

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



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

Laboratoire de construction mécanique

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Construction mécanique

Thème :
Modélisation et simulation en 3D d'une opération de fraisage
par les éléments finis

Proposé et encadré par :
N.Melzi

Réalisé par :
Nyengera Tanaka.A
Mwambingu Alfred

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Nous aimerions d'abord remercier notre promotrice Mlle N.Melzi pour ses conseils prodigués dans la rédaction de ce mémoire durant la période difficile de la pandémie du covid-19 vous étiez là pour nous aider.

Deuxièmement nous remercions le Professeur M.Temmar pour nous avoir fourni certaines sources d'informations et pour son soutien dans notre développement.

On adresse nos reconnaissances particulièrement à nos grandes familles et à tous les enseignants, pour leur soutien et aide sans faille qu'ils nous ont apporté durant tout le cycle de notre formation.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mon binôme, à ma famille et mes amis. Un sentiment particulier de gratitude à mes parents pour leurs d'encouragements intenses pendant la rédaction de mon étude.

Alfred

Je dédie mon mémoire à ma famille, à mes amis pour le soutien intense qu'ils m'ont apporté pendant mes études. Je dédie ce mémoire à mon binôme pour tous les efforts consentis durant la rédaction.

Tanaka

Résumé

Le fraisage est l'une des opérations d'usinage largement appliquées dans la fabrication industrielle d'outils et d'équipements en raison de son efficacité dans l'état de surface obtenu.

Pour répondre à cet état de fait et à fin d'augmenter la durée de vie et la qualité des pièces usinées, une démarche de modélisation globale de l'impact du procédé de fabrication est nécessaire. Toutes les étapes, à savoir depuis l'obtention du brut jusqu'à la finition de la pièce, doivent être respectées et étudiées. La modélisation de la coupe est particulièrement importante, car les opérations de finition, qui confèrent à la surface la majorité de ses propriétés, sont généralement des opérations d'usinage.

L'objectif principal du travail est de modéliser et de simuler la formation des copeaux en 3D sur une pièce en acier inoxydable 316L lors d'une opération de surfaçage de procédé de fraisage par le logiciel ANSYS. L'étude se comporte sur la détermination de la température lors du contact de la pièce à usiner avec l'outil de coupe.

Mots-clés: Procédés d'usinage, fraisage, modélisation, température de coupe

Abstract

Milling is one of the widely applied machining operations in industrial fabrication of tools and equipment due to its efficiency in the state of surface obtained.

In response to this state of affairs and in order to increase the service life and quality of machined parts, a comprehensive modeling approach of the impact of the manufacturing process is necessary. All stages, from obtaining the raw part to finishing, must be observed and studied. The modeling of the cut is particularly important because the finishing operations, which give the surface most of its properties, are generally machining operations.

The main objective of this work is to model and simulate 3D chip formation on a 316L stainless steel part during a milling process of face milling operation with the ANSYS software. The study comprises of the determination of the temperature during the contact of the workpiece with the cutting tool.

Key- words: Machining processes, milling, modeling, cutting temperature

المخلص

الطحن هو أحد عمليات المعالجة المطبقة على نطاق واسع في التصنيع الصناعي لإنتاج الدقيق. من المتوقع أن تنمو السوق العالمية للدقيق في السنوات القادمة. لهذا الوضع من أجل زيادة عمر الخدمة وجودة الأجزاء المجهزة، من الضروري اتباع نهج نمذجة عالمية لتأثير عملية التصنيع. يجب مراعاة دور استجابة العالم لحل، من الحصول على الخامات لإنهاء الجزء. تعتبر نمذجة القطع مهمة بشكل خاص لأن عمليات التشغيل، التي تعطي السطح معظم خصائصه، عادة ما تكون عمليات آلية.

الهدف الرئيسي من العمل هو نمذجة محاكاة تشكيلا لقائتلائية الأبعاد على جزء من الفولاذ المقاوم للصدأ L 316 أثناء عملية طحن السطح بواسطة برنامج ANSYS. تعمل الدراسة على تحديد درجة الحرارة أثناء ملامسة قطعة العمل لأداة القطع.

الكلمات الرئيسية: عمليات التصنيع، الطحن، النمذجة، درجة حرارة القطع

Table des matières

Chapitre 1 : Généralités sur fraisage.....	01
1.1 Définition.....	02
1.2 Mouvement relatifs entre l’outil et la pièce	02
1.3 Paramètres de coupe.....	03
1.3.1 La vitesse de coupe V_c	03
1.3.2 La fréquence de rotation de la broche N.....	04
1.3.3 La vitesse d’avance V_f	04
1.3.4 Avance par tour.....	04
1.3.5 avance par dent.....	04
1.3.6 Profondeur de passe.....	05
1.3.7 La largeur de coupe.....	05
1.4 Classification de fraisage.....	06
1.5 Les fraises.....	07
1.6 Les fraiseuses.....	11
1.7 Modes de fixation des pièces.....	14
Chapitre 2 : Les modèles associant à la coupe.....	16
2.1 Aspects thermiques.....	17
2.2 La coupe des métaux.....	18
2.3 Formulation des modèles.....	19
2.3.1 Formulation Lagrangien.....	19
2.3.2 Formulation Eulérienne.....	20
2.3.4 Formulation arbitraire Lagrangien Eulériennes.....	21
2.4 Maillage.....	21
2.8 Les différents domaines de modélisation.....	22
2.6 Les lois empiriques.....	23
2.6.1 Modèle d’Oxley.....	23

2.6.2 Modèle de Johnson Cook.....	24
2.6.3 Modèle de Zerilli-Armstrong.....	25
Chapitre 3 : Modélisation et simulation en 3D avec ANSYS pour une opération de surfaçage en avalant.....	26
Introduction.....	27
3.1 Application au modèle numérique.....	27
3.2 Loi de comportement d'acier inoxydable AISI316L.....	28
3.3 Simulation du problème Ansys.....	28
3.4 Les procédure à suivre pour la simulation	28
3.5 Résultats de la simulation.....	36
Conclusion générale.....	46
Bibliographie.....	48

Liste des figures

Fig1.1 : Mouvements relatifs entre l'outil et la pièce usinée.....	03
Fig1.2 : Profondeur et largeur de passe.....	05
Fig1.3 : Types de fraisage a)opposition b) avalant.....	06
Fig1.4 : Les différents types des fraises.....	07
Fig1.5 : Les fraises a)1 taille b) 3 tailles alternées c)2 tailles d) 3 tailles.....	08
Fig1.6 : Les formes des fraises a)conique b) biconique c)cylindrique d) circulaire.....	09
Fig1.7 : La forme géométrique des taillants d'une fraise et les angles d'Affutages.....	10
Fig1.8 : Les fraiseuses a)horizontale b) verticale.....	12
Fig1.9 : Les liaisons entre les différents organes d'une fraiseuse.....	13
Fig1.10 : Les têtes d'une fraiseuse a)vertical b) oblique.....	13
Fig1.11 : a) fraiseuse universelle b) fraiseuse à commande numérique.....	14
Fig1.12 : Les modes de fixation.....	15
Fig2.1 : Flux généré à l'interface de contact outil/coupeau.....	17
Fig2.2 : Géométrie de la formation du coupeau.....	18
Fig2.3 : Configuration initiale et finale issues du modèle de Kim et al.....	20
Fig2.4 : Raffinement.....	21
Fig2.5 : Lissage.....	22
Fig3.1 : Bibliothèque des techniques données.....	29
Fig3.2 : Géométrie de modèle.....	31
Fig3.3 : Les systèmes de coordonnées.....	32
Fig3.4 : Génération du maillage et raffinement.....	33
Fig3.5 : Gestion de contact.....	34
Fig3.6 : Déplacement distant.....	35
Fig3.7 : Réglages d'analyses et résolution des solutions.....	35

Distribution des températures à l'interface outil/pièce

1^{er} cas $f_z=0.01\text{mm/dt}$

Fig3.8: $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$	37
Fig3.9: $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$	37
Fig3.10: $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$	38
Fig3.11: $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$	38
Fig3.12: $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$	39
Fig3.13: $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$	39
2eme cas $f_z=0.02\text{mm/dt}$	
Fig3.14: $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$	40
Fig3.15: $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$	40
Fig3.16: $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$	41
Fig3.17: $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$	41
Distribution des contraintes à l'interface outil/pièce	
1 ^{er} cas : $f_z=0.01$	
Fig3.18 a) $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$ b) $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$	42
Fig3.19 a) $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$ b) $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$	42
Fig3.20 a) $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$ b) $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$	43
2eme cas: $f_z=0.02\text{mm/dt}$	
Fig3.21 a) $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$ b) $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$	43
Fig3.22 $V_c=150\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$	44

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : paramètres de Johnson Cook pour AISI 316L.....	30
Tableau 3.2 : les propriétés thermomécaniques de l'outil.....	30
Tableau 3.3 :les données de la simulation.....	36

Liste des symboles

Symbole	Unité	Désignation
M_c	-	<i>Mouvement de coupe</i>
M_p	-	<i>Mouvement de pénétration</i>
M_f	-	<i>Mouvement d'avance</i>
V_c	<i>m/min</i>	<i>Vitesse de coupe</i>
D	<i>Mm</i>	<i>Diamètre de l'outil</i>
n	<i>tr/min</i>	<i>Fréquence de la rotation de la broche</i>
V_f	<i>mm/tr</i>	<i>Vitesse d'avance</i>
f_z	<i>mm/dent</i>	<i>Avance par dent.</i>
f	<i>mm/tr</i>	<i>Avance par tour</i>
z	-	<i>Nombres de dents de la fraise</i>
a_p	<i>Mm</i>	<i>La profondeur de passe</i>
a_e	<i>Mm</i>	<i>Largeur de coupe</i>
α'	<i>Dégré</i>	<i>Angle d'hélice ou angle d'attaque</i>
β	<i>Dégré</i>	<i>Angle de taillant</i>
α	<i>Dégré</i>	<i>Angle de dépouille</i>
γ	<i>Dégré</i>	<i>Pente d'affûtage ou Angle de coupe</i>
ARS	-	<i>Acier rapide supérieur</i>
σ	<i>Mpa</i>	<i>Contrainte équivalente de Von Mises</i>
ε		<i>Déformation plastique cumulée</i>
$\dot{\varepsilon}$		<i>Vitesse de déformation</i>
$\Delta\varepsilon_p$		<i>l'incrément de la déformation plastique équivalente</i>
$\Delta\varepsilon_p^f$		<i>Déformation équivalente de rupture</i>
θ	<i>°C</i>	<i>Température absolue</i>
C_s	<i>Dégré</i>	<i>Appelé l'angle d'inclinaison.</i>
η_c		<i>L'angle d'écoulement du copeau</i>
T_{mod}	<i>°C</i>	<i>Température modifiée par la vitesse</i>
T	<i>°C</i>	<i>Température instantanée</i>
T_0	<i>°C</i>	<i>Température ambiante</i>
T_f	<i>°C</i>	<i>Température de fusion</i>
T_t	<i>°C</i>	<i>Température de transition</i>
m		<i>Sensibilité du matériau à la température</i>

Introduction générale

La fabrication mécanique joue un rôle très important dans le développement industriel, elle participe à l'amélioration des performances des moyens de production. Jusqu'à présent, l'usinage par enlèvement des matières occupe une place très importante dans la fabrication de composantes mécaniques. Le but est d'obtenir des pièces de qualité avec un bon état de surface et une précision dimensionnelle. Le fraisage est l'un des plus importants procédés d'usinage, ses opérations forment une matière très riche de recherche à cause du besoin industriel croissant,[8]. La satisfaction de ce besoin ne sera réalisée qu'à l'aide d'un choix judicieux des paramètres de coupe.

Généralement, l'étude expérimentale dans l'atelier mécanique prend beaucoup de temps, elle est aussi très coûteuse surtout avec les opérations complexes et la grande gamme de paramètres comme ; la géométrie de l'outil, conditions de coupe ...etc. C'est pour cette raison que l'approche mathématique est souvent appliquée en utilisant les méthodes numériques pour les résolutions des problèmes physiques. L'une des méthodes les plus répandues est la méthode des éléments finis.[2].

Notre étude s'est basée sur la modélisation et la simulation en 3D pour l'opération de surfaçage en fraisage ; par la méthode des éléments finis de pièce en acier inoxydable 316L avec une fraise à disque en acier rapide.

Notre travail se divise en quatre chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les travaux existants sur l'usinage par enlèvement de matière, et particulièrement sur le procédé de fraisage, les paramètres de coupe, classifications de fraisage ainsi que les différents modes des fixations.

Le chapitre II sera consacré au phénomène de la température (modèles associés à la coupe des métaux) lors du contact de l'outil avec la pièce à usiner. 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.

Le chapitre III sera consacré à la modélisation et à la simulation de la formation du copeau en 3D d'une opération de surfaçage de procédé de fraisage à sec de l'acier inoxydable 316L .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.

La dernière partie, à savoir la conclusion générale, présentera les résultats obtenus tout au long de notre travail.

Chapitre 1
Généralités sur le fraisage

CHAPITRE I

Généralités sur le fraisage

Introduction

Dans la fabrication des pièces mécaniques, nous appliquons plusieurs techniques pour mettre la pièce sur la forme désirée. L'usinage par enlèvement de matière par un outil coupant est l'une parmi les techniques utilisées. Pour l'usinage d'une pièce, les opérations se décomposent en une succession comme définie par la gamme d'usinage établie par le bureau de méthodes à partir du dessin de définition. Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur le fraisage les procédés de fraisage et les paramètres de coupe ainsi que les différents modes de fixations de la pièce.

I.1/ DEFINITION

Le fraisage est un procédé de fabrication faisant intervenir simultanément, le mouvement de rotation d'un outil possédant une ou plusieurs arêtes de coupe (mouvement de coupe) et la combinaison de translations rectilignes (rotations entre l'outil et la pièce)[12]. L'outil de fraisage, appelé fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune retire une certaine quantité de matière sous forme de copeaux. Ce procédé possède un rendement élevé, une bonne finition des surfaces et une haute précision dimensionnelle ainsi que de grandes possibilités au niveau de la génération de différentes formes. Il est le plus souvent utilisé pour réaliser des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais avec l'évolution des machines à commande numérique son efficacité pour la réalisation des surfaces gauches est croissante. Le fraisage est en passe de devenir une méthode d'usinage universelle pour les formes tridimensionnelles complexes.

I.2/ Mouvements relatifs entre l'outil et la pièce à usiner

Les mouvements relatifs, entre l'outil et la pièce, exigés par le fraisage sont comme suit :

- **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 **Mf**: C'est le mouvement rectiligne donné à la pièce pendant l'usinage. L'outil rencontre ainsi constamment de la matière à enlever.

