

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
LABORATOIRE DE RECHERCHE DES TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Parcours : Master
Domaine : Sciences & Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

THÈME

***Modélisation du contact à l'interface
outil-copeau : Approche analytique
et numérique.***

Présenté par Messieurs :

GHOUMI Moussa & KOUADRIA Khaled Madani

Devant le Jury :

Nom & Prénom(s)	Grade	Qualité	Structure de rattachement
AISSAT Sahraoui	MCA	Président	Université de Tiaret
MADANI Ahmed	MAA	Examineur	Université de Tiaret
MAKHFI Souâd	MCB	Invitée	Université de Tiaret
HADDOUCHE Kamel	Pr	Encadreur	Université de Tiaret

PROMOTION 2018/2019

Dédicace

À

Nos parents

Nos frères et sœurs

Nos familles

Nos amis.

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de Recherche des Technologies Industrielles (LRTI) de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, dirigé par Monsieur HADDOUCHE Kamel, Professeur au Département de Génie Mécanique, à qui nous exprimons toute notre profonde reconnaissance, et qui nous a témoigné de sa confiance et de son aide scientifique, et qui par son expérience, sa compétence, ses conseils avisés et ses encouragements nous a transmis la passion dans la recherche scientifique.

Nous sommes également très reconnaissants envers le Jury pour l'honneur qu'il nous fait d'avoir accepté d'examiner notre mémoire de Master, et nous le remercions également pour le temps qu'il passe à évaluer notre manuscrit.

Nos vifs remerciements à tous nos Enseignants du Département de Génie Mécanique de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Tiaret.

Enfin, nous remercions toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

LISTE DES ABREVIATIONS

Variable	Désignation
A, B, C, n, m	Paramètres de la loi de Johnson-Cook
a_p	Profondeur de passe
C_p	Chaleur spécifique du matériau usiné
C_v	Constante de vitesse d'Oxley
D	Endommagement du matériau usiné
d_1, \dots, d_5	Paramètres d'initiation de l'endommagement du matériau usiné
D_i	Diamètre de la pièce
E	Module d'Young du matériau usiné
f	Avance
F_1	Effort tangentiel dans la zone de cisaillement primaire
F_2	Effort tangentiel dans la zone de cisaillement secondaire
F_f	Effort d'avance
F_t	Effort de coupe tangentiel
k_m	Conductivité thermique du matériau usiné
l_c	Longueur du contact outil/copeau
l_{OA}	Longueur de la bande de cisaillement primaire
m	Coefficient de frottement de Tresca
N	Fréquence de rotation de la broche
N_1	Effort normal dans la zone de cisaillement primaire
N_2	Effort normal dans la zone de cisaillement secondaire
SHPB	Split Hopkinson Pressure Bar
T	Température
t	Temps
T_0	Température de référence
t_1	Épaisseur du copeau
T_{fus}	Température de fusion
\bar{T}_{OA}	Température moyenne de la zone de cisaillement primaire
\bar{T}_{OB}	Température moyenne de la zone de cisaillement secondaire
V	Vitesse du projectile
V_c	Vitesse de coupe
V_f	Vitesse d'avance
V_g	Vitesse de glissement
Z_I	Zone de cisaillement primaire
Z_{II}	Zone de cisaillement secondaire
Z_{III}	Zone de cisaillement tertiaire
α	Angle de dépouille
β	Angle de taillant
γ	Angle de coupe
$\Delta \epsilon_f$	Incrément de la déformation plastique

δt_1	Epaisseur de la bande de cisaillement secondaire
ε	Déformation
ε_f	Déformation à la rupture
ε_{OA}	Déformation dans la zone de cisaillement primaire
ε_{OB}	Déformation dans la zone de cisaillement secondaire
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation
$\dot{\varepsilon}_0$	Vitesse de déformation de référence
$\dot{\varepsilon}_{OA}$	Vitesse de déformation dans la zone de cisaillement primaire
$\dot{\varepsilon}_{OB}$	Vitesse de déformation dans la zone de cisaillement secondaire
$\ddot{\varepsilon}, \dots, \varepsilon^{(n)}$	Dérivées de la déformation par rapport au temps
λ	Angle de frottement
μ	Coefficient de frottement
μ_0 et q	Paramètres de la loi de frottement de Moufki et al.
ν	Coefficient de Poisson du matériau usiné
ρ	Masse volumique du matériau usiné
σ	Contrainte
σ_{OA}	Contrainte normale dans la zone de cisaillement primaire
σ_{OB}	Contrainte normale dans la zone de cisaillement secondaire
σ_{eq}	Contrainte équivalente de Von-Misès
σ_m	Moyenne arithmétique de la trace du tenseur de contraintes
$\dot{\sigma}, \dots, \sigma^{(n)}$	Dérivées de la contrainte par rapport au temps
τ_{OA}	Contrainte tangentielle dans la zone de cisaillement primaire
τ_{OB}	Contrainte tangentielle dans la zone de cisaillement secondaire
ϕ	Angle du cisaillement primaire
ω	Vitesse angulaire de la broche

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Exemples d'opérations de tournage	3
Figure I-2 : Processus de tournage	4
Figure I-3 : Conditions de coupe en tournage	5
Figure I-4 : Angles d'outil de coupe	7
Figure I-5 : Zones liées à la formation du copeau	8
Figure I-6 : Dissipation de la chaleur dans la zone de coupe	9
Figure I-7 : Distribution de la température dans la zone de coupe	10
Figure I-8 : Formes d'usure d'un outil de coupe	13
Figure I-9 : Evolution de l'usure en dépouille	15
Figure II-1 : Conditions aux limites Lagrangiennes et Eulériennes	20
Figure II-2 : Exemple de simulation avec le code Deform	21
Figure II-3 : Exemple de simulation avec le code Abaqus	22
Figure II-4 : Limitation des moyens d'essais mécaniques par rapport aux procédés de mise en forme	24
Figure II-5 : Schéma général du dispositif SHPB	24
Figure II-6 : Essai de Taylor	25
Figure II-7 : Séparation géométrique [11]	26
Figure III.1 : Représentation des grandeurs entrée/sortie du modèle d'Oxley modifié	29
Figure III-2 : Configuration de coupe orthogonale	31
Figure III-3 : Géométrie de l'outil	33
Figure III-4 : Géométrie de la pièce	33
Figure III-5 : Propriétés du matériau usiné	34
Figure III-6 : Paramètres du critère d'endommagement	34
Figure III-7 : Maillage de la pièce	35
Figure III-8 : Module interaction	35
Figure III-9 : Introduction du coefficient de frottement	35
Figure III-10 : Température dans la zone de coupe	36
Figure III-11 : Effort de coupe résultant	37
Figure III-12 : Composante F_t de l'effort de coupe	37

Figure III-13 : Composante F_f de l'effort de coupe	38
Figure III-14 : Température pour $\gamma = 0^\circ$	38
Figure III-15 : Température pour $\gamma = 5^\circ$	39
Figure III-16 : Effort de coupe résultant pour $\gamma = 5^\circ$	39
Figure III-17 : Température pour $\gamma = -5^\circ$ et $V_c = 200$ m/min	40
Figure III-18 : Effort de coupe pour $\gamma = -5^\circ$ et $V_c = 200$ m/min	40
Figure III-19 : Température pour $\gamma = -5^\circ$ et $V_c = 400$ m/min	41
Figure III-20 : Effort de coupe pour $\gamma = -5^\circ$ et $V_c = 400$ m/min	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1 : Conditions de coupe et propriétés rhéologiques du matériau usiné	30
Tableau III-2 : Propriétés mécaniques et thermiques du matériau usiné	30
Tableau III-3 : Résultats de simulation du modèle d'Oxley modifié [6]	30
Tableau III-4 : Grandeurs expérimentales [18]	30
Tableau III-5 : Calcul du coefficient de frottement	31
Tableau III-6 : Paramètres d'endommagement du matériau usiné [17]	34
Tableau III-7 : Choix des unités	36

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre I : Eléments associés à l'usinage	
I.1. Historique et définitions :	3
I.2. Processus de tournage :	4
I.3. Conditions de coupe en tournage :	4
1.3.1. Vitesse de coupe :	5
1.3.2. Avance ou vitesse d'avance :	5
1.3.3. Profondeur de coupe :	5
I.4. Outils de coupe en tournage :	6
I.5. Aspects thermiques liés à la zone de coupe :	8
1.5.1. Formation du copeau :	8
1.5.2. Sources de chaleur :	9
1.3.3. Température de coupe :	10
I.6. Aspects tribologiques liés à l'usinage :	11
1.6.1. Généralités sur la tribologie :	11
1.6.2. Formes d'usure des outils de coupe :	11
1.6.3. Critères de cessation de la fonction des outils de coupe :	14
I.6. Intégrité de surface :	16
1.7.1. Définition :	16
1.7.2. Etat de surface :	16
1.7.3. Contraintes résiduelles :	17
1.7.4. Microstructure :	17
Chapitre II : Simulation de la coupe par approche numérique	
II.1. Domaines de modélisation de la coupe :	18
II.1.1. Domaine statique :	18
II.1.2. Domaine quasi-statique :	18
II.1.3. Domaine dynamique :	18
II.2. Approches numériques pour la simulation de la coupe :	18
II.2.1. Méthodes des différences finies :	18
II.2.2. Méthodes des éléments finis :	19

II.2.3. Formulation Lagrangienne :	19
II.2.4. Formulation Eulérienne :	19
II.2.5. Formulation Lagrangienne-Eulérienne-Arbitraire :	20
II.3. Codes pour la simulation numérique :	20
II.4. Lois de comportement et critères d'endommagement :	23
II.4.1. Lois rhéologiques des matériaux usinés :	23
II.4.2. Critère de séparation du copeau :	26
II.4.3. Critère d'endommagement de Johnson-Cook :	27
II.5. Modélisation du contact outil-copeau :	27

Chapitre III : Résultats de simulation et interprétation

III.1. Modélisation analytique de la coupe :	29
III.2. Simulation numérique de la coupe :	31
III.2.1. Création des géométries de l'outil et de la pièce :	32
III.2.2. Propriétés des matériaux usinés et de coupe :	33
III.2.3. Maillage de la pièce :	34
III.2.4. Contact outil-copeau :	35
III.2.5. Unités dans Abaqus :	36
III.3. Résultats de simulation et interprétation :	36
Conclusion générale	43

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

La production est un élément fondamental de l'économie d'un pays. Parmi les différentes composantes de la production (conception, fabrication, contrôle, qualité, gestion des moyens et des ressources, maintenance, etc.), le procédé de mise en forme est le plus répandu.

Dans ce contexte, il existe différents procédés de mise en forme permettant d'obtenir ou de se rapprocher des dimensions finales voulues d'un produit fabriqué. Ils peuvent être divisés en trois grandes catégories : le moulage (mise en forme à l'état liquide), le forgeage (déformation plastique de la matière), et les procédés par enlèvement de matière (usinage). Lorsqu'on parle d'usinage, on fait référence à la technique de fabrication de pièces mécaniques où le principe étant d'enlever de la matière afin de donner à la pièce brute la forme voulue à l'aide d'un outil sur une machine-outil.

À ce jour, l'enlèvement de matière à l'outil coupant occupe toujours une place prédominante parmi les procédés de mise en forme des matériaux. L'accroissement de performances des machines-outils, des outils de coupe et des logiciels de CAO a œuvré à garder ce procédé compétitif grâce aux gains de productivité et de qualité qu'il offre. L'usinage des métaux est une technique de mise en forme par enlèvement de matière qui est très répandue du point de vue pratique mais pas encore maîtrisée du point de vue modélisation et simulation, c'est l'empirisme qui est largement utilisé. À cet effet, des méthodes analytiques et numériques ont été développées non pas dans l'objectif de remplacer les méthodes expérimentales mais d'aider à la compréhension des phénomènes rencontrés en usinage.

Dans la présente étude, nous nous intéressons à la simulation numérique d'une opération d'usinage en coupe orthogonale. Il s'agit d'une suite aux travaux déjà effectués au laboratoire des Technologies Industrielles en matière de modélisation analytique utilisant le modèle thermomécanique d'Oxley modifié.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les éléments associés à l'usinage tels que les différents procédés d'usinage traditionnels et non traditionnels, et les mouvements rencontrés lors d'une opération de tournage. Puis, nous avons défini les conditions de coupe : paramètres de coupe et angles d'outil. Aussi, nous avons évoqué les aspects thermiques liés à la zone de coupe, les aspects tribologiques et l'intégrité de surface.

Le second chapitre est réservé à la simulation de la coupe par approche numérique. À cet effet, nous avons évoqué les formulations Lagrangienne, Eulérienne et Lagrangien-Eulérienne Arbitraire utilisées pour la simulation de la coupe des métaux. Aussi, les codes rencontrés

pour la simulation de la coupe ont été relatés. Enfin, les lois de comportement et les critères d'endommagement ainsi que la modélisation du contact outil-copeau ont été présentés.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique de la coupe par le progiciel Abaqus. Il s'agit de l'usinage en coupe orthogonale de l'acier à 0,38 % de carbone (AISI 1045) ; les résultats de simulation sont confrontés à ceux obtenus par une modélisation analytique.

CHAPITRE I

Eléments associés à l'usinage

I.1. Historique et définitions :

L'usinage est la transformation d'une pièce brute, de matériau défini, en une pièce fonctionnelle de forme géométrique, de dimensions et d'état de surface spécifiés. Cette technique, dont on pourrait trouver les origines dans la pierre taillée, a connu un essor important au 19^{ème} siècle suite à l'apparition du moteur. L'électricité a permis de fournir l'énergie nécessaire au travail des métaux, là où la force musculaire se limitait principalement au bois. Le 20^{ème} siècle a vu l'essor de différentes techniques d'usinage jusqu'à aboutir aux machines à commande numérique et à l'usinage à grande vitesse.

L'usinage est un procédé d'élaboration de pièces mécaniques où un outil de coupe enlève de la matière à une pièce dans le but de générer une nouvelle surface. Il existe principalement deux types de configurations : la coupe orthogonale et la coupe oblique. Ces configurations sont appliquées aux procédés d'usinage qualifiés de traditionnels tels que le rabotage, le tournage, le fraisage, le perçage, etc. [1].

Parmi les procédés traditionnels, on distingue aussi les procédés par abrasion où l'enlèvement de matière est dû à l'action mécanique d'un grand nombre de grains abrasifs de petite taille et de haute dureté.

Aussi, les procédés physico-chimiques sont qualifiés de non traditionnels ; l'enlèvement de matière est réalisé (à l'exception de l'impact d'un jet d'eau) par des actions entre autres non mécaniques : thermoélectrique (électroérosion) et thermochimique (oxycoupage).

A titre indicatif, la figure qui suit montre des exemples d'opérations en tournage.



Figure I-1 : Exemples d'opérations en tournage [2].

I.2. Processus de tournage :

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique.

