ m/min and $f = 0,2$ mm/tr)

D'après la figure présentée ci-dessus), la température maximale est de :250,29°C et la température minimale est de : 19,85 °C.



- 2^{ème} Cas : $V_c = 720$ m/min et $f = 0,4$ mm/tr :

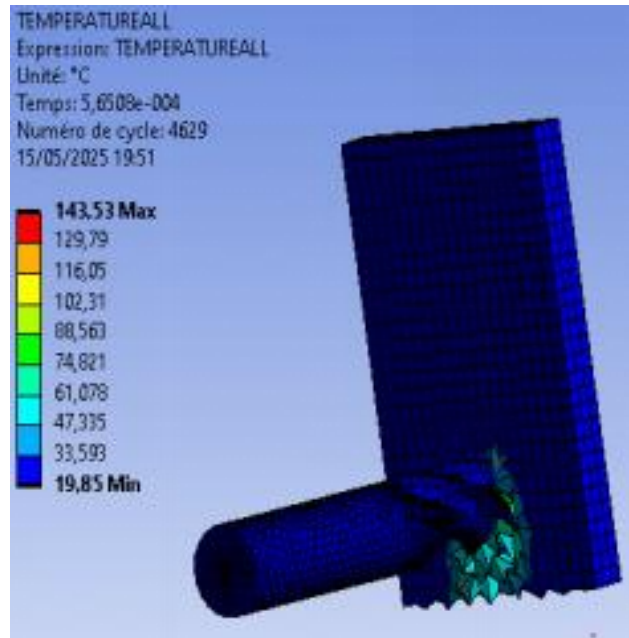


Figure III.24 : La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48

($V_c = 720$ m/min et $f = 0,4$ mm/tr)

D'après la figure III.24, la température maximale est de : $143,53^{\circ}\text{C}$ et la température minimale est de : $19,85^{\circ}\text{C}$.

De ces différentes opérations, on remarque sur les figures que la température de la pièce au contact avec l'outil varie. Pour une vitesse de coupe de 900 m/min, la température atteint une valeur maximale $T_{\text{max}} = 250,29^{\circ}\text{C}$ par contre $T_{\text{max}} = 143,53^{\circ}\text{C}$ pour une vitesse de coupe de 720 m/min (flamme rouge). Cette différence est essentiellement due à la zone de contact entre la pièce et l'outil : plus elle est importante, plus la température est élevée. Ces résultats montrent que la température dans la zone de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe. En adoptant la méthode

Lagrangienne, la température est uniformément distribuée sur les surfaces et la morphologie du copeau est meilleure.

La conduction présente une influence sur la répartition des températures dans le copeau.

Cette dernière met en évidence l'action entre les phénomènes de transport, qui sont chargés d'évacuer la chaleur dans le copeau, et les phénomènes de conduction qui transmettent la chaleur dans la partie massive de la pièce. Cette rivalité entre les deux phénomènes conduit à l'apparition d'un point de la température maximale au niveau de l'interface de contact outil/copeau.

Cette différence dans la température à l'interface pièce/outil et la forme des copeaux obtenue est due à la différence entre les propriétés mécaniques et physiques de matériau, comme la densité et le module d'élasticité (module de Young). Plus le matériau est rigide plus sa température de coupe est élevée.

Chapitre IV :

Etude expérimentale du phénomène thermique lors du procédé de fraisage

IV.1/ Introduction :

Dans les procédés d'usinage par enlèvement de matière, tels que le fraisage, la montée en température au point de contact entre l'outil de coupe et la pièce est un phénomène incontournable. Cette élévation thermique, due à la friction et à la déformation plastique locale, peut avoir des conséquences directes sur la qualité de l'usinage, la géométrie finale de la pièce, ainsi que sur la durée de vie de l'outil.

L'opération de rainurage, qui consiste à usiner un sillon ou une cavité dans une pièce à l'aide d'une fraise, génère une concentration locale de chaleur, particulièrement dans la zone de coupe. Si cette chaleur n'est pas correctement maîtrisée, elle peut engendrer des défauts tels que des bavures, une mauvaise finition de surface, ou même des modifications métallurgiques du matériau.