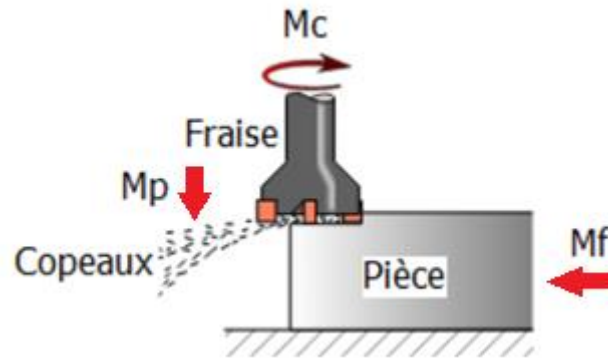


Fig1.1 Mouvements relatifs entre l'outil et la pièce à usiner.

I.3 Paramètres de coupes

Les opérations de fraisage sont conditionnées par les paramètres principaux suivants :

I.3.1/ La vitesse de coupe V_c (m/min)

Représente la vitesse linéaire avec laquelle l'arête de coupe parcourt la surface de la pièce. Elle fait partie intégrante de l'ensemble des conditions de coupe et constitue un paramètre important de l'opération de fraisage. La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par les formules suivantes :

$$n = \frac{1000 \times V_c}{\pi D} \quad \text{et} \quad V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (1.1)$$

Où :

D, représente le diamètre de l'outil en mm,

n, la fréquence de la rotation de la broche (en tr/min)

Vc, la vitesse de coupe (en m/min).

Elle est choisie en fonction de matériaux de la pièce, matériaux de l'outil, lubrification, et la puissance de la machine.

I.3.2 /La fréquence de rotation de la broche n (tr/min)

Elle correspond aux nombres de révolutions réalisées par la fraise en une minute. Cette donnée est beaucoup plus utilisée comme une valeur de réglage de machine.[3]

$$n = \frac{1000Vc}{\pi D} \quad (1.2)$$

I.3.3/ La vitesse d'avance V_f

La vitesse d'avance V_f , est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en [mm/min] soit en [mm/tour].

En **fraisage** la vitesse d'avance V_f [mm/min] est égale à :

$$V_f = Z \times f_z \times n \text{ [mm/min]} \quad (1.3)$$

Où Z est le nombre de dents de la fraise, f_z [mm/ dent] correspond à l'Avance par dent [8].

I.3.4/Avance par tour

L'avance par tour f en (mm / tr) c'est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à travailler en finition. Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation. [7]

I.3.5/Avance par dent

L'avance par dent f_z en ($mm /dent$) est un important paramètre en fraisage. Elle indique la distance parcourue par l'outil.[9][15]

$$f_z = \frac{V_f}{Z \cdot n} \quad (1.4)$$

$$f = \frac{V_f}{n} \quad (1.5)$$

V_f : Avance par minute(mm/ min).

f : Avance par tour(mm /tr).

f_z : Avance par dent($mm /dent$).

NB : Sur une fraise il peut y avoir plusieurs dents, donc plusieurs arêtes de coupe. On prend donc en compte le nombre de dents « z » dans la formulation de la vitesse d'avance.

L'avance représente une donnée clé pour la qualité de la surface usinée, elle influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.[3]

I.3.6/Profondeur de passe a_p

La profondeur de passe notée a_p (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de fraisage, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage [9]. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

I.3.7 /La largeur de coupe a_e

La largeur de coupe en surfacage a_e (mm) est la distance parcourue par l'outil sur la surface de la pièce.

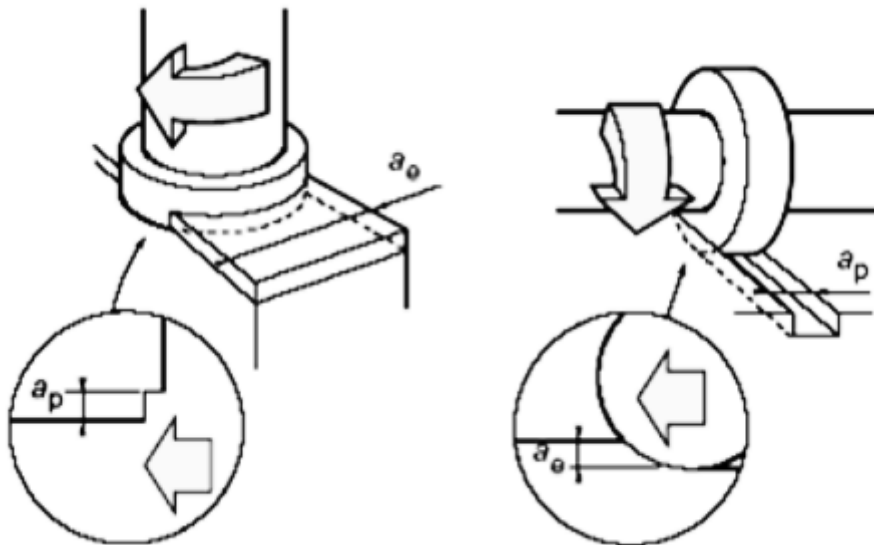


Fig1.2 Profondeur et largeur de passe

I.4 Classifications de fraisage

Selon l'état de surface souhaité, l'état de la machine, la qualité de l'outil, les dimensions des surfaces à usiner, la position des surfaces sur la machine, les dimensions de la fraise et le débit souhaité, la procède de fraisage est classifie en deux partie:[8]

- *Le fraisage de face ou en bout* : l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface fraisée.
- *Le fraisage de profil ou en roulant* : l'axe de la fraise est parallèle à la surface usinée.

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. Il existe deux types de fraisage en roulant. [12] [8]

a) Fraisage en opposition :

Dans le fraisage en opposition, on a l'effort tangentiel de coupe dans le sens opposé de celle de l'avance. Théoriquement, l'usinage commence avec une épaisseur de coupe nulle. La fraise glisse au début sur la surface de coupe sans l'usiner avant de provoquer un frottement considérable et pénétrer dans la pièce à usiner enlèvent un copeau. [6]

b) Fraisage en avalant : Dans le fraisage en avalant ou en concordance, l'effort tangentiel de coupe et d'avance sont dans le même sens [6]. 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.

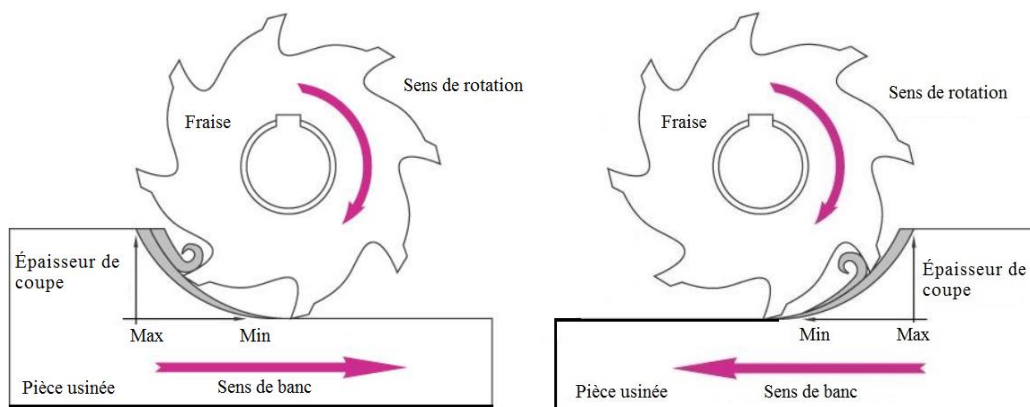


Fig1.3 a) Fraisage en opposition.

b) Fraisage en avalant.

1.5 Les fraises

Ce sont les outils utilisés pour le procédé de fraisage. La fraise est un outil multiple, formée 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.5.1/Les fraises principales

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

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



Fraise à surfacer, munies de plaquettes en carbures métalliques amovibles.



Fraise disque



Fraise pour rainure en T



Fraise de profil.

Fig1.4 les différents types de fraises [16]

I.5.2/Les caractéristiques de fraises

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, vue de dessus, 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 taille :

Correspondant aux nombres d'arêtes tranchantes par dents, les fraises existent en trois types ; Fraises à une taille, Fraises à deux tailles et Fraises à trois tailles

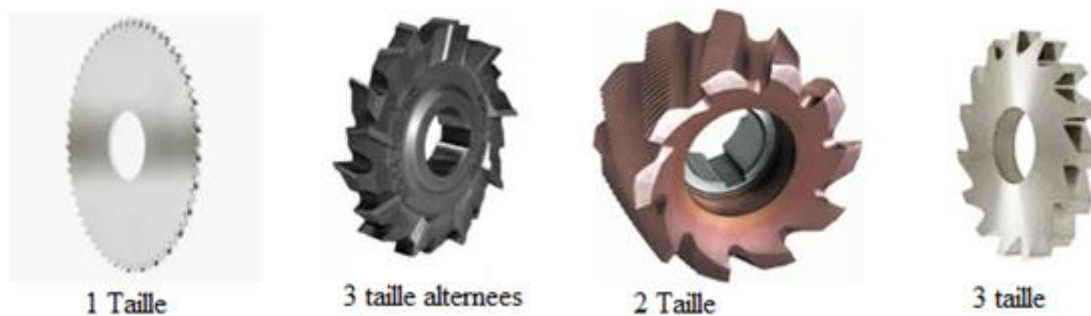


Fig1.5 a)1 taille b) 3taille alternées c)2 taille
d) 3taille

d) 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.



Fig1.6 a) fraise conique b) fraise biconique c) fraise cylindrique d) fraise circulaire de forme

I.5.3/ Les 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'affûtage 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 α' : 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 des 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. [8]

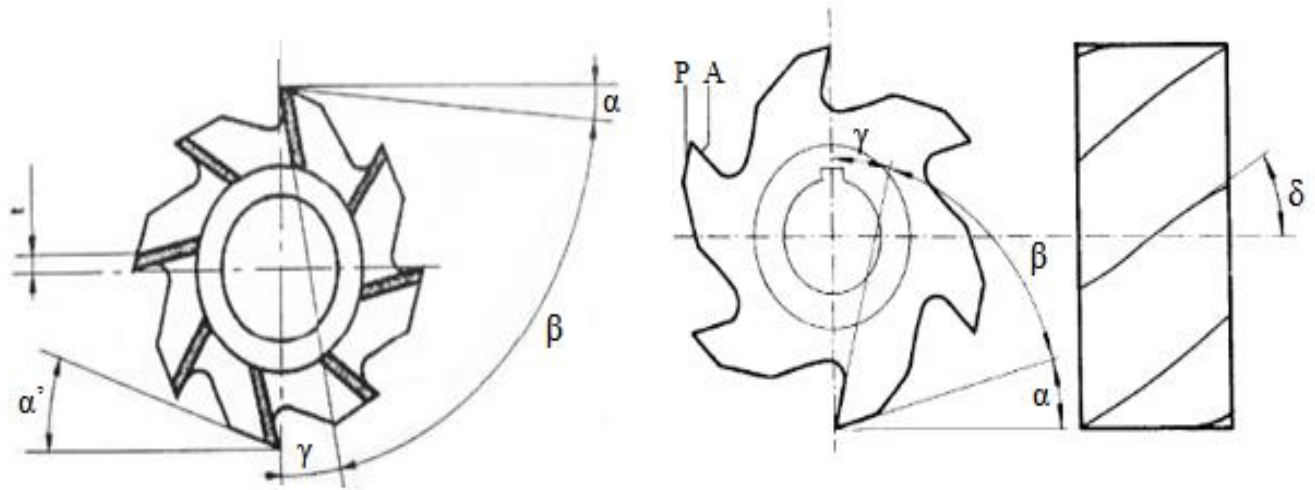


Fig1.7 La forme géométrique des taillants d'une fraise et les angles d'Affutages. [15]

I.5.4/Matières utilisées pour les fraises et leurs caractéristiques

Dans l'usinage des métaux, il est nécessaire d'utiliser des matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés, une bonne dureté à haute température vue les frottements permanents l'outil / pièce et outil/copeau, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. Leurs éléments durs sont aussi pour la raison d'améliorer la résistance des efforts de coupe. Toutes les caractéristiques citées nous permettent à employer les matériaux suivants:

➤ **Les alliages durs ou alliages coulés**

Ils sont obtenus par la fusion des métaux purs avec du carbone(C) au four électrique. Leur composition est la suivante : carbone(C): 2.5 à 4%, cobalt(Co): 40 à 50%. Tungstène(W): 20 à 80 %, Chrome(Cr): 25 à 82 %, Fer (Fe): environ 4 %, Manganèse(Mn): une petite quantité. Ils gardent leur dureté à une température assez élevée (700°C).

➤ **Acier rapide supérieur [ARS]**

Les outils AR (acier rapide) ou ARS (aciers rapides supérieurs) sont à la base d'un acier faiblement allié qui a subi un traitement thermique, plusieurs outils en ARS sont disponibles, on les distingue par leur composition métallurgique, en générale ils ont une teneur en carbone de 0,7 à 1,6 %, en Tungstène de 12 à 20 %, en molybdène de 3,5 à 10 % et des traces de vanadium et Cobalt pour avoir plus de duretés.

L'usinage par les outils en ARS s'effectue à faible vitesse de coupe pour éviter l'échauffement trop important qui mène l'outil à une usure rapide.[18]

➤ **Carbure**

Pour améliorer les performances des outils, l'arête de coupe est placée sur une plaquette amovible en carbure. Ce matériau est très résistant par rapport à ARS. La plaquette carbure est obtenue en compressant différentes poudres de carbure. Dès que l'arête de coupe est usée, il suffit de changer la plaquette.

➤ **Les céramiques**

➤ **Les diamants**

I.6 /Les 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 [15] et par la possibilité de mouvement de la table porte-pièce ainsi que par leur rendement (production unitaire ou de série). On le distingue essentiellement en trois types [13] :

- 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...).

I.6.1/ Fraiseuse horizontale

La fraiseuse horizontale est employée pour les travaux courants de fraisage, tels que : dressage de surfaces, usinage de rainures droites de sections diverses. Elle est caractérisée par la position horizontale de la broche. L'outil le plus employé sur ce genre de fraiseuse est la fraise cylindrique à une taille ou la fraise disque deux ou trois tailles.