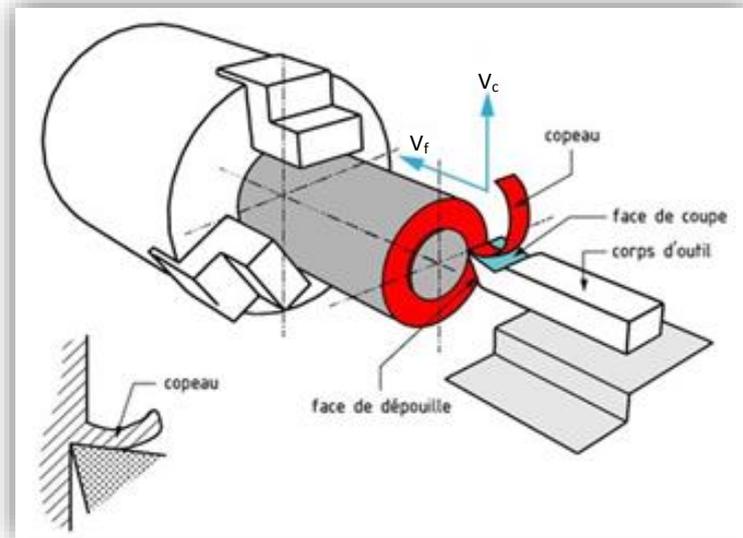


Figure I-2 : Processus de tournage.

La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe). L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

La combinaison de ces deux mouvements ainsi que la forme de la partie active de l'outil permettent d'obtenir des formes de révolution (cylindres, cônes, etc.) pour la pièce usinée, et l'interaction outil-matière donne naissance à un copeau.

Bien que la cinématique du procédé et les outils soient assez simples, ce procédé a fait l'objet d'une grande optimisation à cause de l'importance de ses applications. Cette optimisation a porté sur les machines-outils (tours CN), sur les outils (les vitesses de coupe industrielles ayant pratiquement été multipliées par 10 en 50 ans ...), sur les porte-pièces, sur le chargement/déchargement qui s'est automatisé ... et même sur les pièces dont les matériaux peuvent parfois être améliorés sur le plan de l'usinabilité. À titre indicatif, une opération de tournage qui prenait 100 min en 1900 avec un outil en acier rapide était réduite à 1 min en 1980 avec un outil en carbure revêtu [3].

I.3. Conditions de coupe en tournage :

Le mouvement de coupe anime la pièce (pièce tournante) d'une vitesse de coupe périphérique linéaire nommée « V_c ». Le mouvement d'avance est un mouvement de

translation longitudinale de l'outil par rapport à la pièce qui se fait à une avance « f » ou à une vitesse d'avance « V_f ».

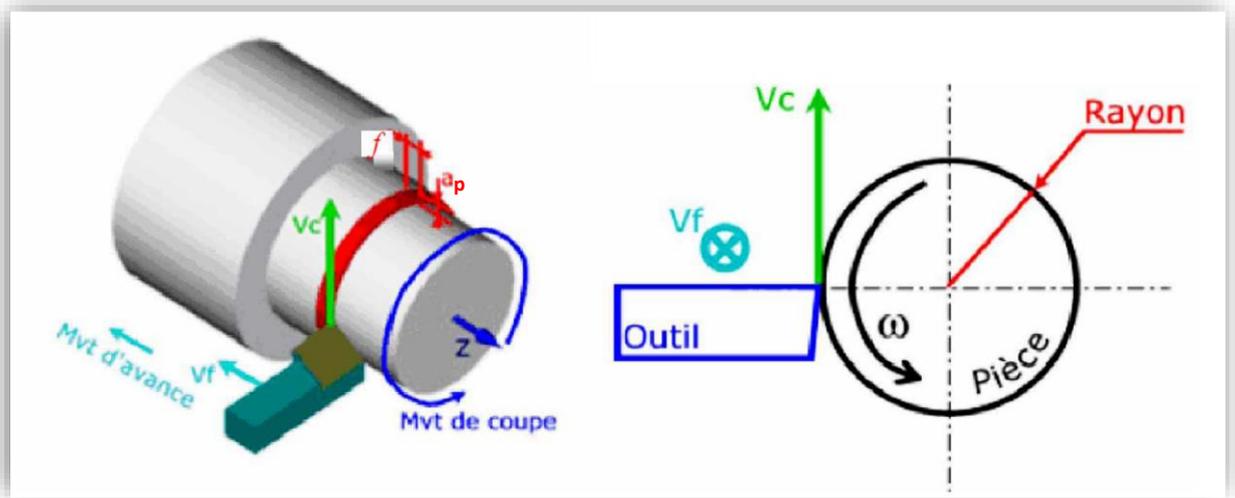


Figure I-3 : Conditions de coupe en tournage.

I.3.1. Vitesse de coupe :

Elle est mesurée en ($m \cdot min^{-1}$) ; son expression est la suivante :

$$V_c = \frac{D_i}{2 \times 1000} (60 \times \omega) = \frac{3 D_i \omega}{100} \quad (I-1)$$

Elle dépend de la vitesse angulaire « ω ($rad \cdot s^{-1}$) » de la pièce et de son diamètre « D_i (mm) ».

La vitesse angulaire est définie par rapport à la fréquence de rotation de la broche « N » mesurée en ($tr \cdot min^{-1}$) comme suit :

$$\omega = \frac{2 \pi N}{60} = \frac{\pi N}{30} \quad (I-2)$$

I.3.2. Avance ou vitesse d'avance :

L'avance est notée « f » et elle est mesurée en ($mm \cdot tr^{-1}$) ; c'est le déplacement de l'outil à chaque tour de la pièce ; aussi, la vitesse d'avance est exprimée selon :

$$V_f = f \cdot N \quad (I-3)$$

I.3.3. Profondeur de passe :

Elle est notée « a_p » ; elle est mesurée en (mm). Elle est égale à la différence des rayons avant et après usinage.

On rencontre deux approches pour le choix de ces paramètres de coupe [4] ; à savoir :

- La première donne une large place à l'expertise de l'entreprise en gérant une base de

données souvent volumineuse et acquise au cours du temps (des tables ou des abaques permettant d'obtenir rapidement les paramètres de coupe convenables).

- La deuxième fait appel à une modélisation du problème à partir de lois expérimentales en utilisant des tables de coefficients expérimentaux associés.

Pratiquement, un opérateur choisit les paramètres de coupe en considérant les contraintes liées au processus d'usinage. Le choix de la machine impose le respect d'une gamme de vitesses de coupe et d'avances et des limitations relatives à la puissance et au couple disponible à la broche et à la poussée admissible sur le chariot. Le choix d'une plaquette (outil) limite les efforts de coupe qui doivent rester inférieurs aux efforts admissibles par celle-ci.

En plus, le choix des conditions de coupe pour un matériau donné dépend du mode de travail (ébauche ou finition). Pour un travail d'ébauche, les principaux paramètres à considérer sont :

- la durée de vie de l'outil de coupe (temps effectif de coupe avec la même arête),
- les efforts de coupe (limites de puissance de la machine-outil).

Pour un travail de finition, on recherche la qualité dimensionnelle et géométrique de la surface usinée ; le principal paramètre à prendre en compte étant la rugosité de la surface usinée.

I.4. Outils de coupe en tournage :

Il existe une grande diversité d'outils de coupe ; toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons a priori sur un outil de coupe constitué d'un corps et d'une queue ; la partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe est appelée partie active. Cette dernière est limitée par trois faces : la face de coupe sur laquelle glisse le copeau, et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) sur lesquelles frottent les surfaces usinée et engendrée.

Trois angles des faces de l'outil de coupe, dont la somme est égale à 90° , sont nécessaires pour définir les caractéristiques géométriques d'un outil [6] ; à savoir :

- Angle de coupe (γ) : c'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence Pr (perpendiculaire à la direction d'usinage). L'angle de coupe affecte la capacité de l'outil à cisailer le matériau à usiner. Il peut être positif, négatif ou nul. Les angles de coupe positifs réduisent les efforts de coupe tandis que des angles de coupe négatifs apportent de la robustesse à l'arête de coupe de l'outil. Sa valeur se trouve généralement entre -5° et $+5^\circ$, quelque fois entre -10° et $+10^\circ$ et plus rarement entre -20° et $+20^\circ$.

- Angle de dépouille (α) : c'est l'angle entre la face de dépouille et la surface usinée. Sa valeur est nécessairement positive, généralement entre 2° et 10° .
- Angle de taillant (β) : c'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille.

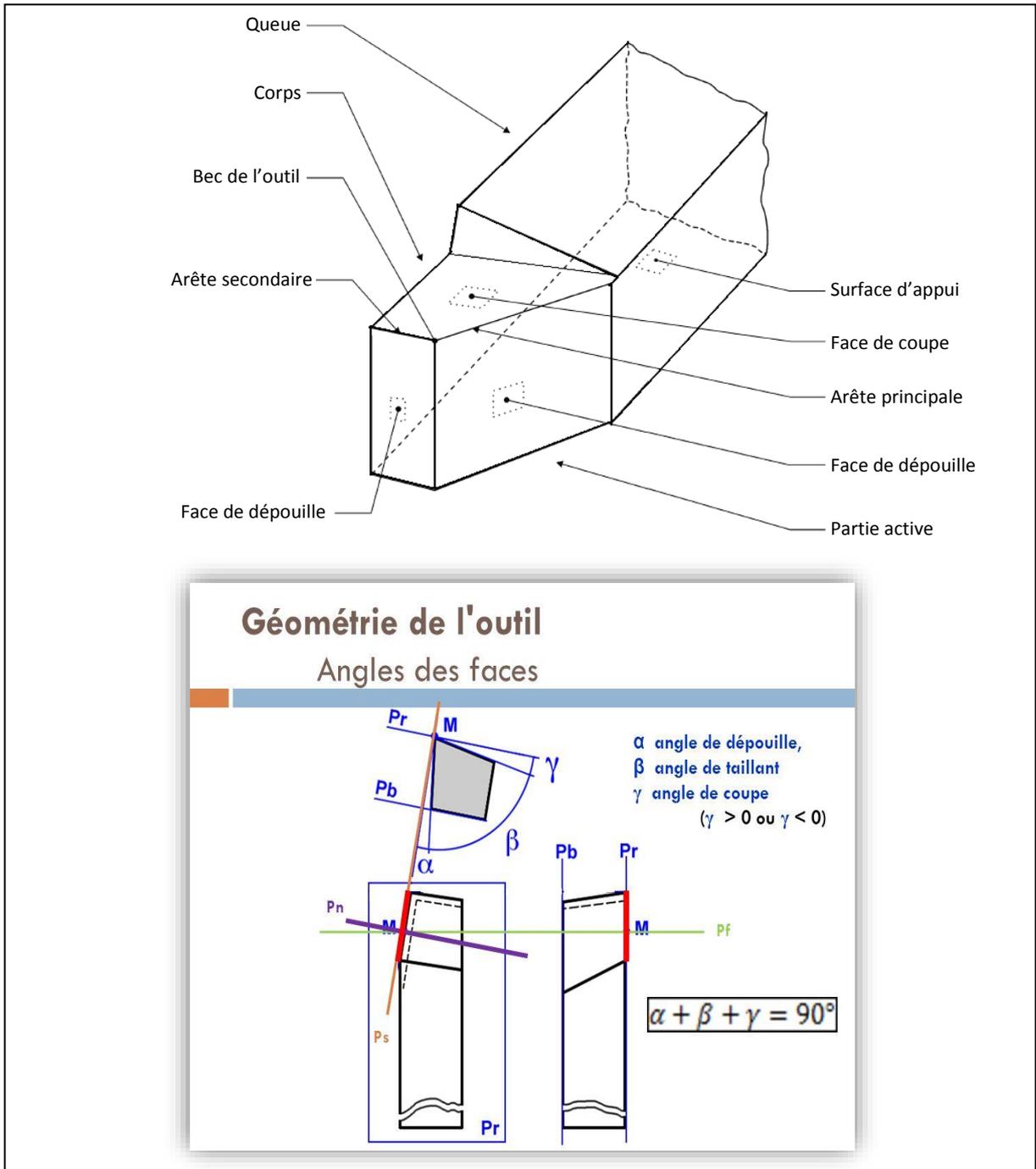


Figure I-4 : Angles d'outil de coupe.

Donc, usuellement la partie active de l'outil est définie par trois plans qui peuvent être raccordés par deux rayons : le rayon de bec (raccordement entre les faces de coupe et de dépouille au point M) et le rayon d'acuité de l'arête de coupe (raccordement entre les faces de coupe et de dépouille au niveau de l'arête principale).

I.5. Aspects thermiques liés à la zone de coupe :

I.5.1. Formation du copeau :

Trois principales zones se distinguent lors de la formation du copeau ; ce sont les zones de cisaillements primaire et secondaire et la zone de frottement tertiaire [7].

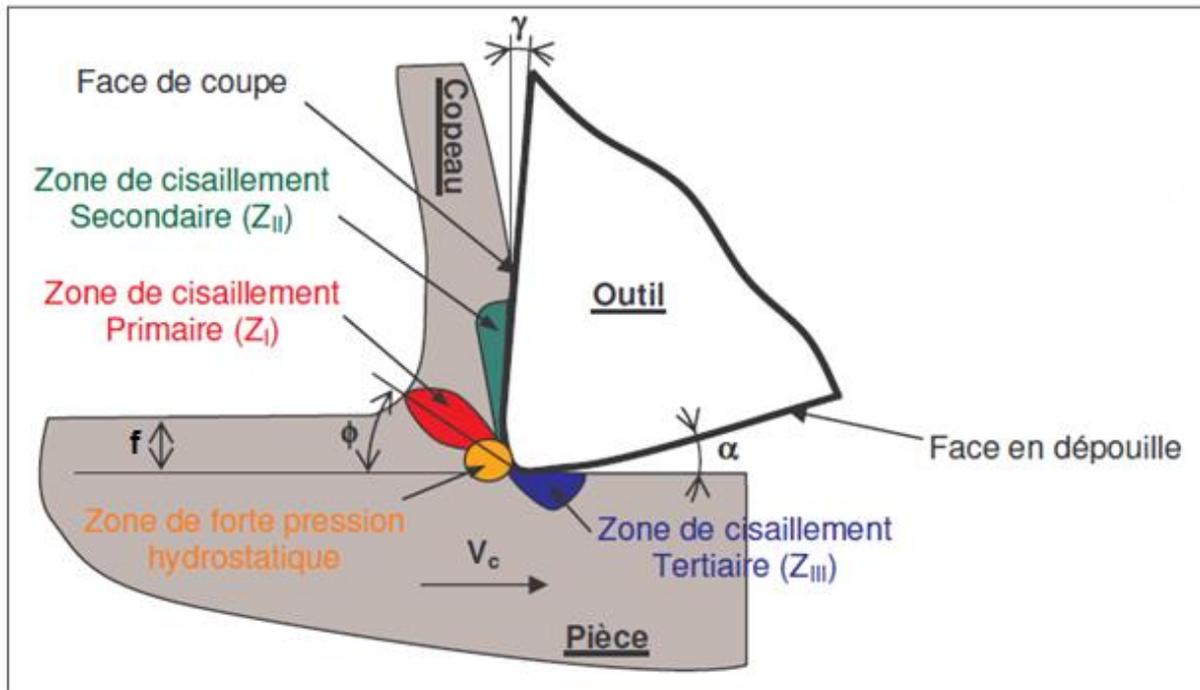


Figure I-5 : Zones liées à la formation du copeau.