Afin d'évaluer et de maîtriser ce phénomène thermique, l'utilisation d'une caméra infrarouge constitue une méthode non intrusive et efficace. Cet outil permet de visualiser en temps réel la répartition et l'évolution de la température pendant l'usinage. Grâce à cette technologie, il est possible de localiser précisément les zones chaudes, de quantifier les températures atteintes, et d'adapter les paramètres de coupe ou les conditions de refroidissement en conséquence. Afin de collecter des données fiables, d'interpréter les résultats obtenus, et d'émettre des recommandations pour optimiser le processus d'usinage.

IV.2/ Matériel utilisé :

Voici les outils et machines utilisés dans cette étude :

- Fraiseuse : Machine utilisée pour couper la matière.
- Fraise à rainurer : Outil de coupe de deux tailles et quatre dents en acier rapide pour faire la rainure.
- Pièce à usiner : En acier XC48.
- Caméra infrarouge : Appareil pour mesurer la température à distance.

IV.3/ Méthode utilisée :

Pour adapter les conditions de coupe et optimiser le processus d'usinage voici les étapes détaillées pour effectuer l'opération.

IV.3.1/ Préparation de la pièce :

- S'assurer que la pièce est brute ou déjà pré-usinée selon les besoins.
- Nettoyer la pièce.
- Identifier les dimensions (longueur=100mm, largeur=60mm, épaisseur=10mm).
- Identifier la position exacte de la rainure sur la pièce.

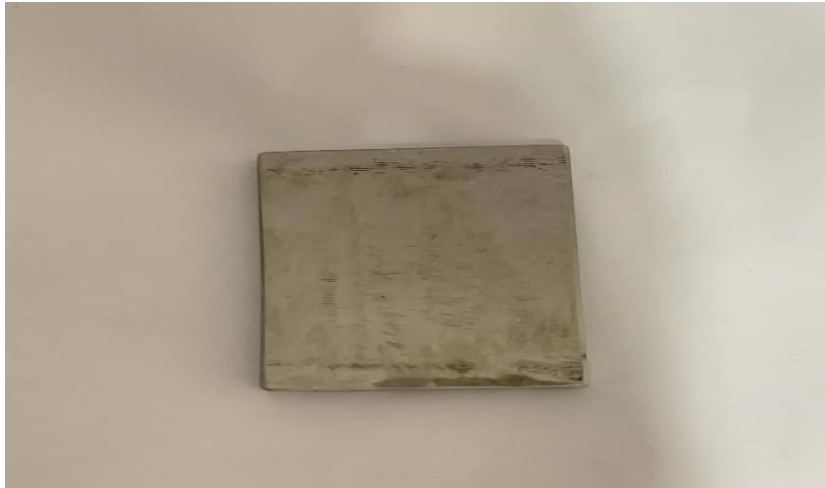


Figure IV.1 : Préparation de la pièce brute

IV.3.2/ Montage de la pièce :

- Fixer solidement la pièce sur une table à brides.
- Vérifier la perpendicularité et l'horizontalité.

IV.3.3/ Prise d'origine :

- Prendre les zéros de la machine fraiseuse.
- Axe X et Y pour la position de départ.
- Axe Z pour la profondeur initiale.



Figure IV.2 : La machine fraiseuse utilisé

IV.3.4/ Choix et montage de l'outil :

- Choisir une fraise de deux tailles et quatre dents en acier rapide adapté au type de rainure.
- Monter l'outil sur la broche et le serrer correctement.



Figure IV.3 : Choix l'outil de coupe (la fraise)



Figure IV.4 : Fixation de l'outil

IV.3.5/ Réglages des paramètres de coupe :

- Régler la vitesse de rotation (tr/min) selon le matériau XC 48 et l'outil.
- La vitesse d'avance (mm/min).
- La profondeur de passe (souvent en plusieurs passes pour éviter la casse au l'échauffement).



Figure IV.5 : Réglages les paramétrées de coupe

IV.3.6/ Préparation de la caméra infrarouge :

- Allumer la caméra et attendre qu'elle se stabilise thermiquement.
- Régler la plage de température environ 19°C.

- Régler le focus sur la zone d'usinage (contact fraise/pièce).
- Régler le type d'affichage thermique (palette de couleurs) pour voir la chaleur clairement.



Figure IV.6 : Caméra thermique infrarouge

IV.3.7/ Positionnement de la caméra :

- Placer la caméra sur un trépied stable à une distance de sécurité.
- Orienter l'objectif vers la zone de coupe (la rainure).