Cette solution permet aux copeaux de tomber et donc de ne pas rester sur la pièce. De cette manière, on n'usine pas les copeaux, et la qualité de la pièce est meilleure. [7]

I.6.2/Fraiseuse Verticale

Les fraiseuses verticales sont des machines très robustes. Elles sont munies d'une tête porte fraise verticale. Les fraiseuses verticales, surtout celle de grande puissance, ont en particulier, un robuste bâti incurvé vers l'avant. Généralement la tête porte-fraise peut coulisser jusqu'à placer le mandrin en position horizontale. Les travaux les plus fréquemment exécutés sur une fraiseuse verticale sont : dressage avec des fraises en bout, usinage de contours, usinage de rainures droites, etc. L'outil caractéristique de la fraiseuse verticale est la fraise à taille périphérique et en bout ou fraise en bout [6].

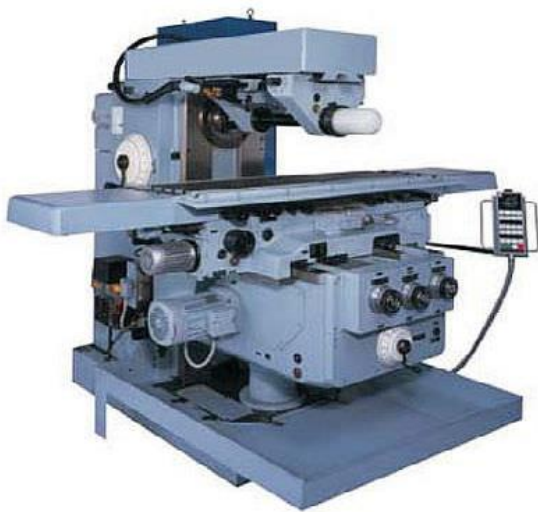


Fig1.8 a) Fraiseuse horizontale.

b) Fraiseuse verticale

I.6.3/Fraiseuse universelle

L'aspect général d'une fraiseuse universelle se différencie très peu de celui d'une fraiseuse horizontale simple. On peut dire qu'une fraiseuse horizontale devient universelle dès qu'elle possède les accessoires suivants :

- Diviseur universel qui permet de donner à la pièce à usiner un mouvement rotatif.
- Support à contre-pointe pour la fixation des pièces ente pointes, comme sur un tour.

La fraiseuse universelle offre en outre la possibilité de remplacer l'arbre porte-fraise horizontale par une tête à broche verticale, [15] inclinable dans le plan perpendiculaire à l'axe de cette broche.

Les fraiseuses universelles permettent, en plus des travaux exécutés sur une simple fraiseuse horizontale, d'effectuer d'autres travaux particuliers comme l'usinage de rainures hélicoïdales

sur des parties cylindriques. Les déplacements qu'il est possible de réaliser sur une fraiseuse universelle ainsi que les liaisons entre ses différents organes sont illustrés schématiquement sur la figure ci-contre.

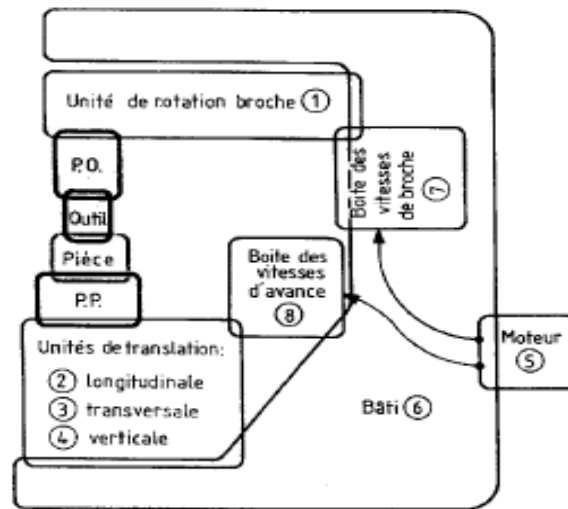


Fig1.9 Les liaisons entre les différents organes d'une fraiseuse.

Les fraiseuses universelles peuvent travailler avec l'axe fraise horizontal, par fixation d'une tête universelle l'axe broche peut prendre une position verticale ou oblique.

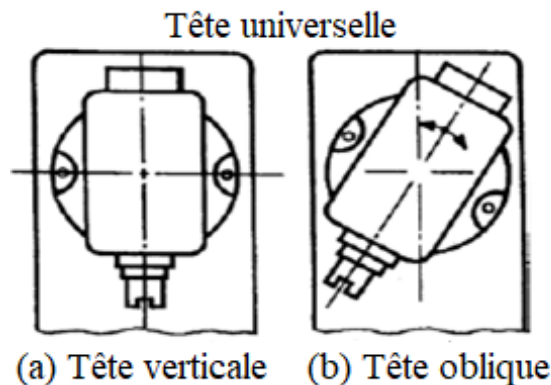


Fig1.10 Tête universelle a) verticale b) oblique [15]

I.6.4/Fraiseuse à commande numérique et centres d'usinage

Les différentes positions des organes mobiles sur une fraiseuse à commande numérique sont commandées numériquement en partant du programme introduit dans la machine. Lorsque les séries de pièces le justifient et lorsque le nombre d'opérations et de changement d'outils nécessaires à l'usinage d'une pièce est important, on fait appel à des machines assurant le chargement et le déchargement automatique des outils. Ces fraiseuses particulières sont appelées «centres d'usinage». Ces machines ne demandent pas une présence permanente de l'opérateur.

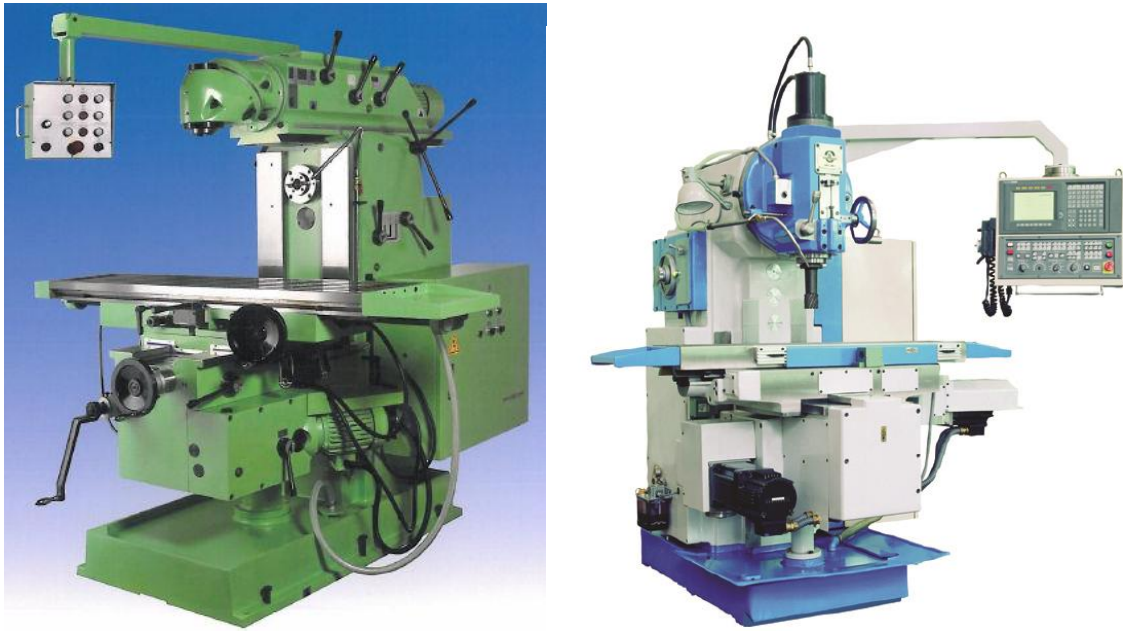


Fig1.11 a) Fraiseuse universelle b) Fraiseuse à commande numérique

I.7/ Mode de fixation des pièces

Avant l'usinage des pièces, il faut s'assurer de :

- La mise en position de la surface usinée par rapport aux référentielles machines.
- L'immobilisation de la pièce en cours d'usinage
- l'absence de déformation au moment du blocage

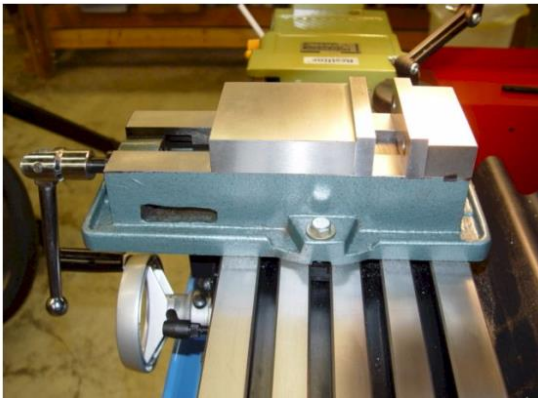
I.7.1/ L'étai

Ce porte-pièce est très utile pour le blocage en fraisage. Le serrage peut être assuré de façon mécanique, par action hydraulique ou pneumatique. L'utilisation de morts spéciaux permet l'immobilisation des pièces cylindriques en position axe horizontal, ou verticale [13], l'immobilisation de pièces minces, et le fraisage de surface oblique.

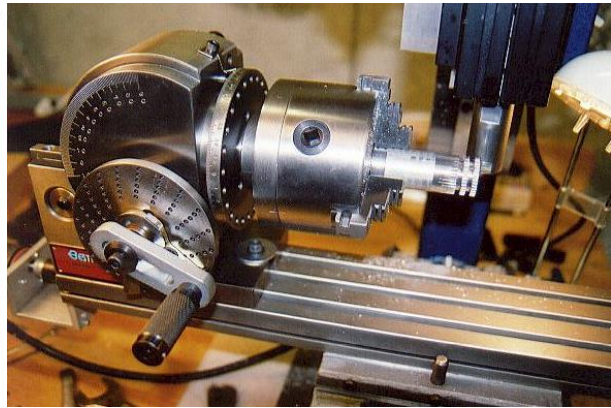
I.7.2/Plateau circulaire

Ce porte-pièce est pourvu d'une table circulaire dont les rainures en T permettent le bridage des pièces de la même façon que sur la table de fraiseuse.

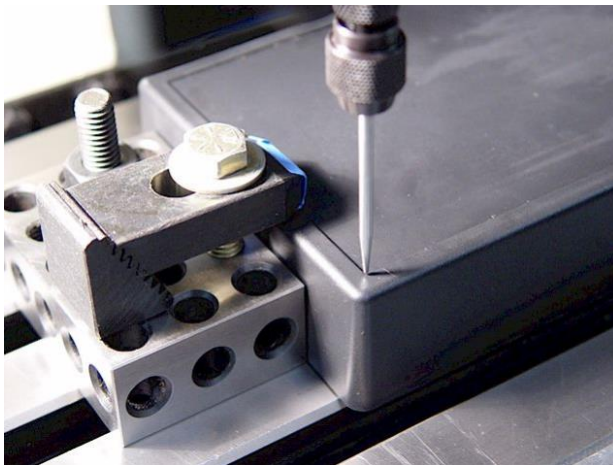
Etau



Mandrin



Fixation sur la table avec les brides



Plateau circulaire

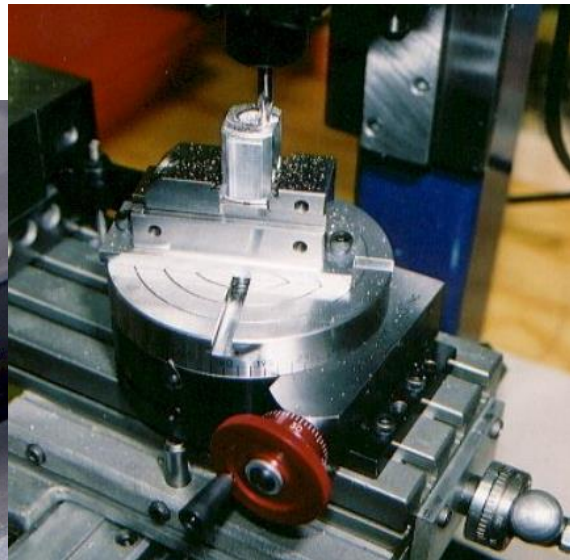


Fig1.12 les modes de fixation

Chapitre 2

Les modèles associés à la coupe des métaux

Introduction

La température de coupe, générée à l'interface outil - copeau, est le facteur le plus influant sur l'usinabilité des métaux. [20]

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

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

L'estimation de la température dans ces zones est importante car elle conduit à une fragilisation et à une usure des outils de coupe. Dans ces zones de frottement, où deux corps différents sont en contact, le problème de coefficient de partage de flux devient pertinent. La Figure (2.1) issue des travaux de Ceretti et al [21] représente un modèle phénoménologique de transfert de chaleur dans l'outil. Il apparaît clairement sur cette figure un apport de chaleur dû au frottement (Q_1) et une perte de chaleur par conductance (Q_2).

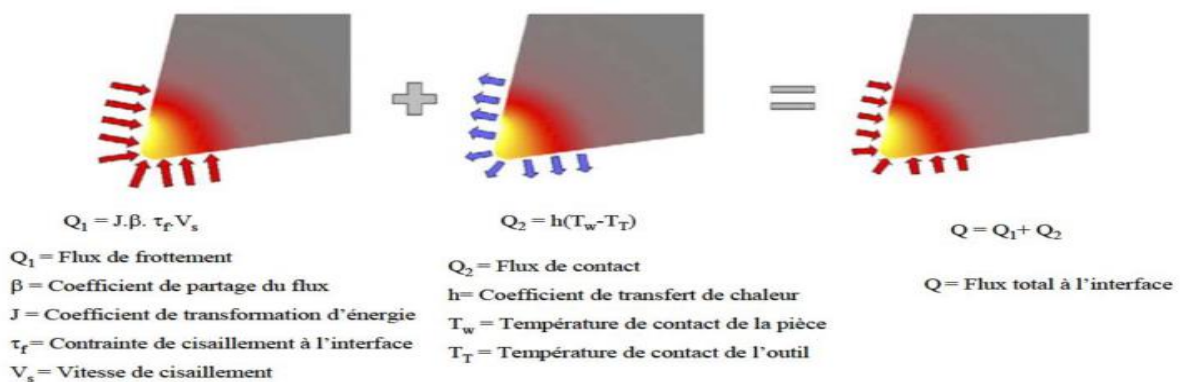


Fig 2.1 Flux généré à l'interface de contact outil/copeau [21]

2.1/Aspects thermiques en usinage

Il existe de nombreux modèles et techniques utilisés pour étudier l'évolution de la température durant la coupe des métaux. Pour étudier théoriquement l'effet thermique, des méthodes expérimentales ont été mise en place pour montrer la répartition des champs de la température. Les essais permettent de mettre en évidence une variation cyclique de la température dans l'outil induisant une fatigue du matériau pouvant conduire à la rupture. Les autres chercheurs ont utilisé la méthode des éléments finis pour étudier le transfert de chaleur

durant l'usinage, l'objectif étant de prédire le profil de la température à l'interface outil copeau. Après la mise en œuvre de modèle, les résultats confirment les recherches analytiques, l'avance et la vitesse de coupe sont les paramètres importants sur la température.[3]

Umbrello et al (2007) ont proposé l'évaluation d'un coefficient global de transfert thermique à l'interface outil copeau [3]17] avec le logiciel Deform 2D en utilisant l'approche Lagrangienne-Eulérienne arbitraire. Un thermocouple a été utilisé pour mesurer la répartition thermique avec les outils de tournage. Ensuite le coefficient prend place dans une modélisation de l'étude thermique à l'interface outil-copeau, permettant ainsi de recalibrer à l'aide d'un seul paramètre l'effet de ces échanges sur le modèle par la méthode des éléments finis et d'obtenir une bonne corrélation avec l'expérience.