- **Zone de cisaillement primaire :** Le changement de direction de la matière usinée s'effectue dans cette zone sous l'action de l'outil de coupe. La matière donne naissance au copeau lors de son passage dans cette zone où elle subit en un temps très court une importante déformation plastique. Une grande partie de l'énergie de déformation plastique est convertie en chaleur et va affecter directement la tenue de l'outil de coupe.

La quantité de chaleur produite dans cette zone va être partagée entre l'outil, le copeau et la surface usinée. Dans cette zone, les déformations et vitesses de déformation peuvent être respectivement supérieures à 200 % et 10^3 s^{-1} .

- **Zone de cisaillement secondaire :** Dans cette zone, il y a un important frottement entre l'outil et le copeau formé par les phénomènes intervenant dans la zone de cisaillement primaire. La matière est fortement cisailée au voisinage du contact outil-copeau, ainsi se crée une deuxième zone de déformation appelée zone de cisaillement secondaire. L'intense frottement entre le copeau et l'outil va générer une quantité importante de chaleur partagée entre l'outil et le copeau. Les phénomènes intervenant dans cette zone vont jouer un rôle

important sur le comportement de l'outil de coupe, et, par conséquent, sur sa durée de vie. Comme dans la zone de cisaillement primaire, la température et la vitesse de déformation sont beaucoup plus élevées.

• **Zone tertiaire :** Un frottement entre la face de dépouille de l'outil de coupe et la surface usinée est observé dans cette zone. Ce frottement va engendrer une production de chaleur partagée entre la surface usinée et l'outil de coupe. Les phénomènes intervenant dans cette zone sont déterminants pour l'analyse de l'état des surfaces usinées, en raison de la possible présence d'importantes contraintes résiduelles.

En résumé, les phénomènes thermomécaniques intervenant dans ces différentes zones vont affecter la tenue des outils de coupe et la qualité de la pièce usinée lors d'une opération d'usinage. C'est la raison pour laquelle les revêtements vont jouer un rôle protecteur de l'outil de coupe, et, par conséquent, augmenter leur durée de vie et améliorer l'état des surfaces usinées.

I.5.2. Sources de chaleur :

Durant l'usinage, la majorité de la puissance mécanique mise en œuvre se transforme en puissance thermique.

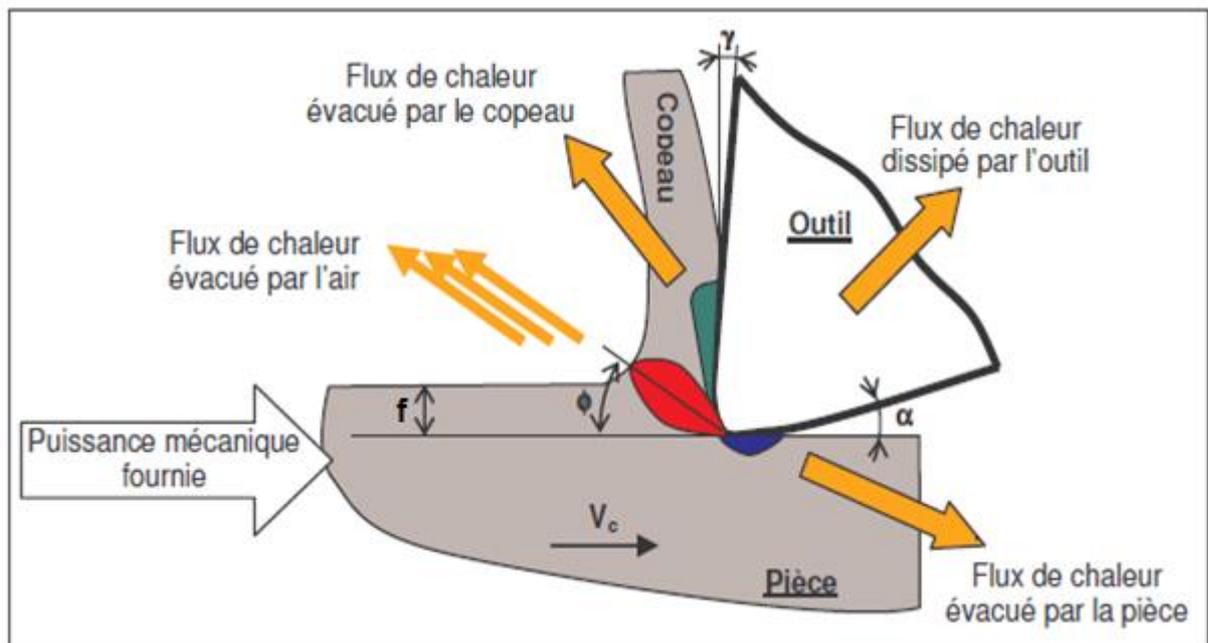


Figure I-6 : Dissipation de la chaleur dans la zone de coupe.

Les zones de cisaillements (primaire et secondaire) générées par la coupe ainsi que les frottements aux interfaces outil-pièce et outil-copeau sont le siège de production de chaleur. Comme le montre la figure qui suit, les flux de chaleur issus sont dissipés dans la pièce,

l'outil de coupe, le copeau, et une partie minime est évacuée par l'air ambiant [7]. Alors, l'élévation de la température lors d'un processus d'usinage est due à un effet conjugué des phénomènes de dissipation d'énergie dans les différentes zones de déformation plastique et des phénomènes de frottement. Dans la zone de cisaillement primaire, il s'agit bien de déformation plastique. Dans la zone de cisaillement secondaire, un effet combiné de déformation plastique et de frottement se présente. La zone tertiaire est le siège d'un frottement.

I.5.3. Température de coupe :

L'analyse de la 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.

Les zones de déformation et de frottement étant relativement restreintes, il en résulte d'importantes variations de température ($20\text{ °C} \div 1000\text{ °C}$). Le gradient de température, dans la zone de coupe peut atteindre des valeurs importantes ; dans ces conditions, il est délicat de connaître la distribution et la valeur de la température de coupe.

La figure qui suit donne, à titre indicatif, la distribution de la température dans la zone de coupe [8].

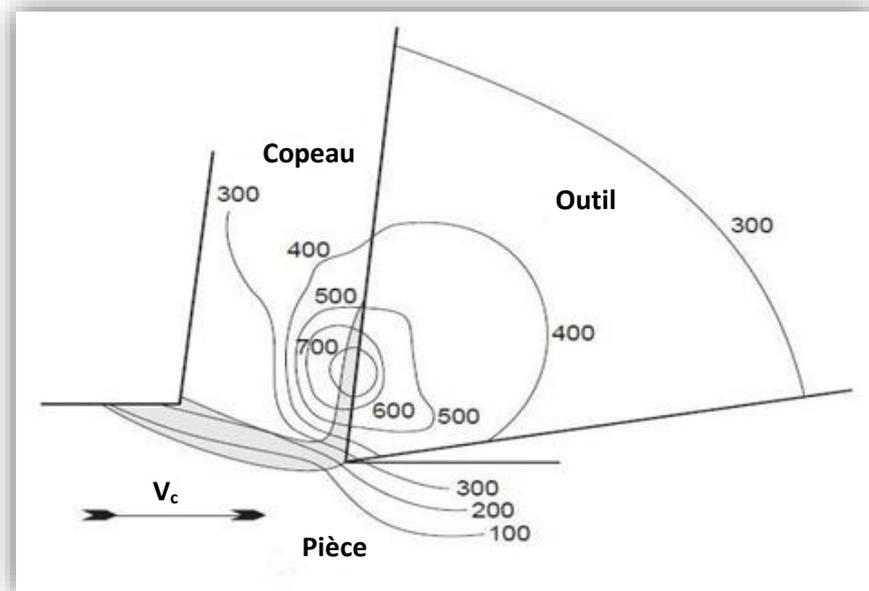


Figure I-7 : Distribution de la température dans la zone de coupe.

Nous remarquons que la valeur maximale de la température se situe dans la zone de cisaillement secondaire.

I.6. Aspects tribologiques liés à l'usinage :

1.6.1. Généralités sur la tribologie :

La tribologie est la branche de la mécanique qui étudie le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces en contact. Elle s'intéresse principalement aux corps solides ou à l'interaction entre un solide et un lubrifiant liquide (huile), onctueux (graisse) ou granulaire (poudre). Les trois aspects de la tribologie sont définis comme suit [9] :

- **Le frottement** : La force de frottement est une force de réaction, qui s'oppose toujours au mouvement relatif entre deux corps en contact.
- **L'usure** : Le travail effectué par les forces de frottement a un triple effet :
 - de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur ;
 - des déformations plastiques sont générées ;
 - des particules solides sont arrachées sur les surfaces de contact.

Dans les machines, la génération de la chaleur et les déformations plastiques sont responsables des pertes de rendement, tandis que l'arrachement progressif des particules à la surface des pièces est la cause de l'usure.

- **La lubrification** : permet de séparer les surfaces en contact par un film lubrifiant, et donc de limiter le frottement et l'usure.

En tribologie, l'état de surface des corps en contact possède une importance critique. En effet, la nature et les défauts des surfaces génèrent adhérence, abrasion, fatigue et érosion.

Lors d'un usinage, on peut constater que l'état de l'outil (forme géométrique, aspect métallurgique) est modifié par l'action des effets énergétiques (efforts de coupe), métallurgiques et thermiques (échauffements). Ces modifications qui augmentent progressivement avec la durée d'usinage (temps de coupe) sont couramment regroupées sous le terme : usure de l'outil de coupe.

1.6.2. Formes d'usure des outils de coupe :

L'usure d'un outil de coupe se manifeste sur sa partie active par des effets mécaniques, physico-chimiques et par diffusion [9].

- **Usure par effets mécaniques** : on retrouve les différentes formes d'usure qui suivent :
 - **Usure adhésive** : Il y a transfert de métal d'une surface à l'autre pendant leur mouvement relatif dû à un processus de soudure en phase solide (même avec un lubrifiant).

- Usure abrasive (à sec) : Le transfert de matière est produit par des particules ou des protubérances dures contenues dans les matériaux en contact.

- Usure érosive : Le mécanisme d'usure est le même que précédemment, seulement, les particules dures sont véhiculées par un fluide.

- Usure par fatigue : Les particules se détachent par la fatigue résultant d'une variation cyclique de contraintes.

➤ **Usure par effets physico-chimiques :**

- Corrosion due au contact de la matière avec de l'air ou du lubrifiant.

- Corrosion chimique au niveau des molécules.

- Corrosion électrochimique au niveau des ions ; on observe un transfert des particules de l'outil dans le copeau.

➤ **Usure par diffusion :** Elle n'apparaît qu'à une certaine vitesse, donc à une certaine température.

L'observation macroscopique de la partie active de l'outil fait apparaître différentes formes d'usure qui se résument comme suit :

✓ **Usure en cratère :** Elle s'observe sur la face d'attaque de l'outil sous la forme d'une cuvette obtenue par frottement intense du copeau.

Cette forme d'usure, symbolisée par (KT), se manifeste principalement lors des travaux d'ébauche à faible vitesse de coupe et à forte avance sur des matériaux abrasifs.

L'effort très important exercé par le copeau sur la face d'attaque entraîne des pressions également très importantes qui créent, avec le mouvement relatif outil-copeau, des températures élevées favorables à l'usure par diffusion. Elle se rencontre plus fréquemment sur les outils en carbure métallique et en céramique qui offrent une structure plus favorable que les outils en acier rapide.

✓ **Usure en dépouille :** Elle s'observe sur la face en dépouille principale de l'outil, et elle est symbolisée par (VB). Elle apparaît suivant une bande striée brillante et parallèle à l'arête de coupe.

Cette déformation se traduit par un affaissement plastique de la pointe de l'outil et un renflement sur les faces en contre dépouille. Il s'en suit une modification importante de la géométrie de la pointe de l'outil qui nuit à la précision et à l'état de la surface usinée. Elle se manifeste lors des travaux de finition à forte vitesse de coupe et à faible avance. Elle est due conjointement aux températures élevées qui se produisent le long de l'arête de coupe et au frottement continu de la surface de la pièce sur la face en dépouille. Sur le plan pratique, cette

forme d'usure est la plus importante puisqu'elle conditionne simultanément l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle.

✓ **Usure par effondrement d'arête :** Cette forme d'usure se manifeste surtout sur des outils en acier rapide et, plus généralement, lorsque la vitesse de coupe est trop importante.

Egalement, l'usure par effondrement d'arête se produit lorsque la dureté du matériau à usiner est supérieure à celle de l'outil ou la structure du matériau à usiner n'est pas homogène et contient des particules dures.

✓ **Usure en entaille :** Elle s'observe le long de l'arête de coupe ; elle est due à un écrouissage local, et elle se manifeste par une entaille qui provoque un affaiblissement du bec de l'outil qui peut aller jusqu'à la rupture.

✓ **Usure par fissuration :** Cette forme d'usure est causée par un choc thermique. On peut observer ce type d'accident sur les outils en carbures métalliques soumis à un travail de coupe lubrifié par intermittence.

La figure qui suit reporte les différentes formes d'usure évoquées ci-dessus.

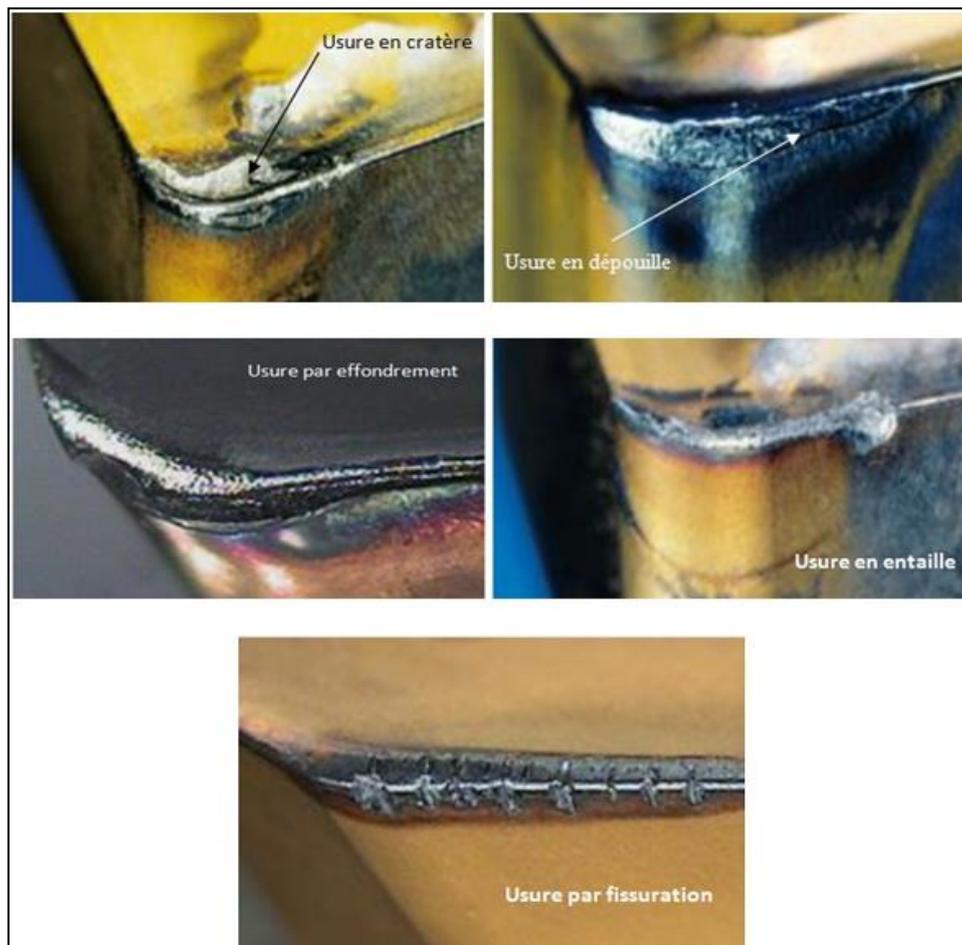


Figure I-8 : Formes d'usure d'un outil de coupe.