IV.3.8/ Réalisation du rainurage et lancement de la caméra thermique :

- Lancer l'usinage de la rainure.
- Enregistrer en temps réel avec la caméra thermique : Évolution de la température et localisation précise des zones chaudes.
- Noter le moment où la température maximale est atteinte en deux cas de vitesse de coupe et l'avance variée.



Figure IV.7 : Réalisation de rainure

- Pour la 1^{ère} cas : $V_c=900$ m/min et $f=0,2$ tr/min

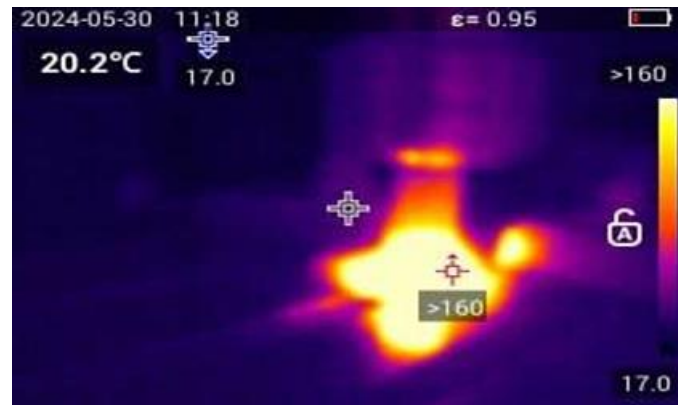


Figure IV.8 : La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 par la caméra thermique pour $V_c= 900$ m/min et $f= 0,2$ tr/min

D'après la figure IV.8), la température maximale est de : $>160^{\circ}\text{C}$ et la température minimale est de : 17°C .

- Pour la 2^{ème} cas : $V_c= 720$ m/min et $f= 0,4$ tr/min

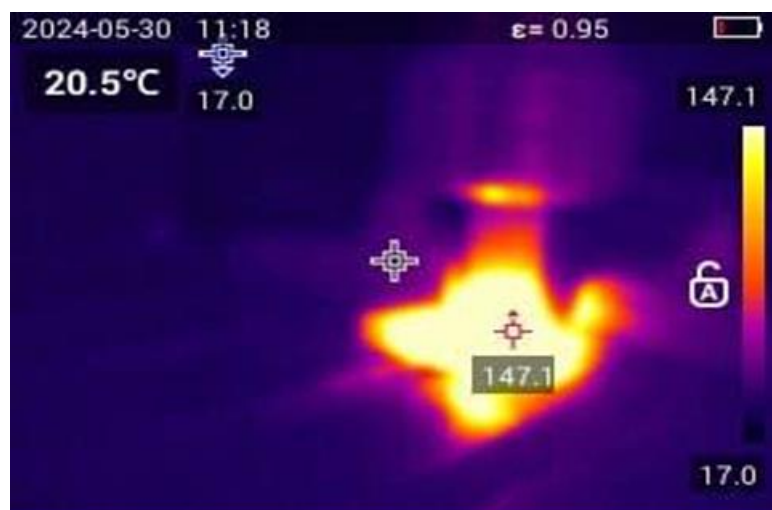


Figure IV.9 : La distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 pour $V_c= 720$ m/min et $f= 0,4$ tr/min

D'après la figure IV.9, la température maximale est de : 147.1°C et la température minimale est de : 17°C .

IV.4/ Analyse des résultats :

En remarque sur les deux figures utilisées par la caméra thermique que la température de la pièce au niveau de la zone de contact avec l'outil varie en fonction de la vitesse de coupe. Pour une vitesse de 900 m/min, la température maximale atteint $> 160^{\circ}\text{C}$ tandis qu'elle ne dépasse pas $147,1^{\circ}\text{C}$ à une vitesse de 720 m/min (correspondant à une flamme rouge).

Cette différence s'explique principalement par l'étendue de la zone de contact entre l'outil et la pièce : plus cette zone est importante, plus la température générée est élevée. Ces résultats confirment que la température dans la zone de coupe augmente avec la vitesse de coupe.

Par ailleurs, en adoptant par la caméra thermique, la température se répartit de manière plus uniforme sur les surfaces, ce qui améliore également la morphologie du copeau.