2.2 /La Coupe des Métaux

Toutes les opérations de coupe peuvent être étudiées à partir d'un processus élémentaire, dans lequel un outil en forme de coin à arête rectiligne est forcé de se déplacer par rapport à une pièce de façon à enlever un copeau. Seul le mouvement relatif outil-pièce importe, ce qui permet d'étudier avec le même modèle les opérations aussi différentes : le tournage (outil fixe, pièce en rotation) et le fraisage (pièce fixe, outil en rotation).

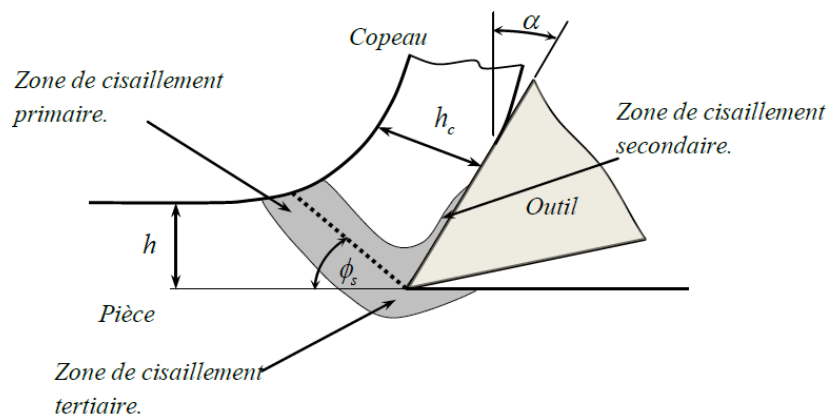


Fig 2.2 Géométrie de la formation du copeau [15]

La formation du copeau s'effectue par un cisaillement de la matière en amont de la pointe de l'outil. On peut distinguer ici trois zones de cisaillement :

I Zone de cisaillement primaire : Elle est aussi appelée zone immédiate de formation du copeau et s'étend de l'arête de coupe jusqu'à la surface libre du copeau. Dans cette zone les grains constituant le copeau sont orientés suivant le plan de cisaillement. Le plan de

cisaillement fait un angle Φ_s (angle de cisaillement) avec la surface usinée. Cet angle et l'épaisseur effective hc du copeau dépendent de l'épaisseur de coupe, h , de l'angle de coupe α , du type du matériau usiné et du matériau de l'outil.

II Zone de cisaillement secondaire : Elle est aussi appelée zone d'écrouissage du copeau et se situe à l'interface de l'outil et du copeau. C'est une zone de frottement et de glissement qui est responsable entre autre de l'usure en cratère.

III Zone de cisaillement tertiaire : c'est la zone d'écrouissage de la pièce. C'est une zone de frottement et de glissement entre la face de dépouille et la surface usinée. Elle donne naissance à l'usure en dépouille suite au retour élastique de la matière après le passage de la pointe de l'outil. Dans cette zone, des singularités d'écoulement peuvent se produire sur la pointe de l'outil.

Une différence doit être faite selon que le mouvement de coupe est perpendiculaire ou non à l'arête de coupe. On appelle coupe orthogonale les opérations pour lesquelles l'arête de coupe est perpendiculaire à la vitesse de coupe et la coupe oblique le cas plus général pour lequel l'angle n'est pas droit, .[15]

2.3/Formulation des modèles :

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

- Lagrangienne (Lagrangian),
- Eulérienne (Eulerian),
- Lagrangien-Eulérienne arbitraire (Arbitrary Lagrangian - Eulerian (ALE)).

2.3.1/ Approche Lagrangienne :

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

Cette description a certaines qualités pour l'application au problème de la coupe. Le traitement des conditions aux limites de surface libre est simple. Il est possible de suivre une grandeur attachée à une particule de l'écoulement. Les deux principales difficultés associées à

cette approche sont d'une part le traitement des grandes déformations et d'autre part, la gestion de la séparation du copeau. Les grandes déformations localisées génèrent des distorsions de mailles importantes et implique l'utilisation technique de remaillage ou de maillage pré-distordu. La séparation du copeau nécessite une gestion spécifique car il y a création de nouveaux bords libres. Malgré ces difficultés, l'approche lagrangienne permet de réaliser des modélisations complètes de cas de coupes stationnaires (copeaux continus) et instationnaires (copeaux discontinus). [22]

2.3.2/ Approche Eulérienne

Cette approche focalise l'attention sur une région fixée de l'espace au travers de laquelle s'écoule la matière. Son application à la simulation de la coupe est couplée avec une gestion des surfaces libres permettant, à partir d'une définition plus ou moins grossière de la géométrie initiale du copeau, d'obtenir l'écoulement en phase stationnaire d'un copeau continu (figure 2.3). La gestion des surfaces est définie de manière à obtenir des composantes normales de vitesses nulles sur la surface libre de la pièce et du copeau, ainsi que des contraintes normales négatives sur l'interface de contact.

Ce type d'approche permet d'étudier l'influence de certains paramètres du procédé sur la formation d'un copeau continu. Kim, Lee et Sin [23] détaillent par exemple l'influence de la profondeur de passe, de la vitesse de coupe et du rayon d'arête de l'outil sur les champs de déformations, de contraintes et de températures obtenus. Leur modèle thermo-visco-plastique est validé à partir d'une comparaison des efforts mesurés expérimentalement et obtenus par simulation. Cette formulation est à la base des premières simulations réalisées en coupe orthogonale, mais ne permet pas de rendre compte de la formation d'un copeau discontinu.

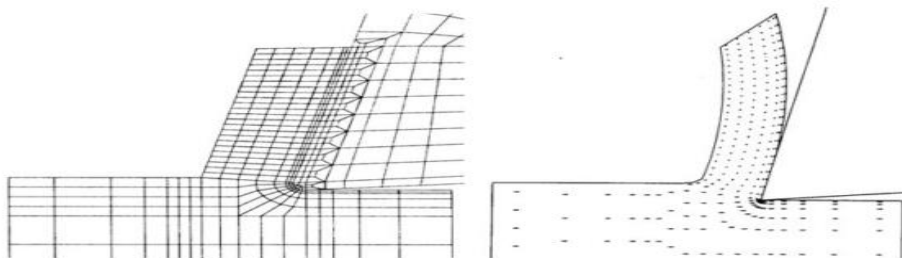


Fig 2.3 Configurations initiale et finale issues du modèle de Kim, Lee et Sin [24]

2.3.3/ Approche Eulérienne-Lagrangienne Arbitraire (ALE)

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

2.4/ Maillage

C'est une région continue divisée en éléments discrets appelés éléments dans la méthode des EF. Cette procédure est appelée discrétisation ou maillage et elle est purement géométrique.

Les mailles initiales des EF ne peuvent pas maintenir leur forme générale et peuvent se détruire à cause des différentes déformations plastiques durant la coupe des métaux ou le formage du métal. La distorsion due au non linéarité, conduit à des erreurs numériques. Pour résoudre ce problème, une nouvelle maille FE doit être générée dans la manière à changer la taille, celle-ci est appelée procédure de maillage adaptative.

L'une des procédures de maillage adaptatives est la technique de remaillage continu, et comporte la génération de nouvelles mailles FE hors les mailles existantes détruites. La deuxième technique est appelée technique de raffinement basée sur l'augmentation de la densité des mailles locales par la réduction de la taille de l'élément local, comme est montré sur la figure (2.4). [25]

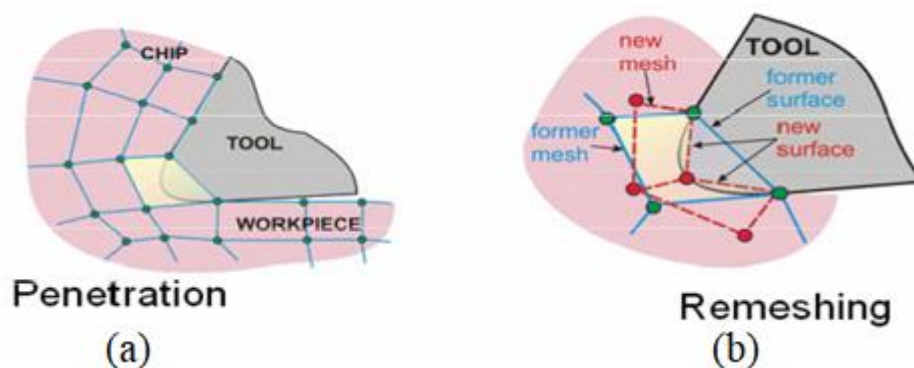


Fig 2.4 Raffinement: (a) maille locale initiale, (b) réduction de la taille de l'élément

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 (2.5). 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.[25]

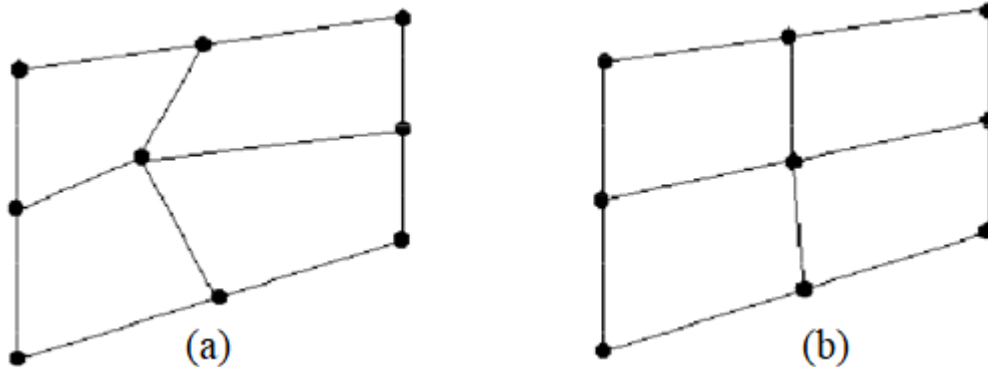


Fig 2.5 Lissage: (a) maille locale initiale, (b) Réallocation des nœuds

2.5/Les différents domaines de modélisation

Le domaine statique

Dans ce domaine, l'accélération, l'angle de coupe et le paramètre temporel ne sont pas prise en considération. Par contre la section de coupe varie au cours du temps et les efforts de coupe évoluent en fonction de l'épaisseur de matière, et dépend aussi de l'angle de coupe.

La modélisation dans ce domaine pourrait être utilisée en tournage où la section est constante lors de la coupe mais pas dans le procédé de fraisage.

Le domaine quasi-statique

Les modélisations dans ce domaine prennent en compte la section réelle du copeau .elles tiennent compte des hypothèses de rigidité faites pour l'outil et la pièce mais pas des conditions environnantes de la machine c'est-à-dire dans ce domaine le comportement vibratoire du système Pièce-Outil-Machine.

Le domaine dynamique

Dans ce domaine il y a des incréments de temps très rapprochés et en tenant compte l'accélération, la masse et l'amortissement du système Pièce-Outil-Machine

(comportement vibratoire). La caractérisation du système Pièce-Outil-Machine est dans le domaine fréquentiel.[1]

Les Modèles de comportement

2.6/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 : Oxley, Johnson-Cook et Zerilli-Armstrong.

2.6.1/Modèle d'Oxley

Oxley (1990) et son groupe de recherche ont utilisé la loi de puissance pour représenter la contrainte d'écoulement pour l'acier au carbone. [2]

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^n \quad (2.1)$$

Où σ et ε sont la contrainte d'écoulement et la déformation, σ_1 est la contrainte d'écoulement de matière à $\varepsilon = 1.0$ et n est l'exposant de durcissement de la contrainte. σ_1 et n dépendent de la température modifiée par la vitesse (T_{mod}) Donnée par McGregor et Fisher. T_{mod} est défini comme suite;[11]

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

Où ϑ et ε_0 sont des constantes de matériau de la pièce usinée et elles ont des valeurs de 0,09 et 0,1 pour l'acier au carbone respectivement.[3],[9]

2.6.2 /Modèle de Johnson-Cook

Johnson et Cook (1993) ont développé un modèle de contraintes basé sur la torsion et le test de barre dynamique de Hopkinson sur les large déformations et grande températures avec L'équation constitutive suivante;

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

La première parenthèse est un terme élasto-plastique et représente un durcissement par déformation. Le deuxième est le terme de viscosité et il montre que la contrainte d'écoulement du matériau augmente lorsque le matériau est exposé à des taux de contrainte élevés, le dernier terme est de ramollissement due à la température.[2],[8],[9]

A, B, C, n et m sont des constantes matérielles trouvées par des essais sur les matériaux. T est la température instantanée, T_0 est la température ambiante et T_f est la température de fusion du matériau donné [10]. Le modèle de Johnson-Cook suppose que la contrainte d'écoulement est affectée indépendamment par la déformation, le taux de déformation et la température.

$$T_f > T > T_t \quad (2.4)$$

En dessus la température de transition T_t , l'effet de température sur la loi d'écoulement est négligé. Entre T_f et T_0 la contrainte d'écoulement décroît avec la température jusqu'au zéro. La contrainte d'écoulement est nulle après la température de fusion. $T = T_f$ est donc la température de transition ou on trouve un mécanisme d'adoucissement thermique.[9]

2.6.3/Critère d'endommagement de Johnson Cook.

Dans le but de définir un critère d'initiation de l'endommagement, ce modèle est souvent couple à une loi d'endommagement qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(-D_3 \mu)] \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_t}{T_f - T_t} \right) \right] \quad (2.5)$$

Avec les variables D_1 à D_5 les paramètres d'endommagement du modèle de Johnson Cook associés au matériau usiné, qu'on détermine expérimentalement. Lorsque l'endommagement d'un élément w est égale a 1, l'endommagement est initié.