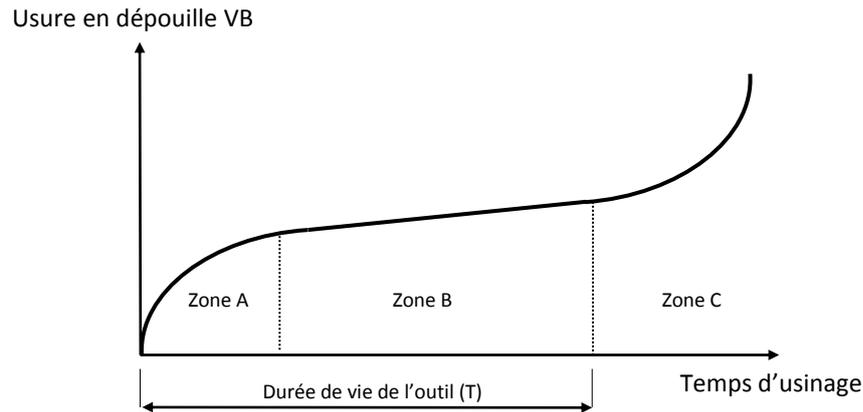


Figure I-9 : Evolution de l'usure en dépouille.

Cette évolution est caractérisée par les trois zones suivantes :

- zone A : usure rapide, phase d'adaptation de la plaquette,
- zone B : évolution lente et régulière, phase de stabilisation,
- zone C : usure accélérée conduisant à l'effondrement de la plaquette.

Nous remarquons que la durée de vie de l'outil correspond à la fin de la phase de stabilisation.

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus d'usinage. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification) ; à savoir :

- **Le matériau usiné** : Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, ...), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (pourcentage de certains éléments d'addition).

- **La vitesse de coupe** : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure.

- **L'avance** : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, ce qui diminue la durée de vie de l'outil.

- **La profondeur de passe** : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure.

- **La lubrification** : Son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement aux contacts outil-copeau et outil-pièce, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil.

Le second groupe est formé par les paramètres physiques et mécaniques de l'outil (géométrie et composition du matériau de l'outil, dureté et propriétés thermiques).

I.7. Intégrité de la surface :

1.7.1. Définition :

De façon générale, l'intégrité d'une surface est un ensemble de caractéristiques permettant de qualifier une surface vis-à-vis d'une application donnée. L'intégrité d'une surface regroupe ainsi un grand nombre de spécifications en fonction des domaines :

- Métallurgiques (résistance à la corrosion),
- Mécaniques (supporter les chargements mécaniques),
- Thermiques (conductivité ou résistance thermique),
- Tribologiques (frottement, adhésion, ...),
- Optiques (apparence, réflexion, ...),
- Écoulement fluides (couches limites, ...).

L'intégrité de surface est décrite principalement par trois paramètres [4] :

- paramètre géométrique : la rugosité (ou l'état de surface) ;
- paramètre mécanique : les contraintes résiduelles ;
- paramètre métallurgique : la microstructure.

1.7.2 Etat de surface :

D'après la norme ISO 4287, un profil d'état de surface sera décomposé en écarts géométriques de 4 ordres [4] :

- ordre 1 : écarts de forme ;
- ordre 2 : écarts d'ondulation ;
- ordre 3 : écarts de rugosité périodique (stries, sillons) ;
- ordre 4 : écarts de rugosité apériodiques (arrachements, fentes, piqûres).

Il existe plusieurs critères pour qualifier l'état de surface d'une pièce, et, en particulier, sa rugosité. La plupart d'entre eux sont définis dans trois normes internationales : les normes ISO 12085, ISO 4287 et ISO 13565.

L'état de surface en usinage est influencé par plusieurs effets [4] ; à savoir :

- la nature et les caractéristiques du matériau usiné.
- la valeur de l'avance et la géométrie de la pointe de l'outil.
- la valeur de vitesse de coupe et la lubrification.
- les vibrations du système pièce-outil-machine.

1.7.3 Contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles dans une structure sont les contraintes qui existent en l'absence de toute sollicitation extérieure. Les processus de fabrication sont souvent à l'origine de contraintes résiduelles. Les effets de ces contraintes peuvent s'ajouter ou se retrancher aux contraintes de service selon leur amplitude, leur signe et leur répartition. Les effets de ces contraintes sont souvent préjudiciables. Elles constituent alors un facteur d'endommagement et de mauvaise tenue en fatigue des pièces. Ainsi, la grandeur et la distribution de ces contraintes doivent être mesurées ou prédites.

Aussi, l'analyse des contraintes résiduelles s'avère une étape indispensable pour la conception de pièces et l'estimation de leurs durées de vie dans les conditions réelles de service. Donc, des efforts considérables sont encore nécessaires pour développer des méthodes efficaces et fiables pour mesurer et analyser les contraintes résiduelles ainsi que des techniques capables de redistribuer de manière optimale et bénéfique les contraintes résiduelles.

1.7.4 Microstructure :

De fortes déformations et des températures élevées sont induites par l'usinage. Ainsi, nous pouvons facilement imaginer que l'usinage, hormis son principal but qui est l'enlèvement de matière, peut être assimilé à un traitement thermique [5]. En général, ces traitements modifient les paramètres de la microstructure d'un alliage métallique, soit :

- les phases en présence, leur proportion et l'arrangement de ces phases ;
- les grains des différentes phases, l'arrangement à l'intérieur du grain, leurs tailles ;
- l'écrouissage, la dureté micro et macro ;
- la présence d'une couche déformée et son épaisseur.

CHAPITRE II

Simulation de la coupe par approche numérique

II.1. Domaines de modélisation de la coupe :

II.1.1. Domaine statique :

Dans ce domaine, la modélisation ne tient pas compte du paramètre temporel, ni de l'accélération du système ou de la position angulaire de l'outil. En effet, la section de coupe varie au cours du temps et les efforts de coupe évoluent en fonction de l'épaisseur de matière, elle-même dépendante de la position angulaire de l'arête considérée. La modélisation dans le domaine statique pourrait, par conséquent, être utilisée en tournage où la section est constante lors de la coupe mais pas dans le cadre du fraisage.

II.1.2. Domaine quasi-statique :

Les modélisations réalisées dans ce domaine permettent la prise en compte de la section réelle du copeau (en première approximation). Elles s'accompagnent d'hypothèses de rigidité faites pour l'outil et la pièce, n'intègrent pas l'environnement machine et ne permettent donc pas la prise en compte du comportement vibratoire du système pièce-outil-machine.

II.1.3. Domaine dynamique :

Les modélisations réalisées dans ce domaine permettent d'effectuer le calcul des efforts de coupe en considérant des incréments de temps très rapprochés et en prenant en compte la masse, l'accélération et l'amortissement du système pièce-outil-machine. Ces approches nécessitent donc la caractérisation complète du système pièce-outil-machine dans le domaine fréquentiel. Leurs applications portent essentiellement sur la définition du comportement vibratoire du système pièce-outil-machine clairement identifié et l'établissement de cartes de stabilité.

II.2. Approches numériques pour la simulation de la coupe :

Avec le développement des moyens de calcul informatiques, de nombreuses méthodes discrètes sont apparues (différences finies, volumes finis ou éléments finis) utilisant une formulation Lagrangienne, Eulérienne ou Lagrangienne Eulérienne Arbitraire [10].

II.2.1. Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies a été appliquée par Gilormini à la coupe orthogonale pour mieux appréhender les phénomènes de coupe. Les outils numériques discrets permettent de détailler l'écoulement du copeau, les répartitions des contraintes et les températures de coupe. Malheureusement, les coûts en temps de calcul sont prohibitifs pour mener des études paramétriques. La nécessité de connaître une géométrie initiale du copeau et de donner des

conditions de contact à l'interface outil/copeau, constituent l'inconvénient majeur de cette méthode. Par ailleurs, le calcul des contraintes n'est pas toujours très réaliste puisque souvent la condition de contrainte nulle aux surfaces libres n'est pas respectée.

II.2.2. Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est très largement utilisée, notamment dans la coupe. Dans ce domaine Tay et al. ont beaucoup apporté à la modélisation des distributions de température dans le copeau et dans l'outil grâce aux éléments finis. Ils ont d'ailleurs proposé une méthode pour calculer la cartographie des températures dans la coupe à partir des seules données expérimentales qui sont l'effort de coupe, l'angle de coupe et l'angle de cisaillement.

Lin et al. ont utilisé les éléments finis pour proposer une modélisation thermo-élasto-plastique de la coupe orthogonale. Ils déduisent les déformations, les vitesses de déformation, les contraintes et les températures en chaque nœud des éléments. Le fait de supposer que la géométrie du copeau soit connue initialement constitue l'inconvénient majeur de ce modèle.

II.2.3. Formulation Lagrangienne :

La description Lagrangienne étudie le mouvement d'une quantité de matière se déplaçant dans la matière. Le système de référence ici est attaché à la matière, il est appelé système de référence matériel. Dans ce cas, les résultats obtenus sont les évolutions des propriétés de la particule ou de la quantité de matière au cours de son déplacement.

Un avantage de cette formulation est qu'un élément contient toujours les mêmes particules, et de ce fait, elles sont donc entraînées par la déformation. Par exemple, un nœud se situant à la limite du corps étudié ou de la pièce reste sur cette limite au cours de la simulation, et, dans ce cas, le suivi des bords de la pièce ne présente pas de difficultés durant l'étude. Seulement, lors d'un essai entraînant de grandes déformations, le maillage de la pièce peut se retrouver très fortement distordu et entraîner une imprécision des résultats ou encore conduire à des erreurs de calcul.

II.2.4. Formulation Eulérienne :

Le système associé à une description Eulérienne est fixé à l'espace, il est appelé système de référence spatial. Elle étudie le passage d'une certaine quantité de matière à travers une région donnée de l'espace.

La formulation Eulérienne impose un maillage fixe dans l'espace. Ce maillage définit un volume invariable au cours de l'étude, et une particule matérielle peut migrer d'un élément vers un autre voire même quitter le domaine défini initialement. La formulation Eulérienne limite beaucoup les résultats de l'étude mais autorise d'importantes distorsions de la matière.

II.2.5. Formulation Lagrangienne- Eulérienne-Arbitraire :

Après la présentation de la méthode Lagrangienne et Eulérienne, une question apparaît naturellement : comment peut-on décrire, par exemple, l'écoulement d'un fluide dans une structure mobile et/ou déformable ?

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 [11].

Cette situation est illustrée par le schéma de la figure qui suit.

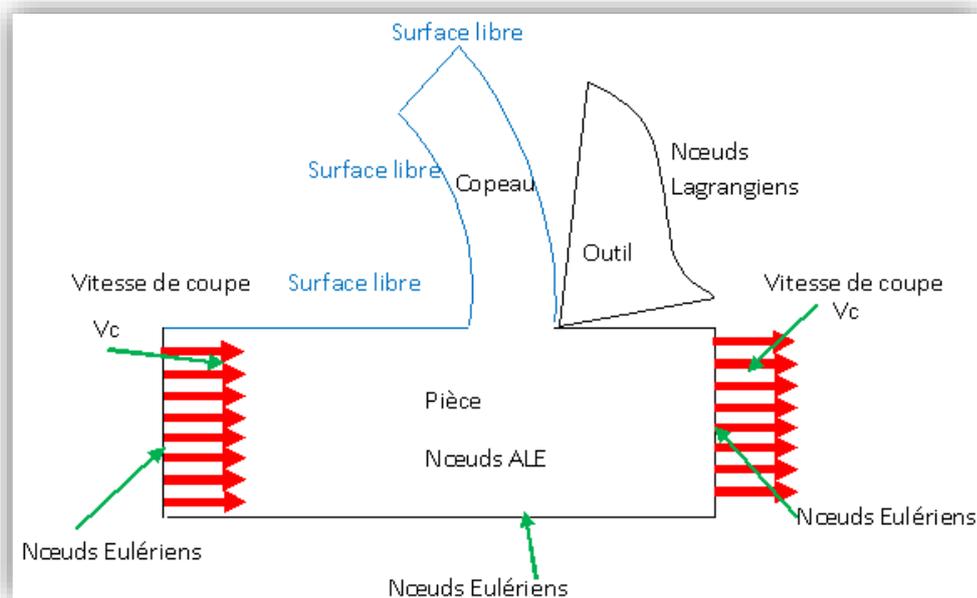


Figure II-1 : Conditions aux limites Lagrangiennes et Eulériennes.

II.3. Codes pour la simulation numérique :

L'utilisation de la simulation numérique est un moyen efficace pour étudier les procédés de

coupe. Les moyens numériques permettent un gain économique en comparaison aux coûts d'essais expérimentaux qui sont souvent élevés. Les simulations numériques demandent des moyens informatiques plus importants lorsqu'elles sont réalisées en 3D en comparaison à celles faites dans une configuration 2D. À cet effet, il existe divers codes commerciaux (DEFORM, ABAQUS, LS-DYNA, THIRDWAVE PRODUCTADVANTEDGE ...) disposés pour la simulation numérique des procédés d'usinage [12].

La plus part d'entre eux utilisent la méthode des éléments finis qui est une méthode fréquemment utilisée pour la modélisation des procédés d'usinage. Certains logiciels (comme DEFORM) possèdent des modules dédiés à des procédés de coupe tandis que d'autres (tel qu'ABAQUS) sont plutôt généralistes.

L'inconvénient avec une mise en données simplifiée est quel utilisateur n'a pas la main mise sur celle-ci, et certaines grandeurs telles que le coefficient de partage de chaleur issue du frottement outil-copeau échappe au contrôle de celui-ci. Aussi, deux d'entre les codes faisant partie des plus utilisés en usinage : DEFORM et ABAQUS.

✓ **DEFORM**, basé sur la méthode des éléments finis, peut être utilisé pour modéliser les différents processus de fabrication tels que le forgeage et l'usinage (tournage, fraisage, etc.).