La température élevée provoque la diminution de la durée de la vie de l'outil de coupe et sur la pièce usinée ainsi que l'état de surface.

IV.5/ Comparaison entre la simulation / expérience :

L'étude a permis de comparer directement les températures maximales obtenues par simulation numérique sous ANSYS Workbench avec celles mesurées expérimentalement à l'aide d'une caméra thermique infrarouge, dans le contexte de l'usinage d'un acier XC48.

- Pour la 1^{ère} cas : $V_c = 900 \text{ m/min}$ et $f = 0.2 \text{ tr/min}$

Température maximale simulée (ANSYS) : environ $250,29^{\circ}\text{C}$ à l'interface outil/pièce, localisée dans la zone de contact primaire, là où les efforts de coupe et la déformation plastique sont les plus intenses.

Température maximale mesurée (caméra thermique) : environ $> 160^{\circ}\text{C}$ sur la surface proche de l'arête de coupe, relevée en temps réel pendant l'opération de rainurage de procédé de fraisage.

On observe une différence ne sont pas si éloignés entre la température maximale obtenue par simulation et celle mesurée expérimentalement.

- Pour la 2^{ème} cas : $V_c = 720\text{m/min}$ et $f = 0.4\text{ tr/min}$:

Température maximale simulée (ANSYS) : environ $143,53^\circ\text{C}$ à l'interface outil/pièce, localisée dans la zone de contact primaire, là où les efforts de coupe et la déformation plastique sont les plus intenses.

Température maximale mesurée (caméra thermique) : environ $>147,1^\circ\text{C}$ sur la surface proche de l'arête de coupe, relevée en temps réel pendant l'opération de rainurage de procédé de fraisage.

Dans ce cas, les résultats sont très proches, avec un écart de seulement $3,57^\circ\text{C}$, soit environ 2,5 %. Ce faible écart indique une très bonne corrélation entre la simulation et l'expérience, ce qui témoigne de la fiabilité du modèle numérique utilisé dans ANSYS pour ces conditions de coupe. Plusieurs éléments peuvent expliquer cette convergence :

La génération de chaleur est moins intense que dans le premier cas (où la vitesse de coupe était plus élevée), ce qui réduit les phénomènes transitoires ou non linéaires difficilement modélisables.

Le modèle de frottement, les conditions aux limites thermiques et les propriétés des matériaux dans ANSYS ont ici reproduit de manière plus réaliste le comportement thermique réel.

La caméra thermique a probablement eu une meilleure visibilité sur la zone de contact, avec moins d'interférences (copeaux, reflets), ce qui a permis une mesure plus fiable.

Nous pensons avoir obtenus des résultats satisfaisants du fait que nous avons analysés le comportement thermique à l'interface outil/pièce et validé un modèle numérique à l'aide de mesures expérimentales.

Les résultats de la simulation ANSYS et ceux mesurés par la caméra thermique ont montré un écart faible, voire négligeable dans certains cas, confirmant la fiabilité du modèle.

Le choix du modèle de comportement Johnson-Cook pour la pièce et d'un modèle d'interaction thermomécanique réaliste ont permis une représentation fidèle des phénomènes de coupe.

L'association entre la simulation numérique et les mesures expérimentales a renforcé la qualité de l'analyse et permis une validation croisée des résultats.

Le contrôle précis des conditions de coupe (vitesse, avance) et l'usage adapté de la caméra thermique ont permis d'obtenir des données fiables et exploitables.

Enfin nous avons également conclu du côté de la simulation et expérimentale que la température est liée à deux éléments importants (vitesse de coupe et l'avance) :

- L'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la température.
- L'interaction des deux paramètres c'est-à-dire l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance résulte une augmentation de la réponse qui est la température.

A travers ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur les conditions de contact thermique à l'interface outil/pièce /copeau en usinage à sec de l'acier XC 48.

Cette étude montre que la température joue un rôle important pendant une opération de rainurage. Grâce à la caméra thermique, on peut voir la chaleur, comprendre d'où elle vient et comment elle évolue.