L'endommagement d'un élément est défini comme suite;[10]

$$W = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \quad (2.6)$$

D'ou

$\Delta \varepsilon_f$: Est l'incrément de la déformation plastique équivalente

ε_f : Est déformation équivalente de rupture

2.6.4/Modèle de Zerilli-Armstrong

Le modèle de ZERILLI-ARMSTRONG (1987), adopté très largement de la théorie régissant le mouvement des dislocations dans un matériau, propose une expression de la contrainte d'écoulement σ en fonction de la déformation plastique équivalente, de la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$, de la température T , du diamètre moyen d'un grain l , et de la structure cristallographique du matériau étudié, dans le cas d'un matériau cubique faces centrées :

$$\sigma = C_0 + C_1 \exp \left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) + C_5 \varepsilon^n \quad (2.7)$$

L'équation constitutive pour les matériaux cubique à face centrés écrits comme suit :

$$\sigma = C_0 + C_2 \varepsilon^{-1/2} \exp \left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (2.8)$$

Dans ces équations, C_0 est une composante de contrainte qui explique la densité de dislocation sur la contrainte d'écoulement, $C_1 \dots C_5$, sont des constantes matérielles et T est la température absolue.[8][10]

Chapitre 3

Modélisation et simulation en 3D d'une opération de surfacage en avalant

Par la méthode des éléments finis

Introduction

Pour étudier les procédés d'usinage, l'utilisation de la simulation numérique est un moyen efficace. Pour cela, le modèle numérique doit prendre en compte le problème physique et les phénomènes thermomécaniques présents.

Pour améliorer la fabrication, la qualité, la performance de l'outil de coupe et la réduction du coût, plusieurs industries cherchent à bien comprendre le processus de coupe des métaux. L'une des méthodes les plus répandues est la méthode des éléments finis. Elle est capable de résoudre les problèmes couplés sans avoir recours à l'expérimentation. [25]

Nous allons à travers ce chapitre modéliser et simuler la formation du copeau en 3D d'une opération de surfacage en avalant de procédé de fraisage à sec de l'acier Inoxydable AISI 316L

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 sachant que la température qui se forme suite au frottement dans le couple outil/pièce a une influence sur la durée de vie de l'outil. On va décrire toutes les étapes nécessaires afin d'obtenir un modèle réaliste. Des simulations seront effectuées par la suite à l'aide du logiciel de simulation par éléments finis ANSYS/Explicite.

3.1/ Application au modèle numérique

En effet, pour bien simuler le comportement du matériau usiné, il faut choisir un modèle qui correspond au mieux à celui-ci sous les diverses sollicitations thermomécaniques auxquelles il fait face dans des conditions réelles d'usinage, Il existe divers modèles performants de comportement des matériaux utilisables en simulation numérique de l'usinage. Parmi les lois dans notre logiciel et l'un plus utilisées c'est la loi de Johnson Cook.

Afin d'étudier le comportement mécanique du couple outil-pièce lors de fraisage ; Nous utiliserons pour notre démarche de simulation, la version explicite du logiciel ANSYS.

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

3.2/Loi de comportement d'Acier inoxydable (AISI 316 L)

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

$$\sigma(\varepsilon_{eq}, \dot{\varepsilon}_{eq}, T) = (A + B(\varepsilon_{eq}^\rho)^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right] \quad (3.1)$$

Ecrouissage dynamique adoucissement

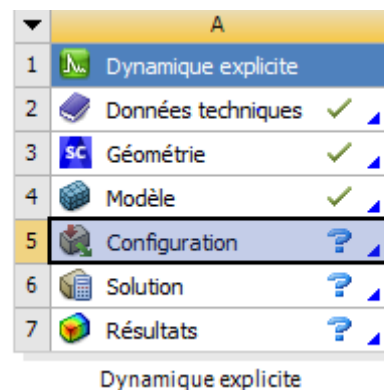
On peut décomposer cette équation d'écoulement en trois termes, un terme d'écrouissage, dynamique et d'adoucissement. La loi nécessite la connaissance des 5 paramètres, **A**, **B**, **C**, **n** et **m**. **A**, **B** et **n** sont liées au comportement élasto-plastique du matériau, **C** représente la sensibilité à la vitesse de déformation et **m** représente la sensibilité du matériau à la température.

3.3/Simulation du problème en ANSYS

Le code d'éléments finis ANSYS 15.0.7 est utilisé dans cette partie pour simuler le comportement du mécanisme de contact par frottement des deux corps (pièce et outil) lors d'une opération de fraisage. Ce code possède des algorithmes de gestion du contact avec frottement basés sur la méthode de Lagrange.

3.4/Les procédures à suivre pour la modélisation

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



3.4.1/Les données techniques

Toutes les informations concernant les matériaux sont affectées à cet étage. Le choix est fait soit dans la bibliothèque du logiciel ou par création d'un nouveau matériau dans la bibliothèque.

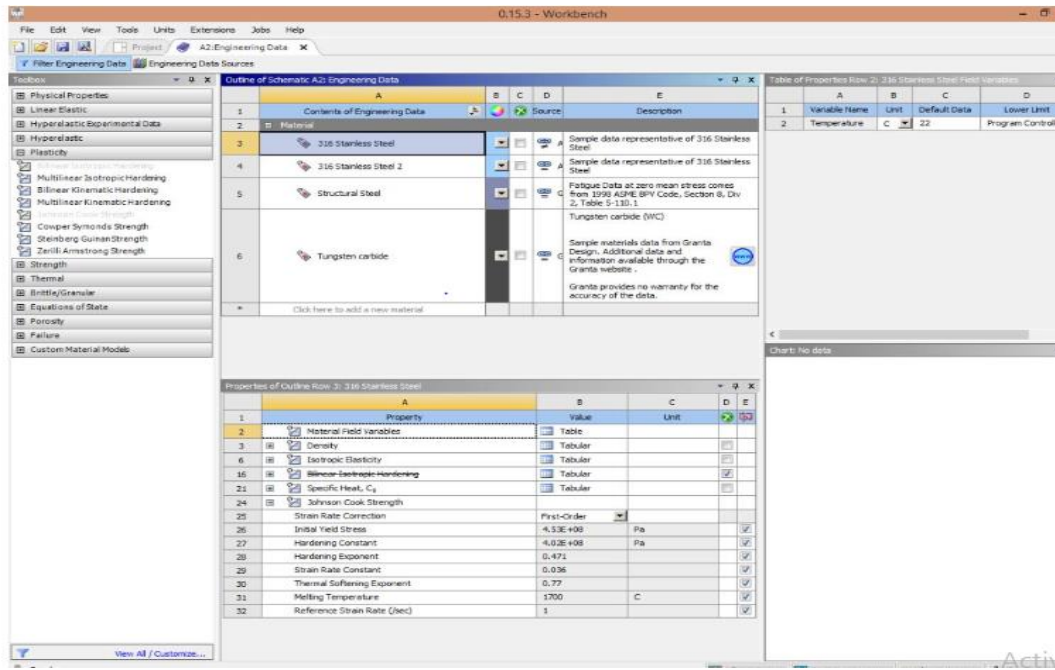


Fig 3.1 Bibliothèque des techniques données

3.4.2/Géométrie (Modélisation de l'outil de coupe et de la pièce)

Notre travail consiste à développer numériquement les différentes étapes de procédé de fraisage périphérique l'acier Inoxydable AISI 316L avec une fraise à disque en acier rapide, 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.... 20481 éléments sont générés sur la pièce et sur l'outil et 19755 nœuds, le contact a des propriétés thermomécaniques, la température ambiante est égale à 20°C.

Le coefficient de frottement est $\mu = 0.4$, 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 disque à 1 taille, de diamètre D est égal à 15mm, il est assimilé à un corps indéformable (rigide), aucun champ de déformation sur le corps, mais

avec une conduction de la chaleur; les variables géométriques de l'outil sont données : angle de coupe $\gamma = 6.01^\circ$, l'angle de dépouille $\alpha = 5^\circ$ et l'angle de taillant $\beta = 85^\circ$.

Le tableau donne respectivement les critères et les paramètres de la loi de Johnson Cook de l'acier AISI inoxydable 316L :

A (Mpa)	B (Mpa)	C	M	N	$\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1})	T_0 (K)	T_f (K)
453	402	0.036	0.77	0.471	1	293	1700

Tableau 3.1 paramètres de Johnson Cook pour l'acier AISI inoxydable 316L [4]

Les propriétés physiques et mécaniques de l'outil :

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


Module de Young	2,26e+05 MPa
Coefficient de Poisson	0,29000
Module d'élasticité	1,7937e+05 MPa
Module de cisaillement	87597 MPa
Coefficient de dilatation thermique	1,02e-05 1/°C
Limite à la rupture en traction	2390,0 MPa
Limite élastique en traction	2170,0 MPa
Thermique 	
Conductivité thermique	0,022000 W/mm.°C
Chaleur spécifique	4,65e+05 mJ/kg.°C

Tableau 3.2 Les propriétés thermomécaniques de l'outil

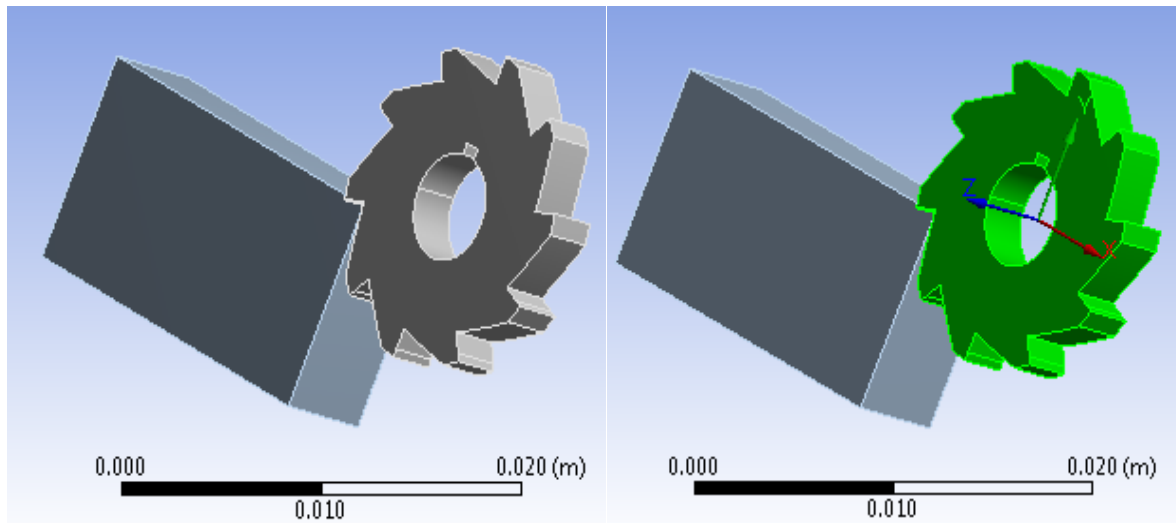


Fig 3.2 Géométrie de modèle

3.4.3/Modèle

Plusieurs étapes sont engendrées :

- L'affectation des matériaux sur les géométries de modèle est effectuée dans cette étape. Pour la simulation la pièce est en acier inoxydable AISI 316L et l'outil est en acier rapide.
- Définition des systèmes de coordonnées globale et locale.
- Définition des connexions : l'interaction de la pièce et de l'outil est définie en donnant les coefficients de frottement statique et dynamique.
- La génération de Maillage est effectué avec un raffinement .Dans ce cas le système (auto dynamique) est une opération dont le raffinement est fait automatiquement aux zones d'erreur plus importantes comme l'arrêt de l'outil.

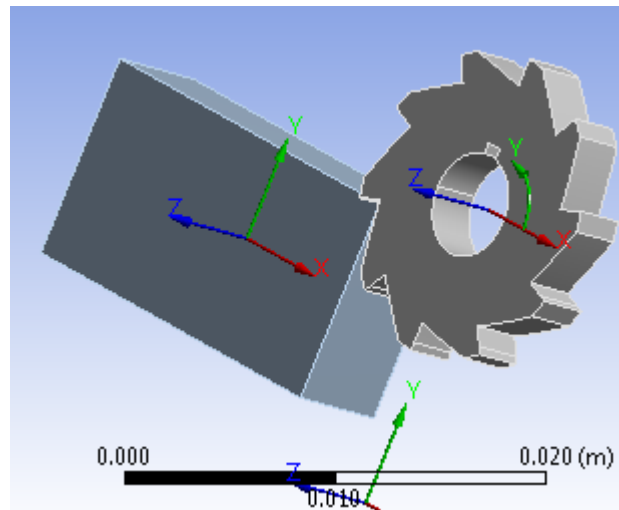


Fig 3.3 Les systèmes de coordonnées

a) Les conditions initiales aux limites

Les conditions initiales aux limites thermiques sont définies comme suit:

$$T(x, y, z, 0) = T_{\infty} \quad (3.2)$$

$$-k \frac{\delta T}{\delta \eta} = h(T - T_{\infty}) \quad (3.3)$$

La condition de contact outil/ pièce

$$-k \frac{\delta T}{\delta \eta} = \begin{cases} W_n & 0 < t < t_c \\ 0 & t > t_c \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec :

T : Température (°C),

k : Conductivité thermique (W/m k),

c : Chaleur spécifique (J/kg K).

b) Le maillage et la gestion de contact

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 0.1 et la constante de dégradation est égale à zéro, La température initiale de la pièce et de l'outil est de 20°C.