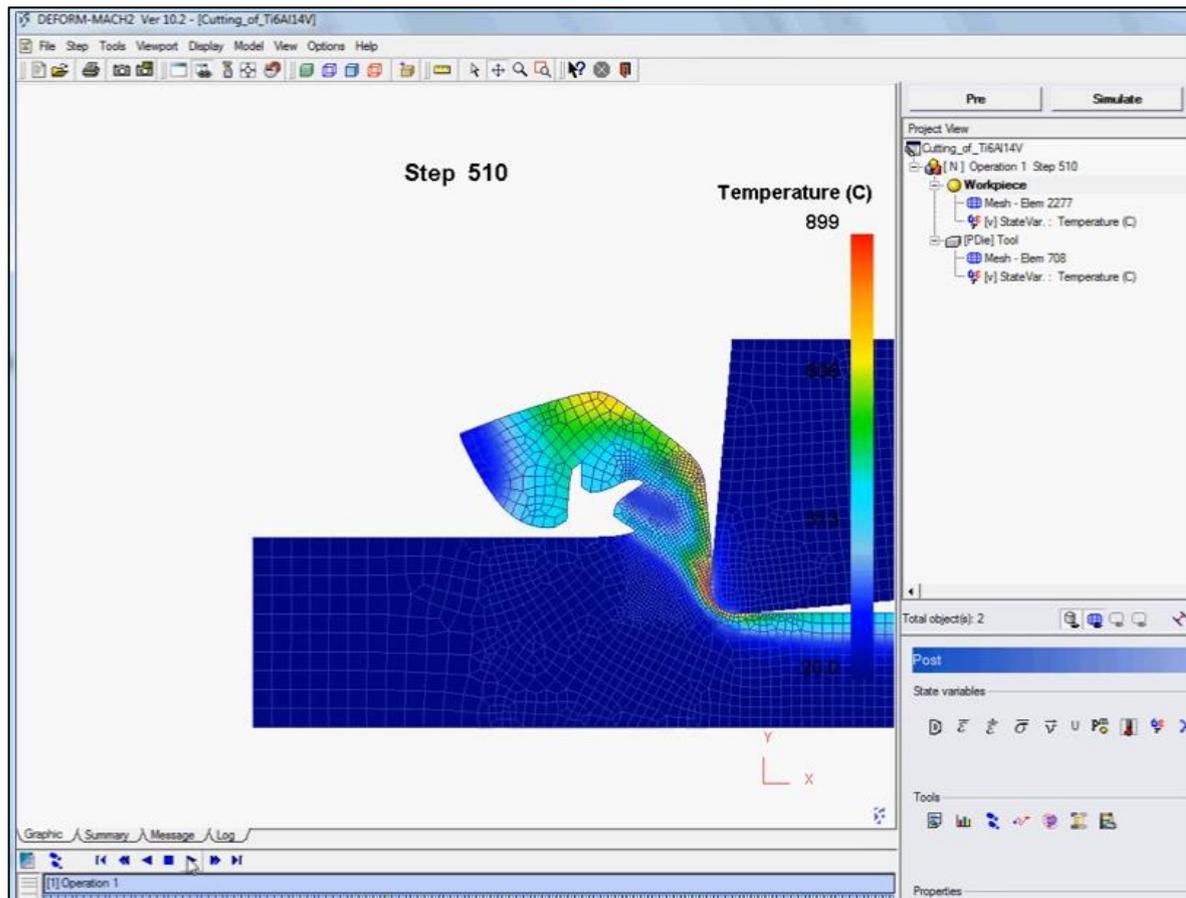


Figure II-2 : Exemple de simulation avec le code Deform.

D'abord, les géométries correspondantes à l'outil et la pièce et les conditions de coupe sont fournis par l'utilisateur. De plus, des variables sont permis à s'introduire tels que la taille des mailles, les conditions aux limites, les conditions inter-faciales.

Le programme est muni d'une librairie riche de données concernant les propriétés des matériaux usinés et ceux de coupe ; aussi, de nouveaux matériaux peuvent être introduits [13]. DEFORM® est un logiciel d'ingénierie qui permet aux concepteurs d'analyser les processus de formage des métaux, de traitement thermique, d'usinage et d'assemblage mécanique sur l'ordinateur plutôt que dans l'atelier par essais. La simulation de processus à l'aide de DEFORM contribue à la réduction des coûts, à l'amélioration de la qualité du produit et de la livraison dans les entreprises leaders. Les pressions concurrentielles actuelles obligent les entreprises à tirer parti de tous les outils à leur disposition. DEFORM s'est révélé extrêmement efficace dans de nombreuses applications de recherche et industrielles. C'est la firme Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC) qui développe et supporte DEFORM. Aussi, SFTC est disponible pour des projets de conseil, de formation, et de développement de logiciels. SFTC a acquis DEFORM® auprès de Battelle en 1991 et gère actuellement des centaines de sites utilisateurs dans le monde entier [14].

✓ **ABAQUS** : est un programme d'analyse basé sur la méthode des éléments finis qui peut être exploité dans différents problèmes de la coupe des métaux.

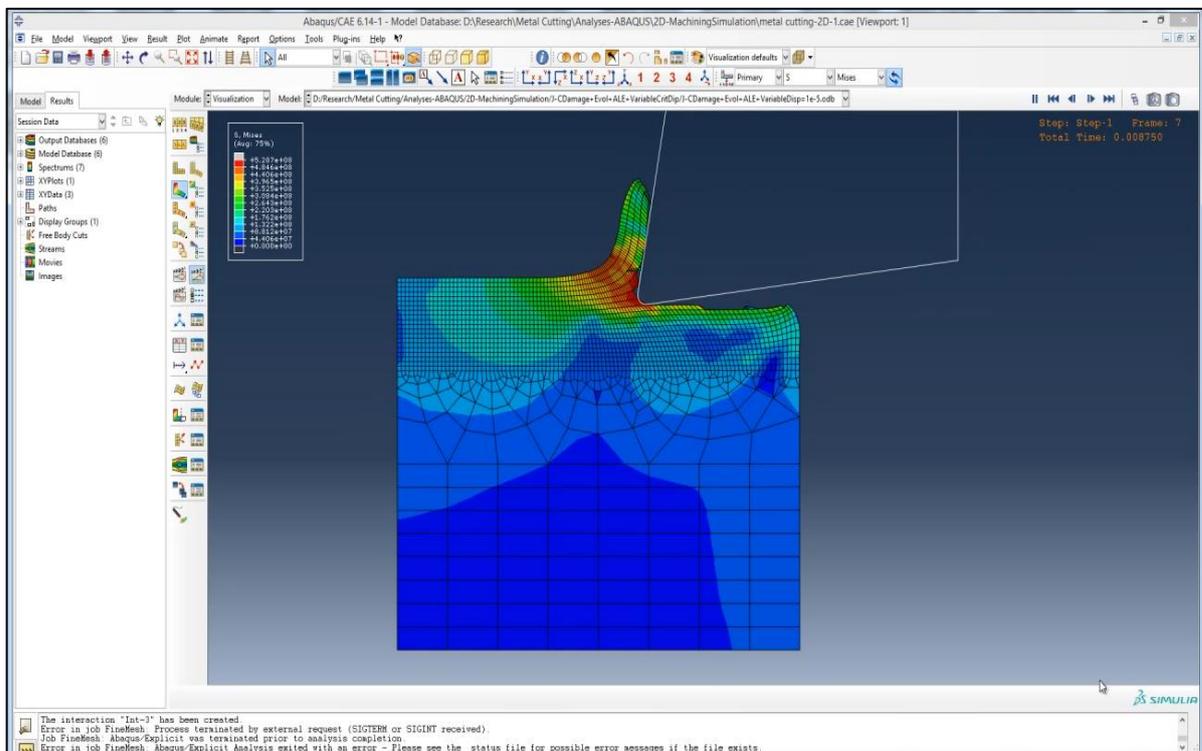


Figure II-3 : Exemple de simulation avec le code Abaqus.

L'utilisateur doit définir la géométrie de la pièce et de l'outil, les conditions de coupe, la

technique de résolution, les conditions aux frontières et la taille des mailles. Ce programme n'a pas de librairie de données. L'avantage du choix de ce programme est la modélisation d'un système avec un niveau élevé de détails.

ABAQUS est un progiciel développé par ABAQUS Inc (Dassault Systèmes) [15]. En 2005, ABAQUS, Inc a été acquis par Dassault Systèmes et est devenue SIMULIA. Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- Le solveur ABAQUS/Explicit emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non linéaires.
- ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie ; il est également très populaire dans les milieux universitaires pour la recherche et l'éducation.

II.4. Lois de comportement et critères d'endommagement :

II.4.1 Lois rhéologiques des matériaux usinés :

Ce sont des lois empiriques qui visent à modéliser le comportement d'un matériau lors de sa déformation. Ces lois peuvent être classées en deux catégories [16] :

- lois de comportement phénoménologiques basées sur des relations mathématiques empiriques sans tenir compte de l'origine des mécanismes physiques ;
- lois de comportement physiques qui reposent sur l'introduction de paramètres physiques comme la taille de grain, la densité de dislocations, etc.

En coupe, l'identification des lois rhéologiques est très difficile car elle doit être représentative du comportement du matériau en grandes déformations et en grandes vitesses de déformation et aussi en présence de températures élevées.

L'usinage est un procédé thermomécanique qui, comparé aux autres procédés de transformation des métaux et alliages, est indiscutablement le plus difficile à modéliser tout d'abord parce qu'il implique de grandes déformations, des taux de déformation très élevés (jusqu'à 10^6 s^{-1}) et des températures également très élevées, et ensuite parce que les méthodes d'essais mécaniques courantes ne permettent pas d'atteindre les valeurs des vitesses de

déformation rencontrées en usinage. La figure qui suit montre la limitation des moyens d'essais mécaniques par rapport aux procédés de mise en forme.

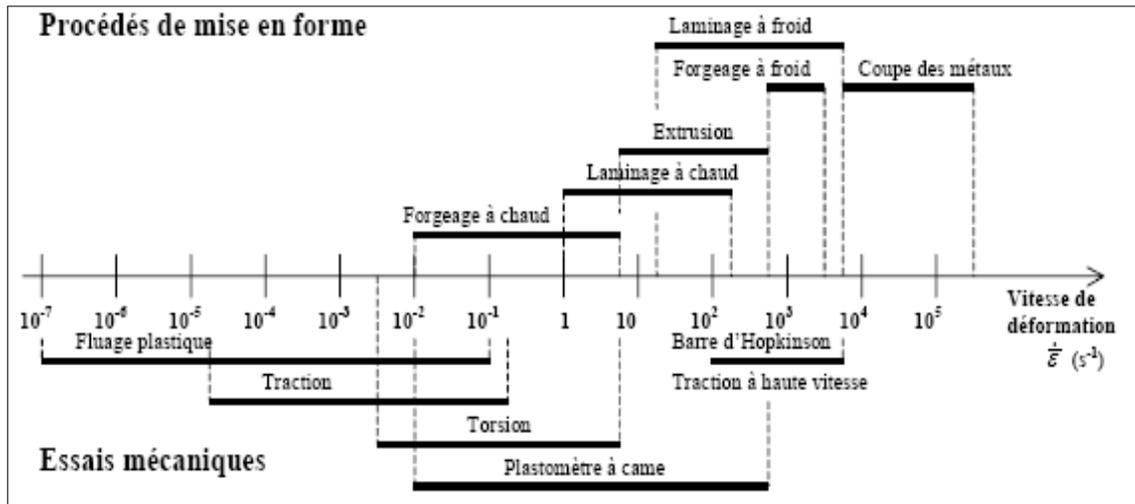


Figure II-4 : Limitation des moyens d'essais mécaniques par rapport aux procédés de mise en forme.

Dans le cas de la coupe, les essais classiquement privilégiés sont de type barres de Hopkinson. L'essai classique à barres de Hopkinson consiste en la mise en compression d'une éprouvette entre un massif et une seule barre (guidée) destinée à véhiculer l'onde de compression longitudinale induite par le choc d'un projectile à l'extrémité libre de la barre. Le dispositif SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) utilise deux barres guidées. Ces barres permettent d'appliquer sur un échantillon du matériau utilisé des déformations et des vitesses de déformation qui sont généralement inférieures à celles rencontrées pendant l'usinage. Cette situation est illustrée par la figure qui suit.

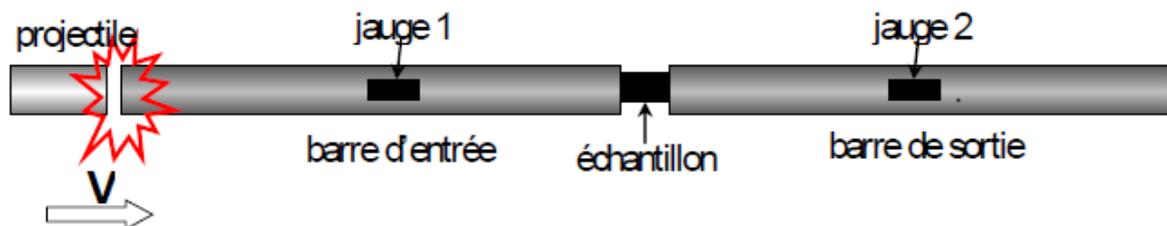


Figure II-5 : Schéma général du dispositif SHPB.

Les essais par le dispositif SHPB ne permettent d'atteindre que des vitesses de déformation de l'ordre de $10^3 \div 10^4$ s⁻¹. Ils ne permettent donc pas d'atteindre les vitesses de déformation rencontrées lors de la coupe grande vitesse ($10^4 \div 10^6$ s⁻¹).

L'essai de Taylor (projection directe de l'éprouvette sur un massif rigide) permet d'atteindre des déformations très importantes ($\epsilon > 3$) et des vitesses de déformations ($> 10^5$ s⁻¹). Néanmoins, la mise en œuvre de ces essais et leur dépouillement représentent souvent de grosses difficultés expérimentales et nécessitent l'utilisation de méthodes inverses à l'aide

d'un modèle numérique correspondant [16].

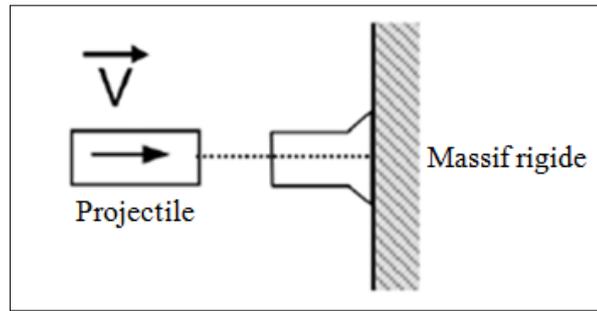


Figure II-6 : Essai de Taylor.

Dans la présente étude, nous allons nous contenter des lois de comportement phénoménologiques ; à savoir : la loi de Norton-Hoff et la loi de Johnson-Cook. Ces lois sont les plus utilisées pour caractériser la rhéologie du matériau en usinage. Ces lois obéissent à l'expression générale :

$$\sigma = f(\dot{\sigma}, \ddot{\sigma}, \dots, \sigma^{(n)}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \ddot{\varepsilon}, \dots, \varepsilon^{(n)}, t, T) \tag{II-1}$$

Dans la présente étude, nous allons nous contenter à la loi de comportement phénoménologique de Johnson-Cook. Le plus gros avantage de cette loi est sa simplicité car elle présente la particularité de pouvoir identifier séparément les termes en déformation, vitesse de déformation et température ; cette loi est exprimée par :

$$\sigma = \underbrace{[A + B\varepsilon^n]}_1 \underbrace{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]}_2 \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{fus} - T_0} \right)^m \right]}_3 \tag{II-2}$$

Le terme 1 traduit la sensibilité de la contrainte à la déformation ainsi que l'effet du phénomène d'écroutissage à travers la puissance.

La dépendance à la vitesse de déformation, donc le caractère visqueux, est soulignée par le **terme 2**.