Ce chapitre a permis de développer une compréhension globale, précise et cohérente du phénomène de contact entre outil et pièce, tout en démontrant l'intérêt d'une approche complémentaire entre simulation par ANSYS Workbench et expérience par un caméra thermique infrarouge pour étudier les phénomènes thermomécaniques complexes liés à l'usinage. Celle-ci aide aussi à améliorer le processus : en choisissant les bons paramètres, en refroidissant mieux ou en utilisant des outils plus adaptés, on peut éviter les problèmes liés à la température et obtenir une meilleure qualité de fabrication et cela permet aussi d'éviter d'abîmer la pièce.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude du phénomène d'enlèvement de la matière et plus exactement pour le cas de fraisage en 3D, en utilisant la méthode par les éléments finis (MEF).

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, il a été fixé comme objectif d'étudier les phénomènes thermomécaniques qui se développent au droit de l'interface de contact Pièce-Outil lors d'une opération de fraisage. Afin de réaliser cet objectif, une simulation numérique en 3D a été réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks pour la partie conception de la géométrie du modèle et du logiciel ANSYS pour la partie analyse thermomécanique. Ainsi qu'une approche expérimentale pour faire une comparaison avec la partie de la simulation.

Nous avons adopté une approche numérique en utilisant le modèle de Johnson-Cook pour représenter le comportement du matériau, ce qui a permis d'intégrer les effets thermomécaniques souvent négligés dans les approches classiques. Les phénomènes tribologiques à l'interface outil/pièce/copeau, bien que difficiles à modéliser, ont été pris en compte en raison de leur impact significatif sur l'usure de l'outil et la qualité de l'usinage.

En faisant varier les paramètres de coupe (vitesse, avance, profondeur de passe), nous avons mis en évidence l'importance du contrôle de la température générée à l'interface. Une température excessive peut compromettre la durée de vie de l'outil et altérer les propriétés de la pièce usinée

A travers des résultats obtenus, on a pu constater que :

- ✓ L'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la température.
- ✓ L'interaction des deux paramètres c'est-à-dire l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance résulte une augmentation de la réponse qui est la température.
- ✓ La vitesse de coupe est le facteur le plus influant sur la réponse.

La détermination de la température de coupe nous permis :

- ✓ Mieux évaluer les performances d'usinage en fonction de la température, des efforts de coupe et de l'usure de l'outil.
- ✓ Comprendre l'effet des paramètres de coupe sur l'efficacité énergétique et la rentabilité du processus.
- ✓ Analyser la répartition thermique sur l'outil, la pièce et le copeau.

En conclusion, la méthode des éléments finis s'est révélée être un outil puissant pour simuler et optimiser le procédé d'usinage. Ce mémoire nous a permis de développer une compréhension approfondie du phénomène de coupe des métaux et de proposer des pistes d'amélioration pour les procédés industriels.

Bibliographie

- [1] GARA Souhir, cours sur le fraisage, Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul, génie mécanique, 2016, pp2-3
- [2] G. P. Homme, Commande Numérique des Machines-Outils, Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, B 7130, pp.3, 1997
- [3] B. Remacle, Usinage : Tournage Fraisage, IFPM formation édition, 2018
- [4] R.Butin, M. Pinot, Fabrication Mécanique Technologie, Tome 3, Foucher, Paris, 1998
- [5] N.Melzi, Cours usinage à grande vitesse (UGV), Département génie mécanique, université Saad Dahlab-Blida, 2023/2024
- [6] Benmohammed, Cours formation de copeaux, Université Batna 2- MB, 2022, p1.
- [7] Madjed BOUZID, Simulation et prédiction de la température de coupe lors d'une opération de fraisage, master en génie mécanique, université de blida 1, 2023.
- [8] BENARIF Nesreddine, BENRETMIA Oussama Badreddine, Etude et contrôle de la température de contact outil-pièce durant les opérations de tournage avec un capteur infrarouge, Mémoire master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2023.
- [9] M. Abdelghani, « L'évolution de la température de coupe au niveau de l'interface outil-pièce en tournage », Université de Ouargla, 2014.
- [10] BENABID, Farida. Etude des transferts thermiques au cours d'une opération d'usinage, influence sur l'usinage à grande vitesse. 2015. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [11] A. Toumine, Cours de Fabrication, Usinage par Enlèvement de Copeaux, Eléments de Cours Usinage v1.1, 2007
- [12] Lardjoun Mohamed Abdelmounaim, Ben Achour Mohamed, Djebli Mohamed Amine, Simulation et Prédiction de la température de coupe lors d'une opération de Perçage, master en génie mécanique, Université Saad Dahlab de Blida 1.