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

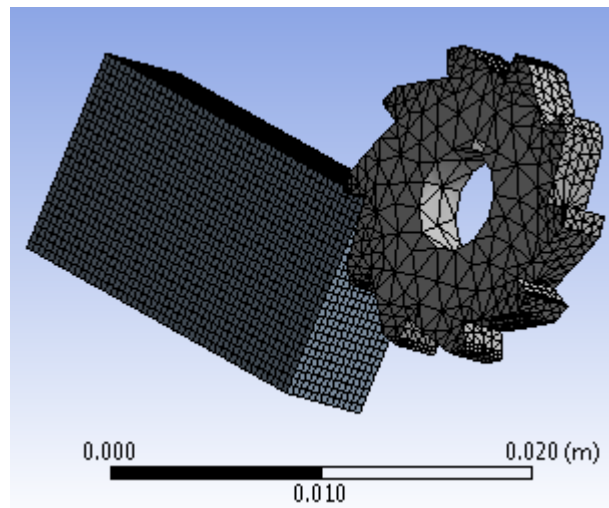


Fig 3.4 Génération du maillage et raffinement

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

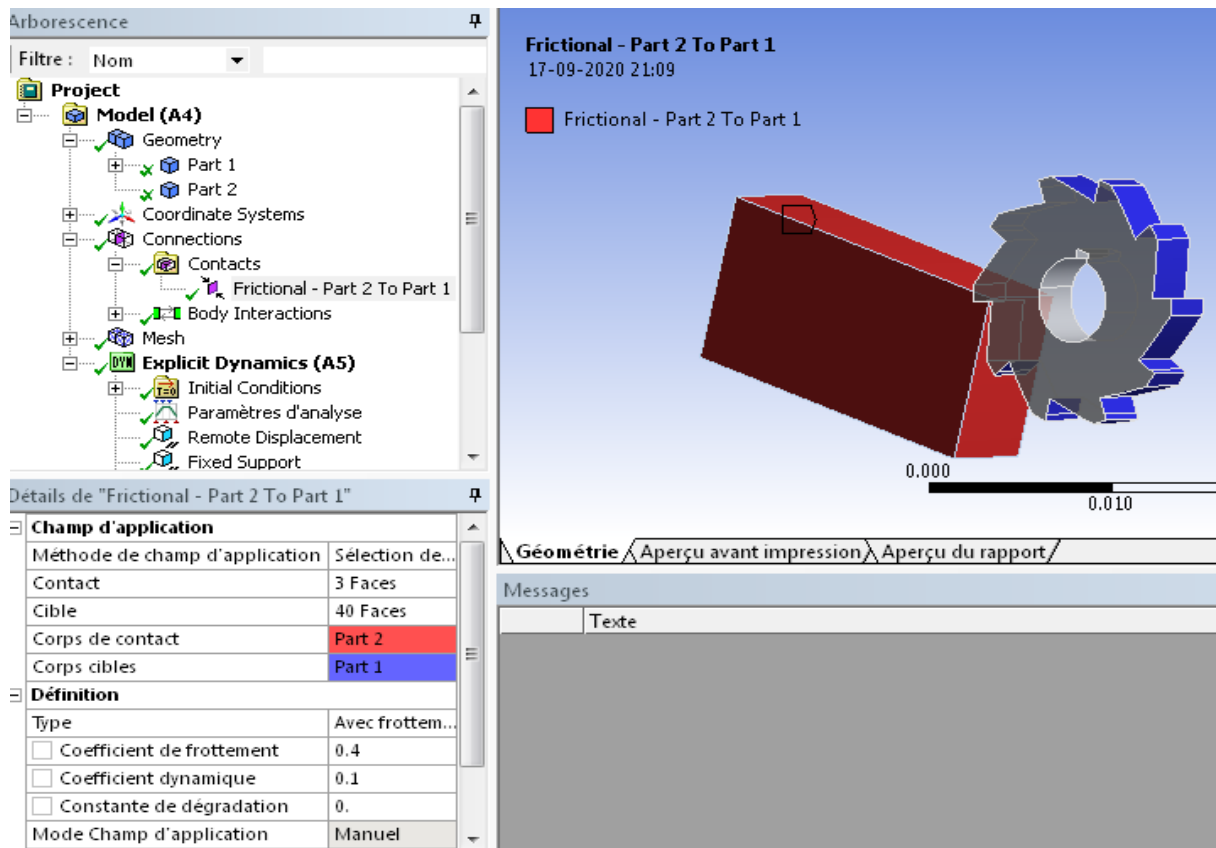


Fig 3.5 Gestion de contact

3.4.4/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

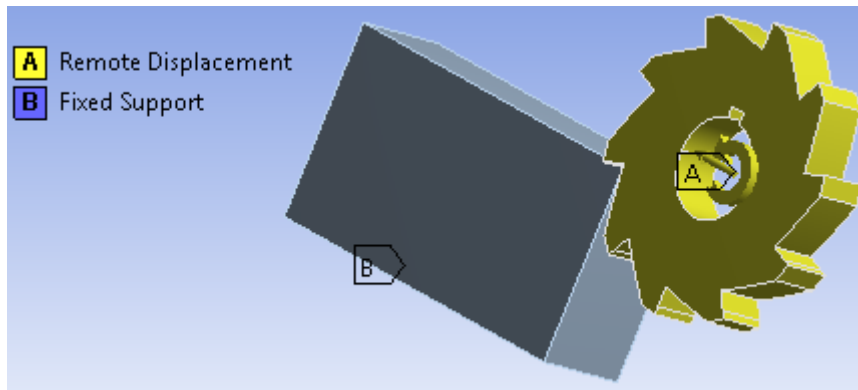


Fig 3.6 Déplacement distant

Les paramètres d'analyses sont les suivants :

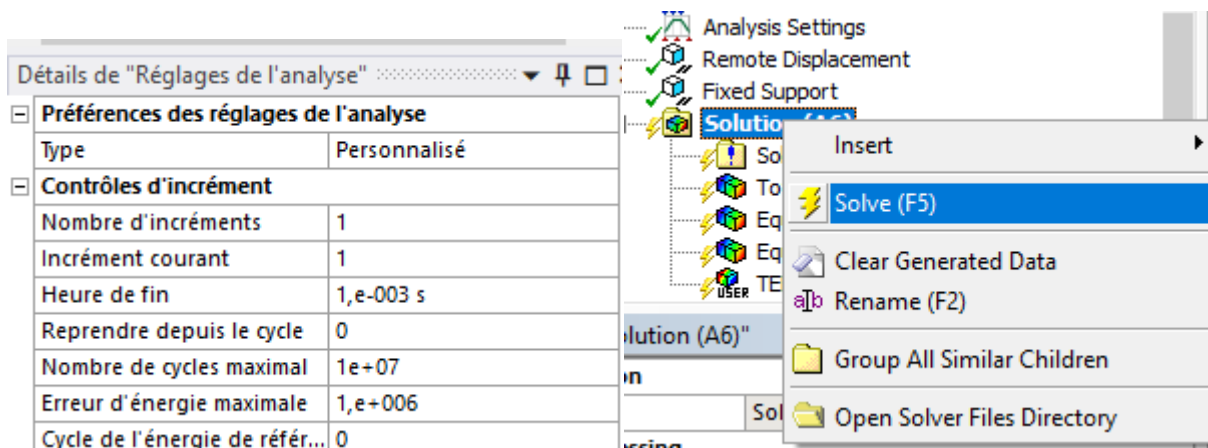


Fig 3.7 a) Réglages d'analyses

b) Résolution de solutions

3.5/ RESULTATS DE LA SIMULATION

Dans notre modèle numérique d'usinage en 3D, nous arrivons à obtenir le déchirement de la matière et à définir l'influence des paramètres de coupes sur le profil de la température à l'interface outil/pièce.

. Les résultats sont illustrés sur les figures suivantes :

- Pour les conditions de coupe, on a pris en considération :
- profondeur de passe (a_p)
- vitesse de coupe V_c
- vitesse d'avance V_f

Avec ;

$$V_f = f \cdot n$$

$$n = 1000 \cdot V_c / \pi D$$

Les données utilisées sont les suivantes :

Vitesse de coupe (m/min)	100-150
Avance par dent (mm/dent)	0.01-0.1

Tableau 3.3 Les données de la simulation

a) La distribution de la température à l'interface outil/pièce de l'acier Inoxydable AISI 316L