Enfin, la dépendance à la température se retrouve dans le **terme 3** qui traduit l'adoucissement thermique, c'est-à-dire l'influence de la température sur les propriétés structurales de la matière et donc sur son écoulement.

Les matériaux obéissant à loi de Johnson-Cook sont :

- les aciers ;
- les alliages de titane, et d'aluminium.

Les paramètres de la loi de Johnson-Cook pour différents métaux sont identifiés lors d'expériences menées sur des barres de Hopkinson. Aussi, l'approche inverse peut être

utilisée ; pour cette dernière, les efforts de coupe et l'épaisseur du copeau sont des données d'entrée. L'état de contrainte-déformation-vitesse de déformation-température est une donnée de sortie. Donc, à une condition de coupe donnée est associée à un point dans l'espace contrainte-déformation-vitesse de déformation-température. À partir de ces points calculés, il est alors possible de rechercher les inconnues que sont les constantes du modèle Johnson-Cook.

II.4.2. Critère de séparation du copeau :

Pendant l'usinage, des copeaux continus, discontinus, segmentés peuvent avoir lieu. Deux méthodes, dans le cas de la simulation numérique, sont utilisées pour aboutir à une formation réelle du copeau. La première consiste à définir le critère de séparation du copeau le long d'une ligne prédéfinie et la seconde est d'utiliser un remaillage continu basé sur une déformation plastique large. Un nombre de critères de séparation géométrique et physique peut être groupés. Selon le critère de séparation purement géométrique, la séparation du copeau commence lorsque l'outil de coupe s'approche légèrement d'un nœud le long d'une ligne de partition avec une distance critique ; ce processus peut être montré sur la figure qui suit.

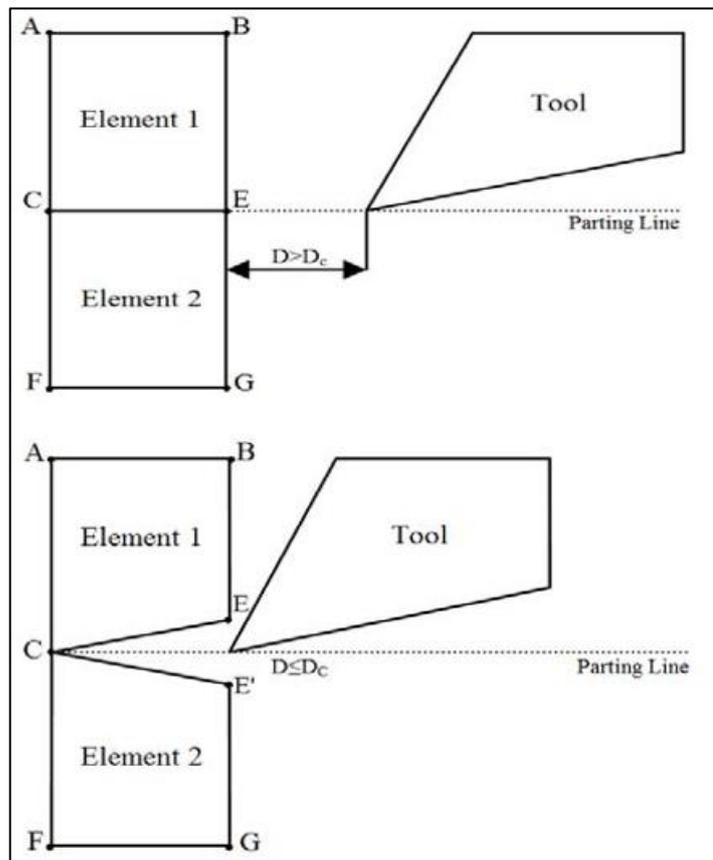


Figure II-7 : Séparation géométrique [11].

Quand la distance D entre l'outil et le nœud E devient égal ou bien inférieur à une distance critique D_c la connectivité de l'élément 2 change, et un nouveau nœud E' a lieu dans cet élément. Le nœud E translate le long de EB et E' translate au-dessous par une petite distance le long de E'G.

Ce critère est juste basé sur des considérations purement géométriques et la distance critique est choisie arbitrairement, de ce fait le mécanisme de formation du copeau réel n'est pas assuré.

Selon le critère physique, la séparation des nœuds a lieu quand la valeur d'un paramètre physique prédéfini est atteinte à un nœud ou un élément. Ce paramètre physique peut être sélectionné comme : déformation, contrainte, densité d'énergie de déformation dépendant des propriétés des matériaux et des conditions de coupe.

II.4.3. Critère d'endommagement de Johnson-Cook :

Le critère d'endommagement d'après Johnson-Cook peut être exprimé par [13] :

$$\varepsilon_f = \left[d_1 + d_2 \exp\left(-d_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \right] \left[1 + d_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{fus} - T_0} \right) \right] \quad (II-3)$$

Les variables d_1, \dots, d_5 sont les paramètres d'initiation de l'endommagement du matériau usiné ; ils sont déterminés expérimentalement.

La rupture aura lieu lorsque $D = 1$, ce dernier élément est exprimé par :

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \quad (II-4)$$

II.5. Modélisation du contact outil-copeau :

La modélisation du contact outil-copeau revêt une importance capitale. En effet, les phénomènes thermomécaniques qui opèrent à l'interface outil-copeau ont une forte influence sur le comportement des outils de coupe. Nous pouvons citer parmi les premières lois de frottement générales [12] :

✓ Loi d'Amontons Coulomb (1785) :

$$\vec{\tau}_{OB} = -\mu \sigma_{OB} \frac{\vec{V}_g}{\|\vec{V}_g\|} \quad (II-5)$$

✓ **Loi de Tresca (1864) :**

$$\vec{\tau}_{OB} = -m \frac{\sigma_{OB}}{\sqrt{3}} \frac{\vec{V}_g}{\|\vec{V}_g\|} \quad (\text{II-6})$$

✓ **Loi de Coulomb-Orowan :**

$$\text{Si } |\mu \sigma_{OB}| < \frac{\sigma_{OB}}{\sqrt{3}} \text{ alors } \vec{\tau}_{OB} = -\mu \sigma_{OB} \frac{\vec{V}_g}{\|\vec{V}_g\|} \quad (\text{II-7})$$

$$\text{Si } |\mu \sigma_{OB}| \geq \frac{\sigma_{OB}}{\sqrt{3}} \text{ alors } \vec{\tau}_{OB} = -\frac{\sigma_{OB}}{\sqrt{3}} \frac{\vec{V}_g}{\|\vec{V}_g\|} \quad (\text{II-8})$$

Cette loi est une extension de celle proposée par Amontons Coulomb (relation II-5) et permet de limiter la contrainte de cisaillement lorsqu'il y a des pressions élevées comme c'est le cas en usinage. Ces pressions élevées en usinage sont de l'ordre de deux fois la contrainte d'écoulement du matériau. Elle est associée au critère de plasticité de Von-Misès.

✓ **Loi combinée de Coulomb-Orowan et Tresca :**

$$\text{Si } |\mu \sigma_{OB}| < m \frac{\sigma_{OB}}{\sqrt{3}} \text{ alors } \vec{\tau}_{OB} = -\mu \sigma_{OB} \frac{\vec{V}_g}{\|\vec{V}_g\|} \quad (\text{II-9})$$

$$\text{Si } |\mu \sigma_{OB}| \geq m \frac{\sigma_{OB}}{\sqrt{3}} \text{ alors } \vec{\tau}_{OB} = -m \frac{\sigma_{OB}}{\sqrt{3}} \frac{\vec{V}_g}{\|\vec{V}_g\|} \quad (\text{II-10})$$

Cette loi est une combinaison des lois de Coulomb-Orowan (relation II-7) et de Tresca (relation II-6), et est souvent utilisée pour définir les zones de contact collant (Tresca) et glissant (Coulomb-Orowan). Contrairement à la loi de Coulomb-Orowan, la contrainte de cisaillement est saturée à un certain pourcentage de la contrainte d'écoulement en cisaillement par le biais du coefficient de frottement Tresca.

✓ **Loi de Merchant :**

$$\mu = \frac{F_t \tan(\gamma) + F_f}{F_t - F_f \tan(\gamma)} \quad (\text{II-11})$$

✓ **Loi de Moufki et al. :**

$$\mu = \mu_0 \left[1 - \left(\frac{\bar{T}_{OB}}{T_0} \right)^q \right] \quad (\text{II-12})$$

Chapitre III :
Résultats de simulation et
interprétation

Dans ce chapitre, nous allons procéder à une simulation numérique du processus de coupe. Le travail effectué est une continuité au développement relatif à la modélisation analytique déjà investiguée dans la référence [6].

III.1. Modélisation analytique de la coupe :

La modélisation analytique de la coupe déjà investiguée dans la référence [6] est basée sur le modèle thermomécanique d'Oxley modifié. Ce modèle analytique permet de prédire les efforts de coupe, les déformations, les contraintes, les vitesses de déformations, les températures moyennes dans les zones de cisaillement primaire et secondaire, et la géométrie du copeau à partir des données d'entrée qui suivent :

- la vitesse de coupe V_c ,
- l'avance f ,
- la profondeur de passe a_p ,
- l'angle de coupe γ ,
- les propriétés rhéologiques du matériau usiné (choix de la loi de comportement),
- les propriétés thermiques du matériau usiné ; à savoir : la masse volumique ρ , la chaleur spécifique C_p , et la conductivité thermique k_m .

La figure qui suit illustre les grandeurs d'entrée et de sortie du modèle analytique d'Oxley modifié.

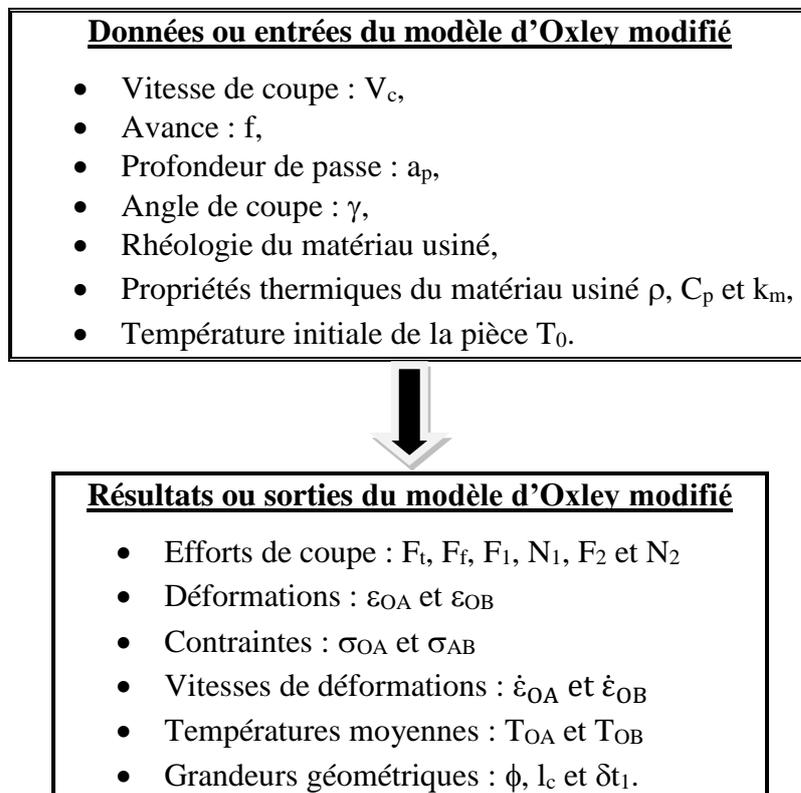


Figure III-1 : Représentation des grandeurs entrée/sortie du modèle d'Oxley modifié.

Les conditions de coupe utilisées pour la simulation dans la référence [6] sont reportées dans le tableau qui suit :

Conditions de coupe			
V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	γ (°)
100	0.125	4	-5
Paramètres rhéologiques du matériau AISI 1045			
$A = 553.1$ (MPa)	$B = 600.8$ (MPa)	$C = 0.0134$	$n = 0.234$
$m = 1$	$T_0 = 293$ K	$T_{fus} = 1733$ K	$\dot{\epsilon}_0 = 1$ s ⁻¹

Tableau III-1 : Conditions de coupe et propriétés rhéologiques du matériau usiné.

Les propriétés mécaniques et thermiques du matériau usiné sont reportées dans le tableau qui suit.

Propriétés mécaniques et thermiques du matériau AISI 1045	
Module d'Young E (GPa)	210
Coefficient de Poisson ν	0.3
Masse volumique moyenne ρ (kg.m ⁻³)	7862
Conductivité thermique k_m (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	52.61 - 0.0298 T
Chaleur spécifique C_p (J.Kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	420 + 0.504 T

Tableau III-2 : Propriétés mécaniques et thermiques du matériau usiné.

Les résultats obtenus par simulation du modèle thermomécanique d'Oxley modifié sont reportés dans le tableau qui suit.

F_t (N)	F_f (N)	F_1 (N)	N_1 (N)	F_2 (N)	N_2 (N)	ϵ_{OA}	ϵ_{OB}
1449.08	1187.01	1041.44	1557	1057	1547	1.07	20.97
σ_{OA} (MPa)	σ_{OB} (MPa)	$\dot{\epsilon}_{OA}$ (s ⁻¹)	$\dot{\epsilon}_{OB}$ (s ⁻¹)	\bar{T}_{OA} (°C)	\bar{T}_{OB} (°C)	ϕ (°)	l_{OA} (mm)
1048.75	944.84	4979.89	15219.8	294.44	782.12	16.9	0.43
	C_v (mm)	l_c (mm)	t_1 (mm)	δ (mm)			
	2.07	0.72	0.399	0.005			

Tableau III-3 : Résultats de simulation du modèle d'Oxley modifié [6].

Les grandeurs expérimentales sont reportées dans le tableau qui suit :

	$V_c = 100$ m/min	$V_c = 200$ m/min	$V_c = 400$ m/min
Effort de coupe tangentiel mesuré F_t (N/mm)	350	325	300
Effort d'avance mesuré F_t (N/mm)	325	225	225
Épaisseur du copeau mesurée t_1 (mm)	0.4	0.3	0.3

Tableau III-4 : Grandeurs expérimentales [18].

À travers ce dernier tableau, nous pouvons déterminer le coefficient de frottement selon les modèles de contact d'Amontons-Coulomb et Merchant pour différentes vitesses de coupe (voir équations II.5 et II.11) ; à noter que l'angle de coupe est : $\gamma = -5^\circ$.

	Modèle d'Amontons - Coulomb	Modèle de Merchant
$V_c = 100$ m/min	0.58	0.78
$V_c = 200$ m/min	0.58	0.57
$V_c = 400$ m/min	0.58	0.62

Tableau III-5 : Calcul du coefficient de frottement.

Pour le modèle d'Amontons-Coulomb, les valeurs de τ_{OB} et σ_{OB} sont déterminées suite à la simulation du modèle analytique d'Oxley modifié. Pour nos simulations, nous allons considérer pour le contact outil-copeau le modèle de Merchant qui semble être plus réaliste.

Nous allons maintenant procéder à la simulation numérique de l'usinage de l'acier AISI 1045 sous les conditions de coupe utilisées dans la référence [6].

III.2. Simulation numérique de la coupe :

Rappelons qu'il s'agit d'une configuration de coupe orthogonale ; cette dernière est illustrée par la figure qui suit :

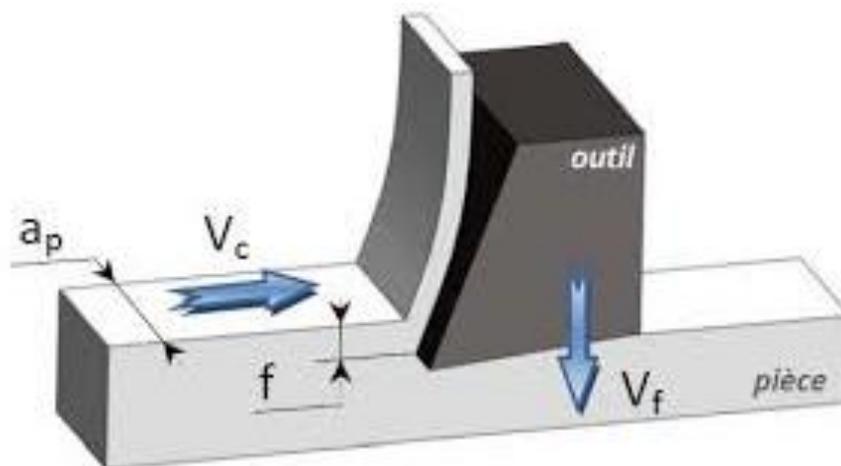


Figure III-2 : Configuration de coupe orthogonale.

La coupe orthogonale est la configuration la plus simple pour usiner une pièce. Cette configuration est peu employée ; en effet, en pratique, seuls quelques procédés classiques permettent d'obtenir ces conditions comme par exemple : le rabotage, le chariotage de tube et l'usinage de couronne ou palier. Pour une avance faible devant la profondeur de passe, le problème peut être traité comme étant un problème de déformations planes.

Le progiciel utilisé pour la simulation numérique est Abaqus/Explicit 2017 ; ce dernier est basé sur la méthode des éléments finis (MEF). Son interface d'utilisation est organisée sous forme de différents modules ; à savoir :

- **Le module « PART »** : permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème traité, soit en les dessinant dans Abaqus, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.
- **Le module « PROPERTY »** : permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
- **Le module « ASSEMBLY »** : assemble les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global.
- **Le module « STEP »** : permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand il est aussi possible de créer des forces ou des conditions aux limites qui s'activent à des moments donnés.
- **Le module « INTERACTION »** : grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies.
- **Le module « LOAD »** : permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites, et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions aux limites sont dépendants du module STEP.
- **Le module « MESH »** : contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.
- **Le module « JOB »** : une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser ce module pour réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

III.2.1. Création des géométries de l'outil et de la pièce :

Dans un usinage, les éléments mis en interaction sont l'outil et la pièce ; les figures III-3 et III-4 montrent les géométries retenues pour ces éléments.

Pour l'outil, l'angle de coupe γ est pris égal à -5° ; tandis que, l'angle de dépouille α est considéré égal à 7° qui est une valeur prise entre 2° et 10° .

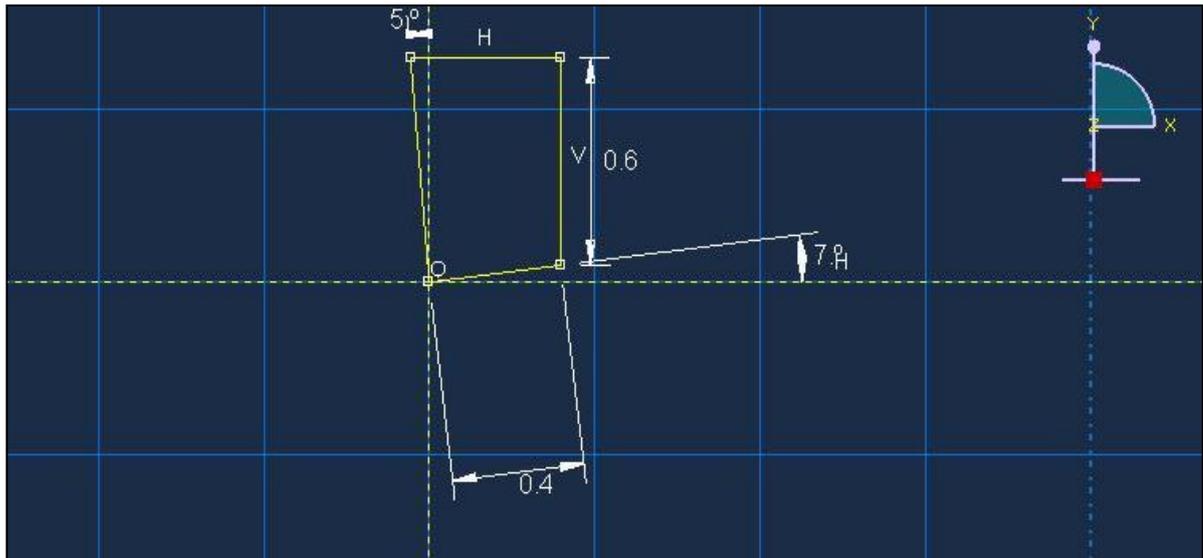


Figure III-3 : Géométrie de l'outil.

La pièce est prise de forme rectangulaire dans le plan XY ; sa longueur est prise égale à 1 mm dans le but de réduire le temps de simulation. Avec une vitesse de coupe $V_c = 100$ m/min, le temps de simulation pour une longueur de 1 mm sera égal à 6.10^{-4} s.

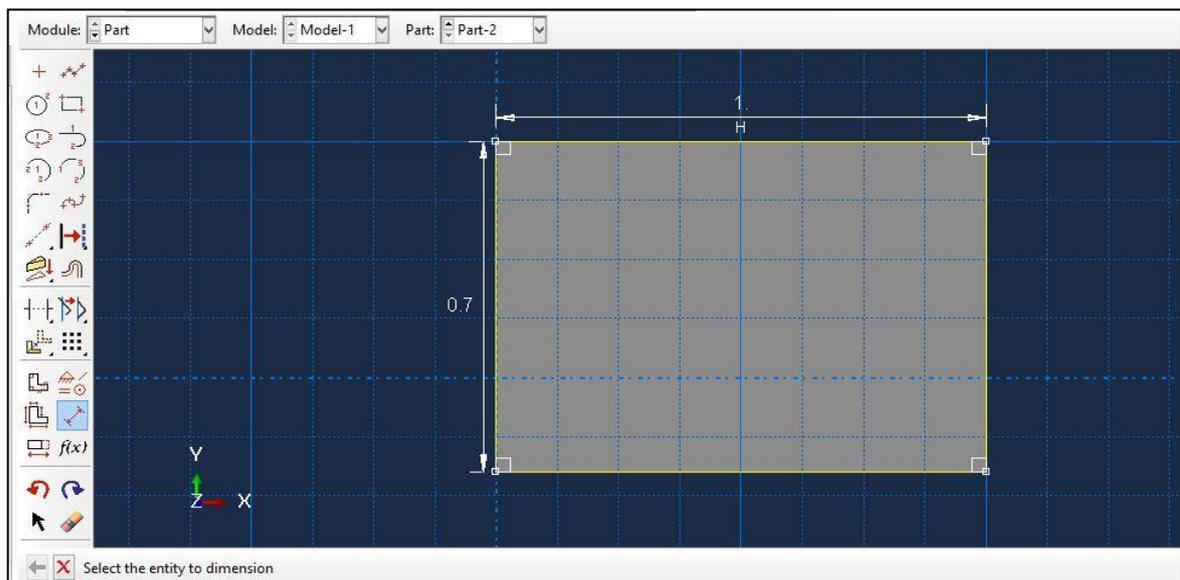


Figure III-4 : Géométrie de la pièce.

III.2.2. Propriétés des matériaux usinés et de coupe :

A priori, l'outil de coupe (matériau de coupe) est assimilé à un corps rigide ; donc, pas de champ de déformation sur celui-ci. Aussi, nous ne sommes pas obligés à introduire sur Abaqus les propriétés du matériau de coupe

Le matériau usiné (pièce) étant un corps déformable plastique ; son modèle constitutif est celui de Johnson-Cook. La figure qui suit montre l'introduction des paramètres de ce modèle dans Abaqus (voir tableau III-1).

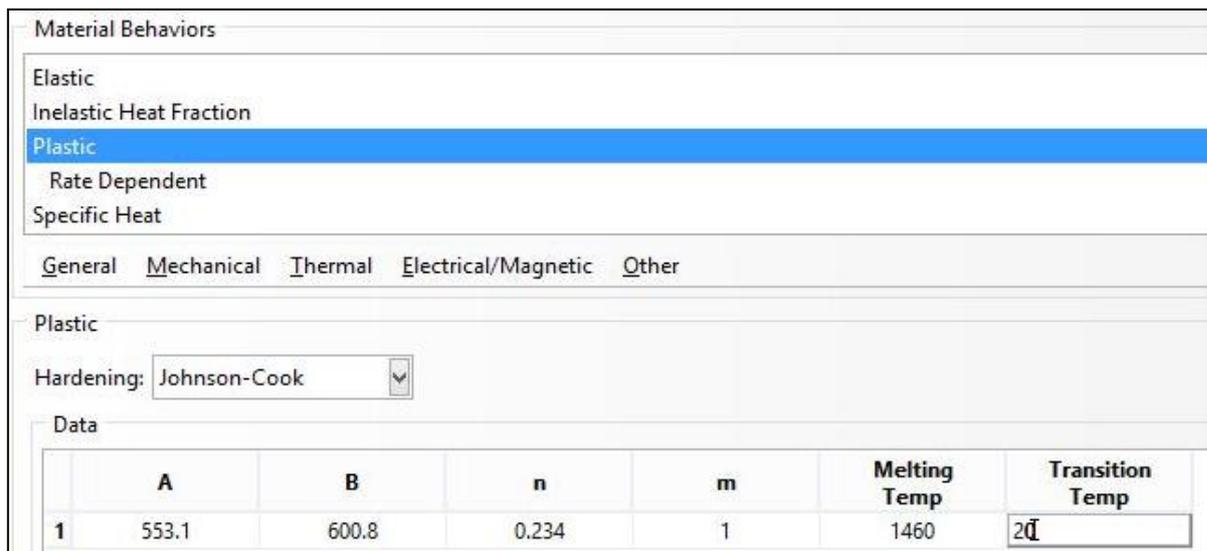


Figure III-5 : Propriétés du matériau usiné.

Pour l'endommagement du matériau usiné, les paramètres sont reportés dans le tableau qui suit :

d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
0.06	3.31	-1.96	0.0018	0.058

Tableau III-6 : Paramètres d'endommagement du matériau usiné [17].

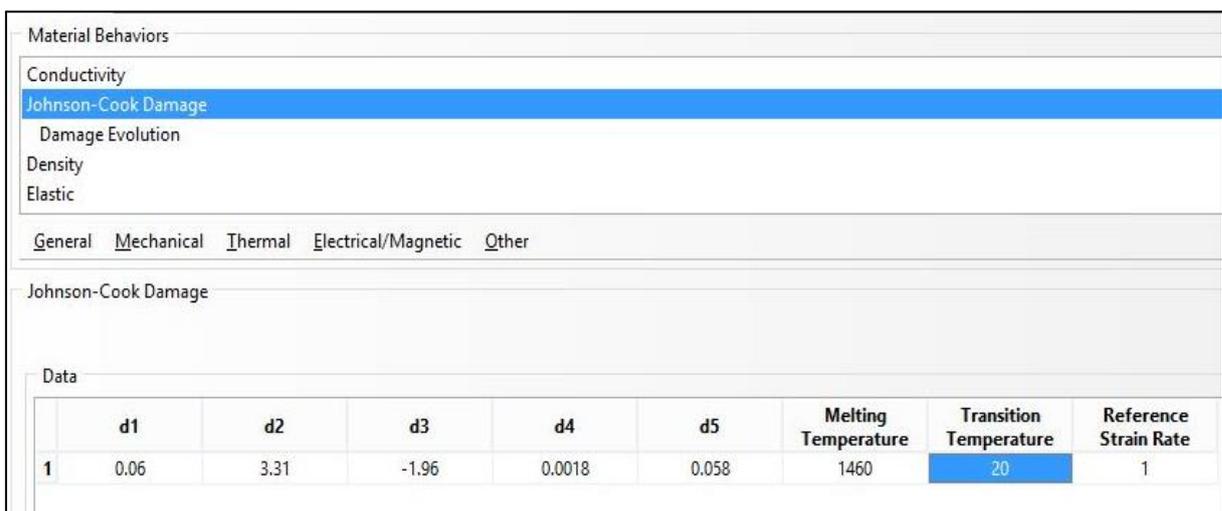


Figure III-6 : Paramètres du critère d'endommagement.

III.2.3. Maillage de la pièce :

Le progiciel Abaqus propose le type d'éléments finis (triangulaire, quadrilatéral, ...) ; Pour notre cas, nous avons choisi a priori des éléments quadrilatéraux pour des raisons de simplicité.

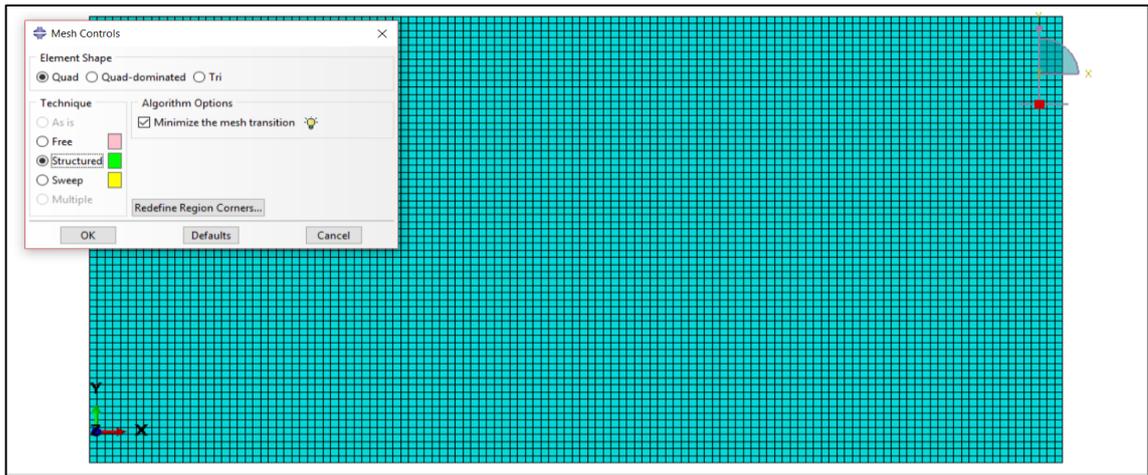


Figure III-7 : Maillage de la pièce.

III.2.4. Contact outil-copeau :

Du tableau III-5, la valeur du coefficient de frottement est prise égale à 0.78. Aussi, c'est dans le module « Interaction » que nous introduisons le coefficient de frottement.