1^{er} cas : $f_z=0.01\text{mm/dt}$

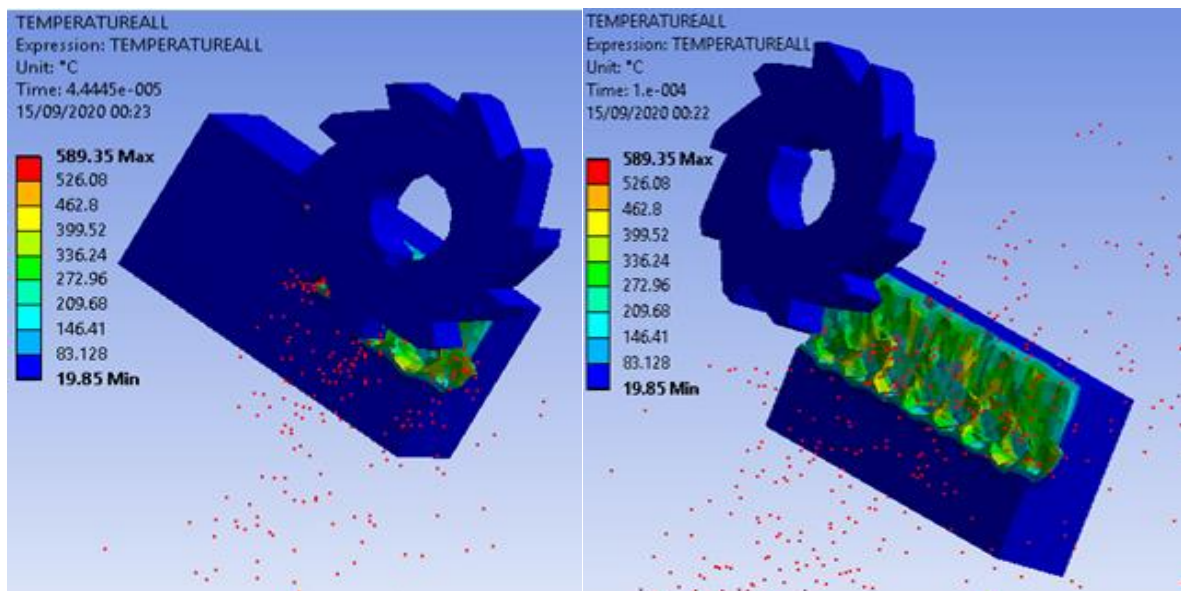


Fig 3.8 $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$

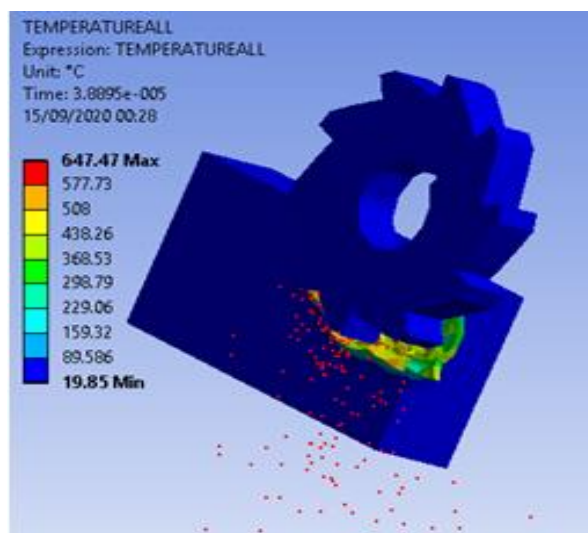


Fig 3.9 $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$

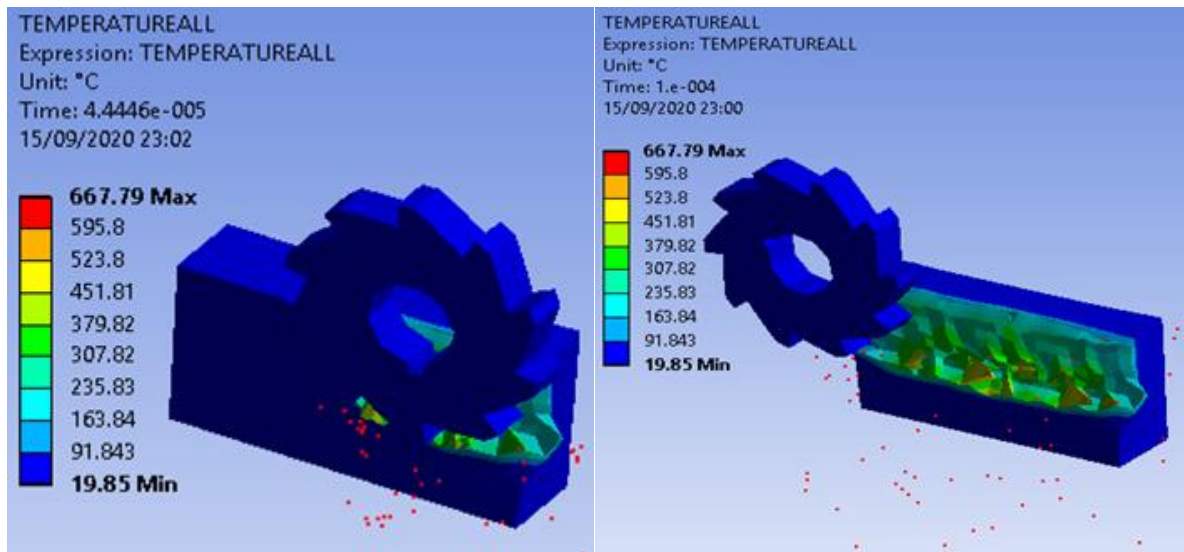


Fig 3.10 $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$

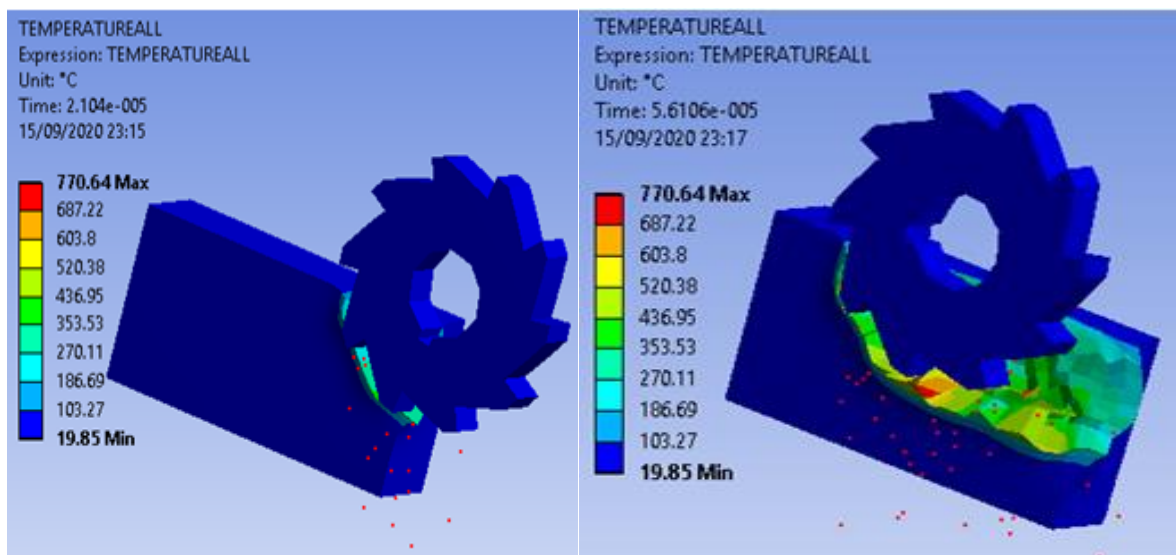


Fig 3.11 $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$

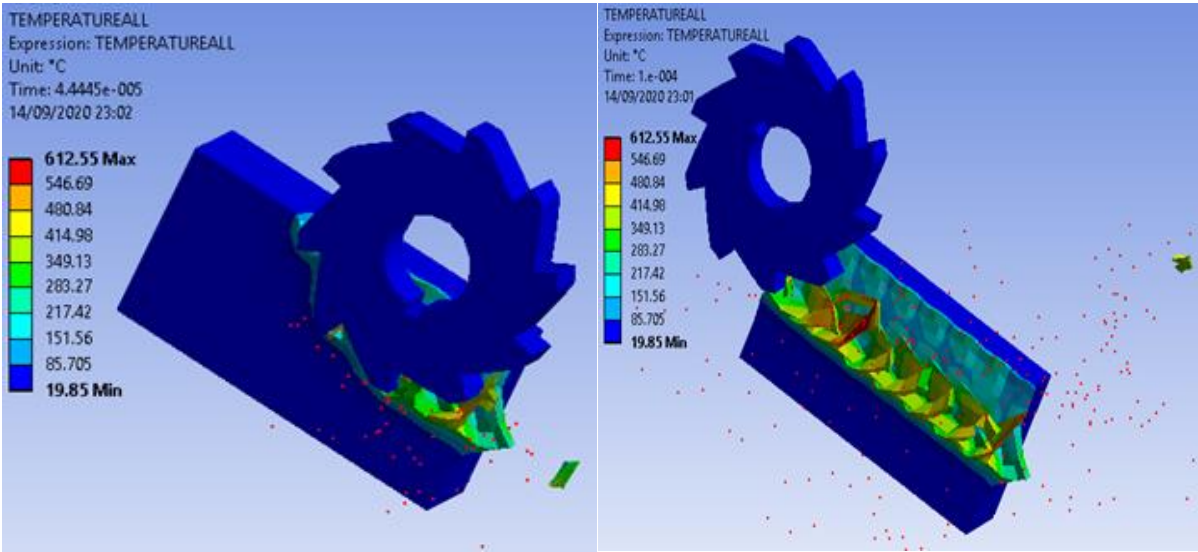


Fig 3.12 Vc=100m/min ;ap=0.45mm

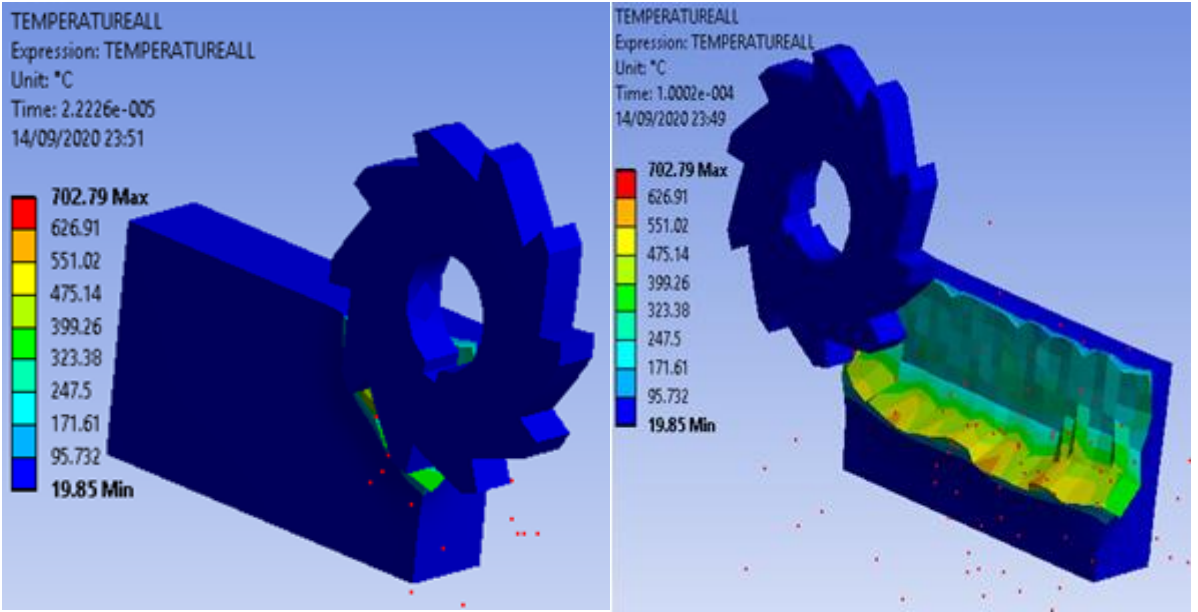


Fig 3.13 Vc=125m/min ;ap=0.45mm

2eme cas : $f_z=0.02\text{mm/dt}$

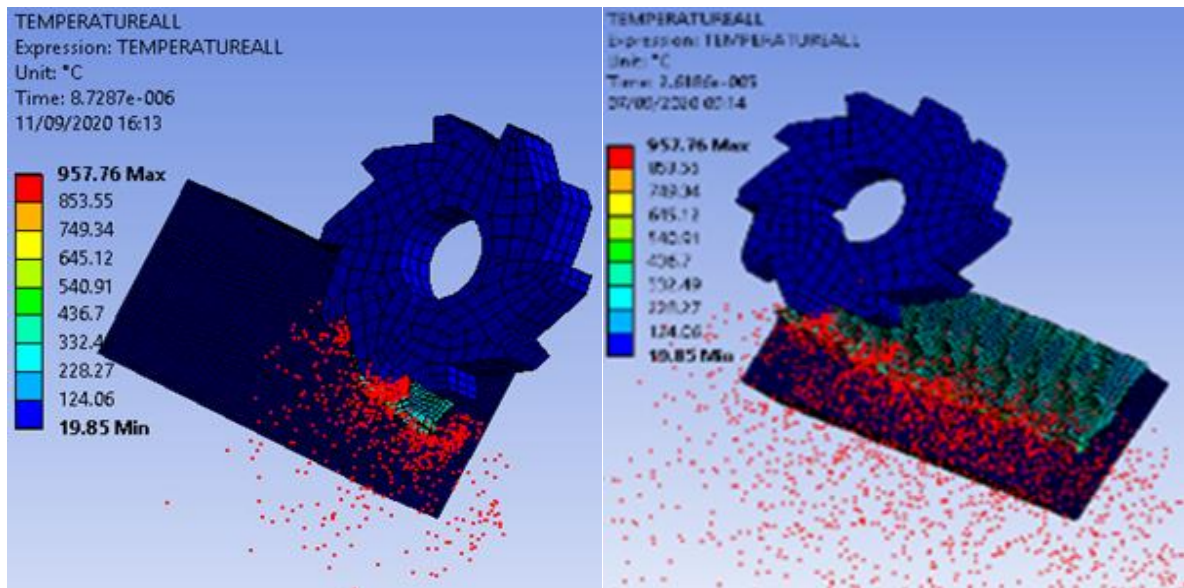


Fig 3.14 $V_c=100\text{m /min}$; $a_p=0.15\text{mm}$

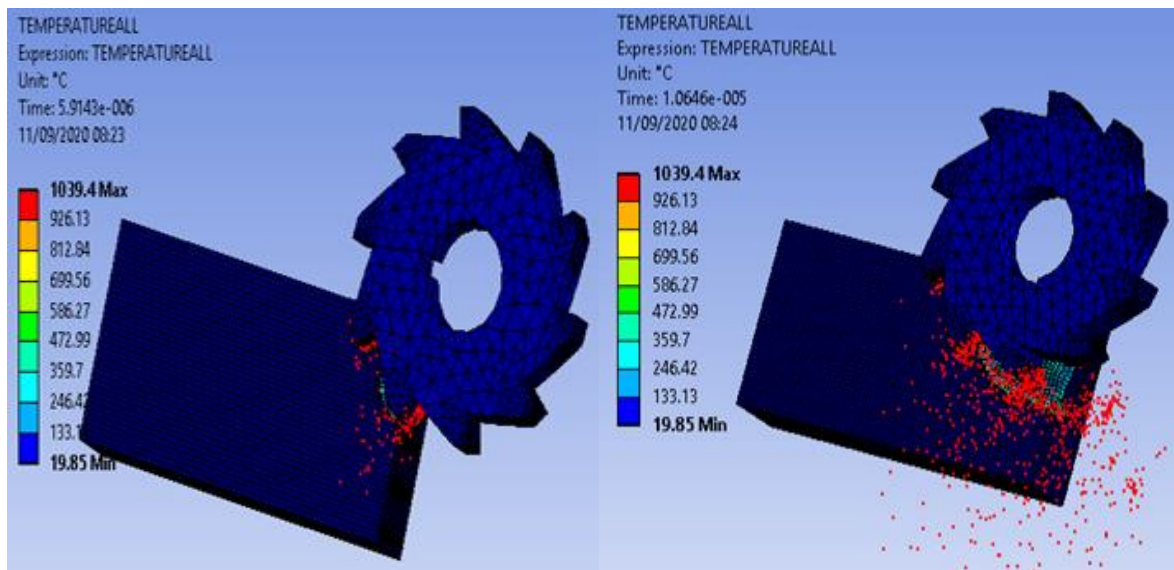


Fig 3.15 $V_c=125\text{m /min}$; $a_p=0.30\text{mm}$

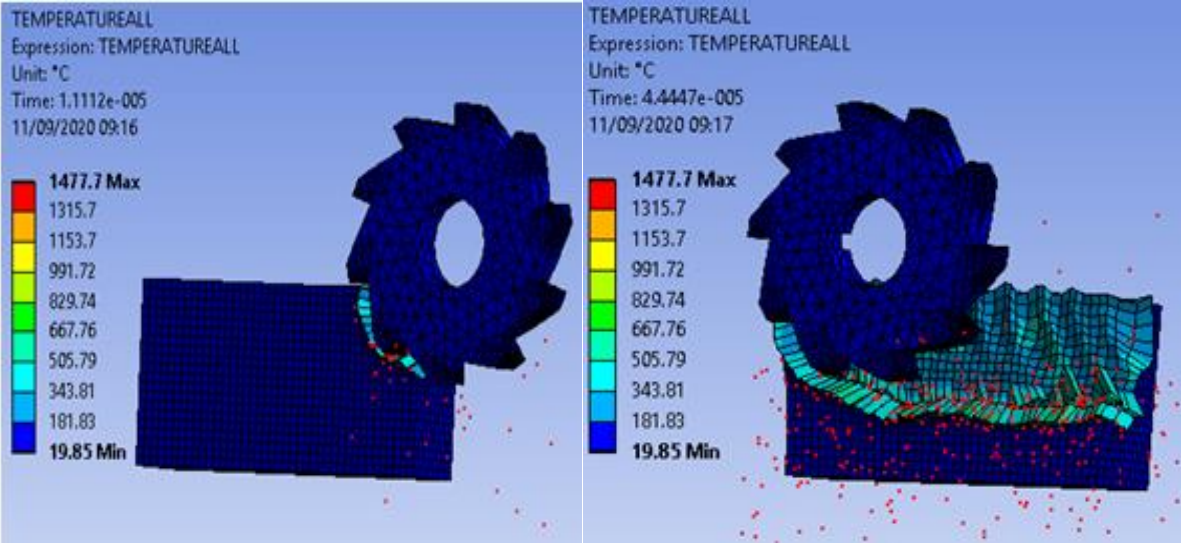


Fig 3.16 Vc=150 m/min ; ap=0.45mm

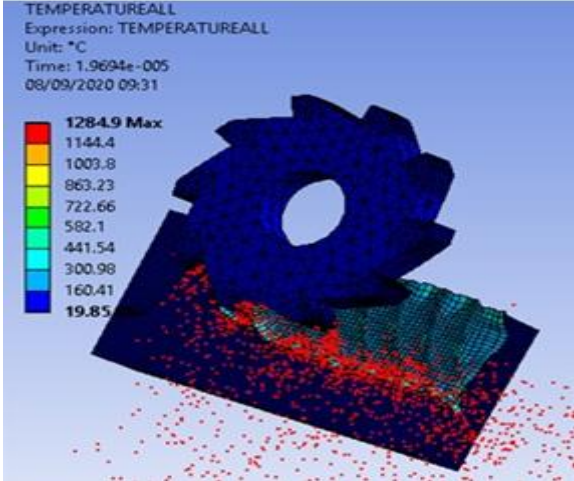


Fig 3.17 Vc=100m/min ; ap=0.30mm

b) Distribution des contraintes à l'interface outil/pièce

1^{er} cas : $f_z=0.01\text{mm/dt}$

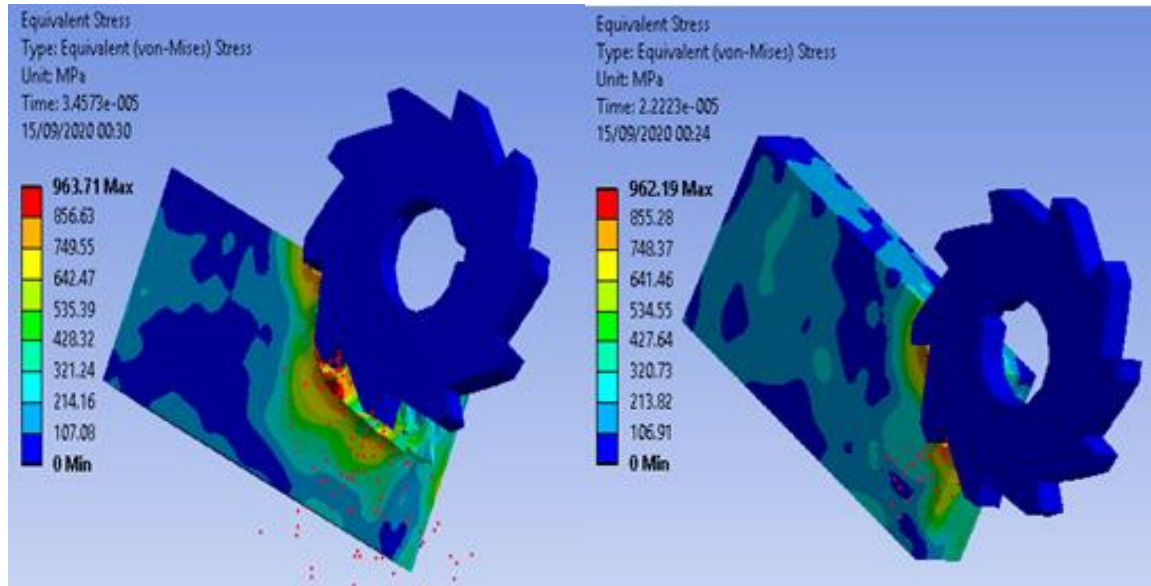


Fig 3.18 a) $V_c=100\text{m/min}, a_p=0.15\text{mm}$

b) $V_c=125\text{m/min}; a_p=0.15\text{mm}$

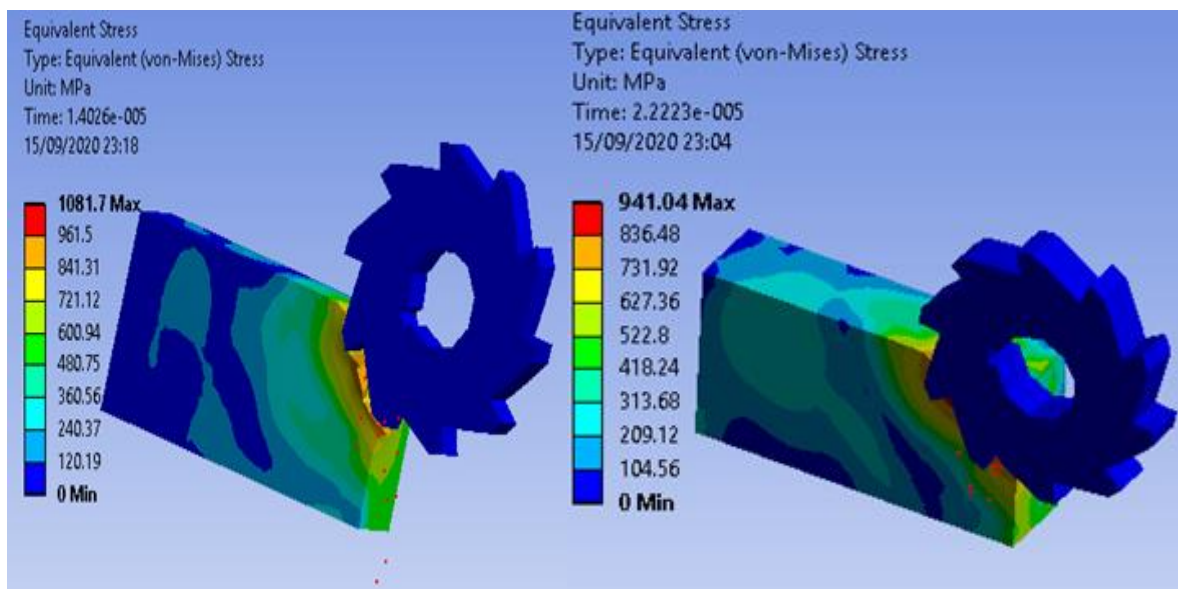


Fig 3.19 a) $V_c=125\text{m/min}; a_p=0.30\text{mm}$

b) $V_c=100\text{m/min}; a_p=0.30\text{mm}$

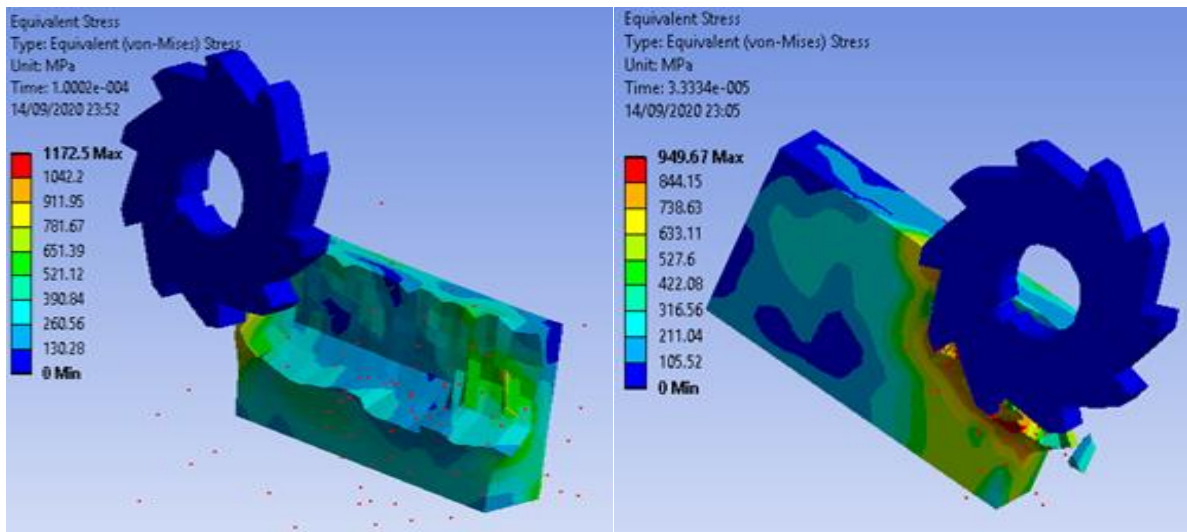


Fig 3.20 a) $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$

b) $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$

2eme cas : $f_z=0.02\text{mm/dt}$

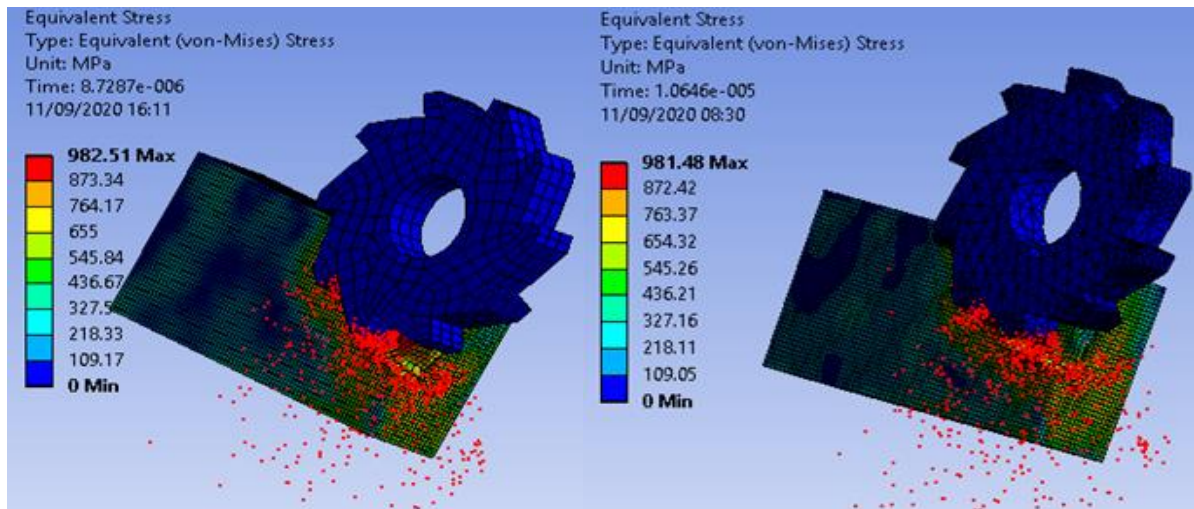


Fig 3.1 a) $V_c=100\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$

b) $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.30\text{mm}$

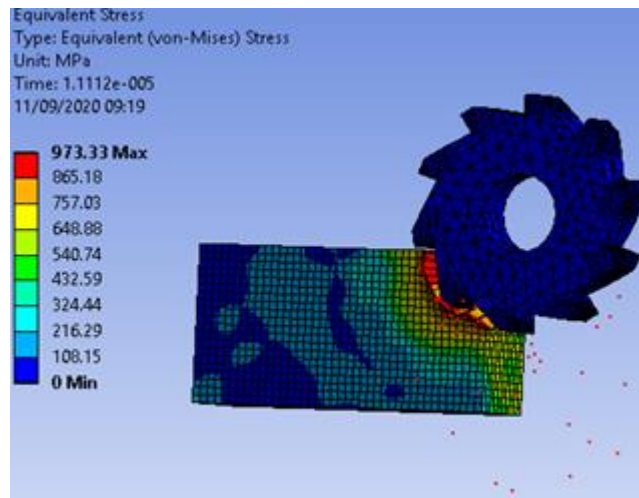


Fig 3.2 $V_c= 150\text{m/min}$; $a_p=0.45\text{mm}$

Influence de la vitesse de coupe, vitesse d'avance et de la profondeur de passe sur la température :

L'analyse des résultats numériques sur la profondeur de passe en fonction de la vitesse de coupe montre que cette dernière a un effet significatif sur l'augmentation de la température. Selon les résultats de la simulation; avec un incrément de profondeur de coupe de 0,15 à 0,45 mm, on remarque une diminution de la contrainte équivalente de Von Mises et lorsque la vitesse de coupe augmente de 100 à 150 m / min. On peut constater une augmentation de la température avec l'augmentation de la profondeur de passe.

Pour $a_p= 0.30-0.45\text{mm}$

La température atteint une valeur maximale pour une vitesse de coupe de 150m/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.

Si on maintient une vitesse constante et qu'on augmente l'avance, on remarque également une augmentation de la température à l'interface pièce/outil.

On peut conclure que le contact entre la pièce et l'outil produit une température importante.

La température augmente en fonction de la vitesse de coupe au contact pièce/outil.

Une partie de la chaleur générée à l'interface outil-copeau est dissipée dans le corps de l'outil.

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 température maximale au niveau de l'interface de contact outil/copeau.

CONCLUSION GENERALE

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).

On a exploré les différentes lois représentant l'interaction entre l'outil et la pièce et dans notre étude : on a utilisé la loi de comportement de Johnson- Cook pour la modélisation de la pièce, on a aussi formulé le problème thermomécanique du fait que les phénomènes tribologiques à l'interface outil/pièce/copeau sont difficiles à modéliser alors que ces phénomènes sont primordiaux sur comportement de l'outil et particulièrement sa résistance à l'usure.

On a varié les paramètres de coupe qui sont l'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe de manière à voir la température optimale à l'interface outil/pièce/copeau en raison de la chaleur produite, particulièrement quand elle est élevée du fait qu'elle a des effets néfastes sur l'outil, ainsi que la pièce.

La détermination de la température de coupe nous a permis :

- L'évaluation de l'usinabilité qui est estimé par les forces de coupe, la température et la durée de vie de l'outil.
- L'appréciation du rôle de variation des paramètres de l'usinage sur la température de coupe pour avoir une meilleure économie d'usinage.
- Le prélèvement de la distribution de la température le long de l'outil, pièce et copeau.

La méthode par élément fini permet de diminuer le besoin d'expérimentation.

Nous estimons que notre travail nous a permis de bien maîtriser le phénomène de la coupe des métaux.

Bibliographies

[1] HIMED Lynda. Modélisation et simulation de la coupe orthogonale en utilisant un code de calcul par la méthode des éléments finis. Thèse pour obtention de Magistère, UNIVERSITÉ DE BATNA, FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT DE MECANIQUE, 2009.

[2] Bouaita Munir. Etude, modélisation et simulation de l'usinage orthogonal par la méthode des éléments finis. Mémoire de Master UNIVERSITE BADJ MOKHTAR ANNABA, 2017.

[3] Aurelien Maurel-Pantel. Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage: Applications à l'identification paramétrique des lois de comportement.. Mécanique [physics.medph]. Université de Franche-Comté, 2009. Français. NNT : 2009BESA2017. tel-00561446

[4] Fousseny KONÉ. Étude expérimentale, modélisation et simulation numérique de l'usinage à sec des aciers inoxydables : Étude de l'effet des revêtements mono et multi couches. Thèse pour obtenir le grade de Docteur. Spécialité : Mécanique et Énergétique École Doctorale EMMA 409 (Énergie Mécanique Matériaux). Université de Lorraine, 2012. France

[5] Finite Element Analysis with ANSYS Workbench. ALPHA SCIENCE INTERNATIONAL LTD. 7200 The Quorum, Oxford Business Park North Garsington Road, Oxford OX4 2JZ, U.K. www.alphasci.com .ISBN 978-1-78332-369-2

[6] Krar, Gill, Smid, Technology of machine tools, Milling machines, The McGraw-Hill companies, inc. 6th edition, 1998, pp19-20, p29, pp58-71

[7] Gara Souhir, Cours interactif: Le fraisage, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul, 2015, pp2-10

[8] ALIA Riadh, GUEMAZ Slimane, Optimisation des Paramètres de Coupe pour Minimiser la Consommation d'Énergie Pendant le Fraisage, 2015, pp.7-12

[9] Chakirsama, Laidikarima, Modélisation et simulation des mécanismes aux interfaces pièce-outil coupeaux de l'acier xc48, 2016, pp7-12

Bibliographie

- [10] MohanrajMurugesan , Dong Won Jung, Johnson Cook Material and Failure Model Parameters
Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications,2019,p4,5,9
- [11]KokouviMawuli KPENYIGBA, Etude du comportement dynamique et modélisation thermo viscoplastique de nuances d'acier soumises à un impact balistique,2013,p20-23
- [12] Edward Trent, Paul Wright, Metal cutting,4thedition, 2000, p15
- [13]US Army Correspondence Course Program, Milling Machine Operations Subcourse No. OD1644, 8th Edition, 1998,pp1-14
- [14] Mayssa GUEDICHE, Modélisation et Simulation de l'usure des outils de coupe au cours du processus d'enlèvement de matière : Approche Expérimentale Et Numérique (MOSUOC), pp.16-17
- [15]M .Temmar, cours sur les Généralités sur l'usinage des metaux,pp14-22
- [16] SpecificationSheet: Alloy 316/316L. SANDMEYER STEEL COMPANY.
www.SandmeyerSteel.com
- [17]D. Umbrello, L. Filice, S. Rizzuti, F. Micariet L. Settineri, « On the effectiveness Of finite element simulation of orthogonal cutting with particular reference to temperature prediction », Journal of Materials Processing Technology, vol. 189, p. 284–291, 2007.
- [18] D. Bennegagi Mohammed el Laribi, polycopie de coupe de métaux en fabrication mécanique et productique, 2018
- [19]Le répertoire de la machine outil (<https://www.machine-outil.com/>)
- [20]F. Lorey. Endommagement des outils de coupe. Les techniques d'ingénieur, traité mécanique et chaleur B7042 2, 1993
- [21]E. Ceretti, L. Filice, D. Umbrello, and F. Micari. ALE Simulation of Orthogonal Cutting: a New Approach to Model Heat Transfer Phenomena at the Tool-Chip Interface. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 56(1):69–72, 2007.
- [22]T.D. Marusich, M. Ortiz, Modeling and simulation of high-speed machining, International Journal for Numerical Methods in Engineering 38 (1995) 3675-3694.

Bibliographie

[23]KIM K. W. , SIN H.-C. – Development of a thermo-viscoplastic cutting model using finite element method – International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1995, vol. 36, n° 3, pp. 379–397

[24]KIM K. W. , LEE W. Y. , SIN H.-C. – A finite-element analysis of machining with the tool edge considered – Journal of Materials Processing Technology. 1999, vol. 86, pp. 45–55

[25]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.