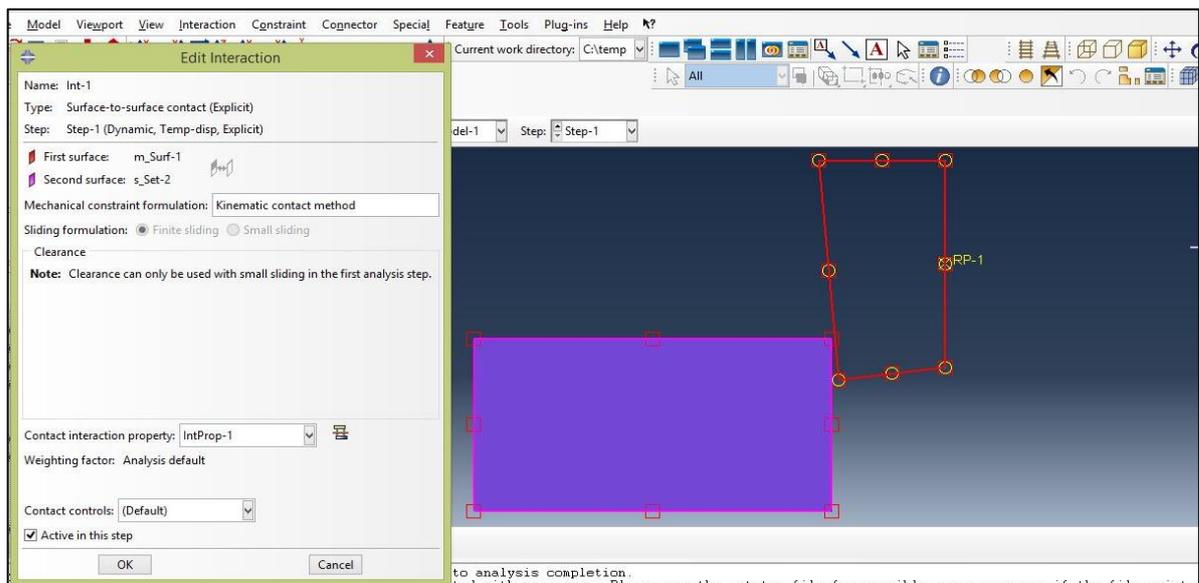


Figure III-8 : Module interaction.

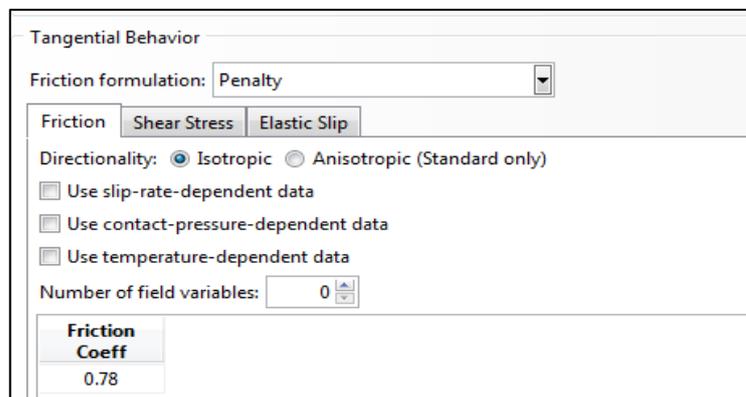


Figure III-9 : Introduction du coefficient de frottement.

III.2.5. Unités dans Abaqus :

Le progiciel Abaqus n'indique pas les unités des grandeurs physiques ; c'est à l'utilisateur de faire un choix du système d'unités. Pour notre travail, nous avons choisi les unités qui suivent :

Distance	Temps	Masse	Masse volumique	Force	Contrainte	Température
[mm]	[s]	Tonnes [t]	[t.mm ⁻³]	[N]	[MPa]	[°C]

Tableau III-7 : Choix des unités.

III.3. Résultats de simulation et interprétation :

Nous allons maintenant présenter les résultats relatifs à la simulation numérique de la coupe orthogonale de l'acier AISI 1045. Après divers réglages sur le progiciel Abaqus, la figure qui suit montre les échauffements dans la zone de coupe.

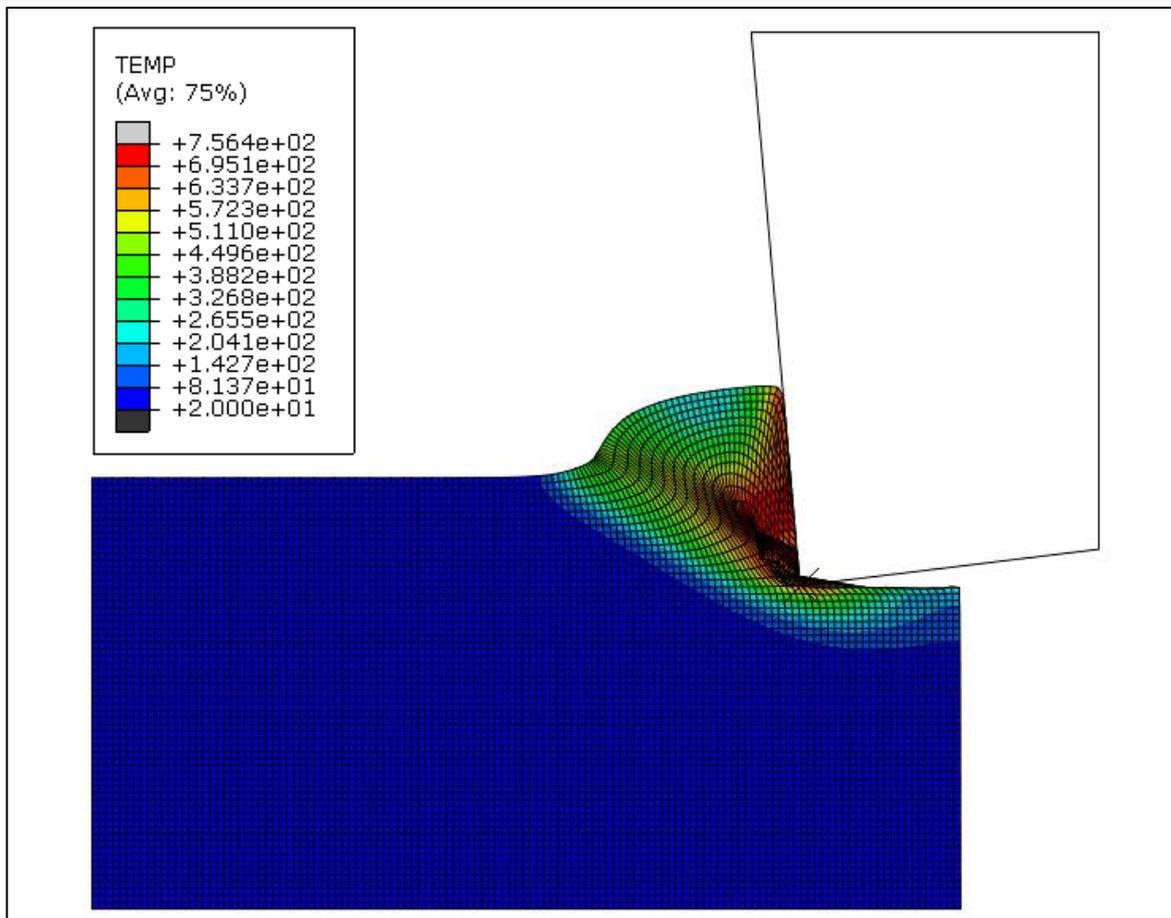


Figure III-10 : Température dans la zone de coupe.

Nous remarquons que les échauffements atteignent une température aux alentours de 750 °C. Ceci rejoint les résultats obtenus par la modélisation analytique (voir tableau III-3).

Nous allons maintenant présenter les efforts de coupe qui prennent naissance suite à l'interaction outil-pièce.

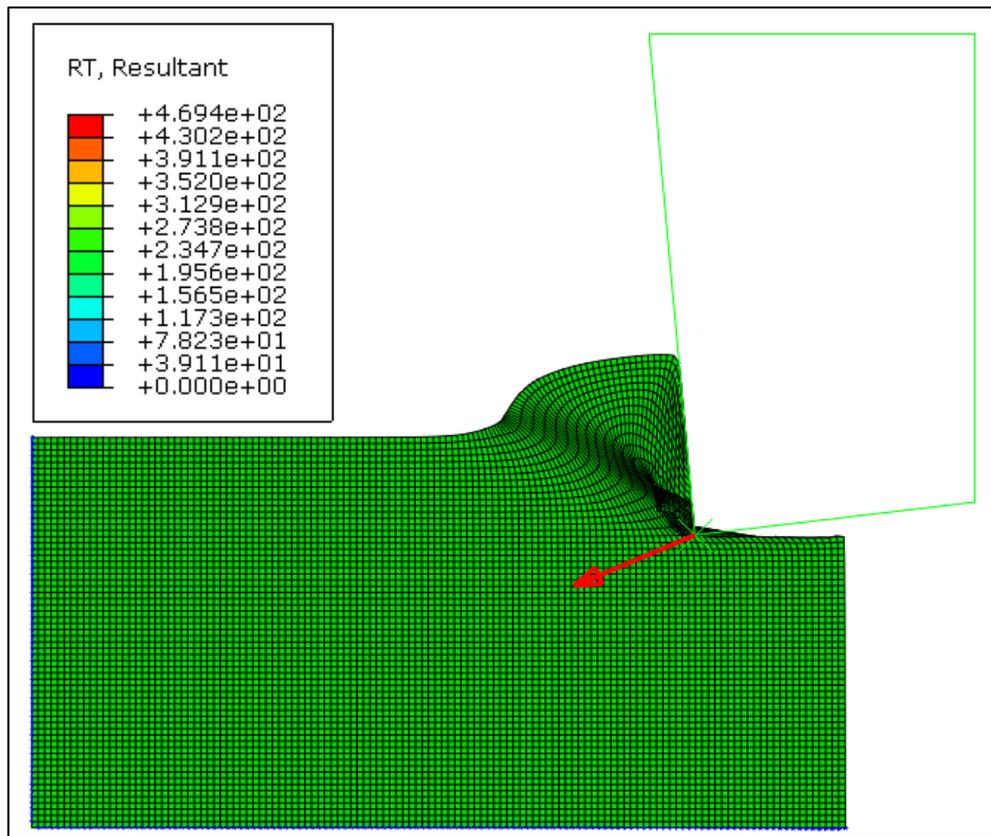


Figure III-11 : Effort de coupe résultant.

Cette résultante sera décomposée en deux composantes ; à savoir : l'effort tangentiel F_t et l'effort d'avance F_f . Les figures qui suivent illustrent cette situation.

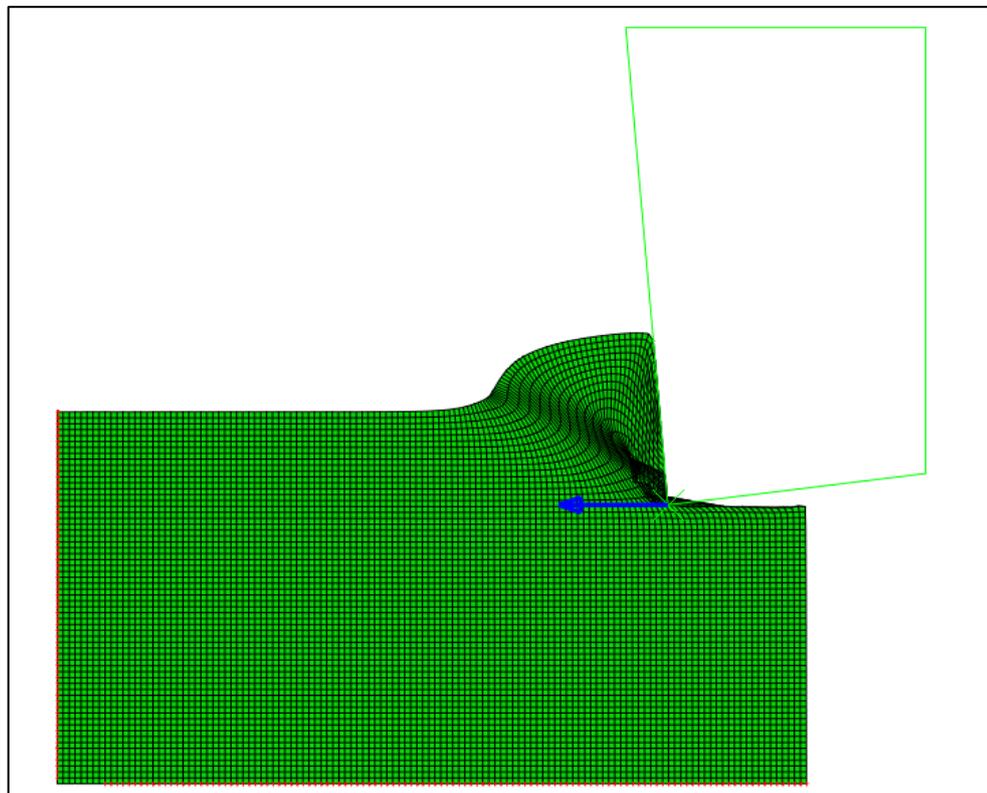


Figure III-12 : Composante F_t de l'effort de coupe.

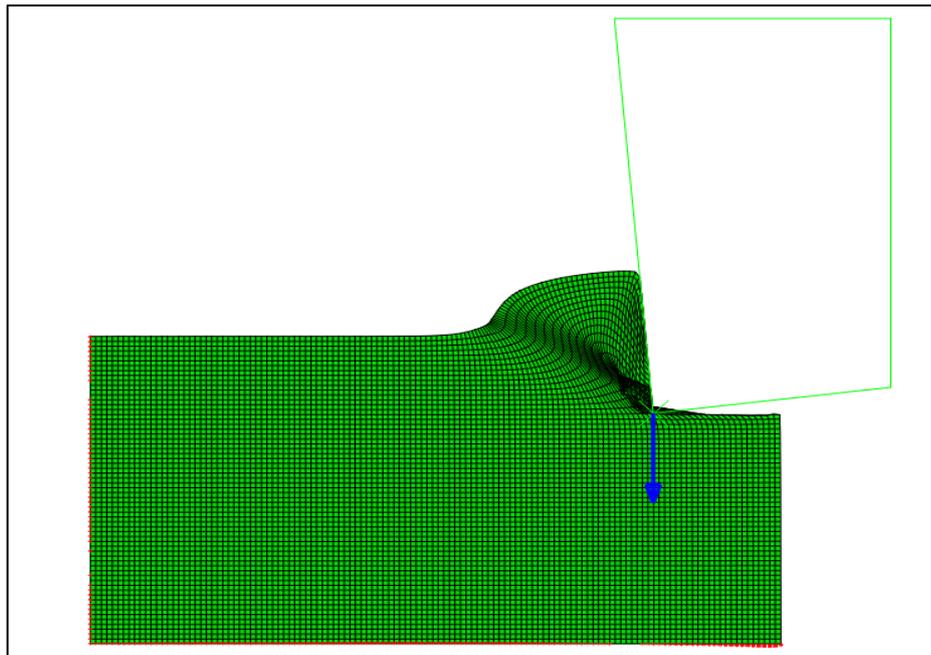


Figure III-13 : Composante F_t de l'effort de coupe.

Relativement aux résultats reportés dans le tableau III-4, l'effort de coupe résultant est du même ordre de grandeur.

Nous allons maintenant faire varier l'angle de coupe pour voir son influence sur la température et l'effort dans la zone de coupe.

✓ **Température pour l'angle de coupe $\gamma = 0^\circ$:**

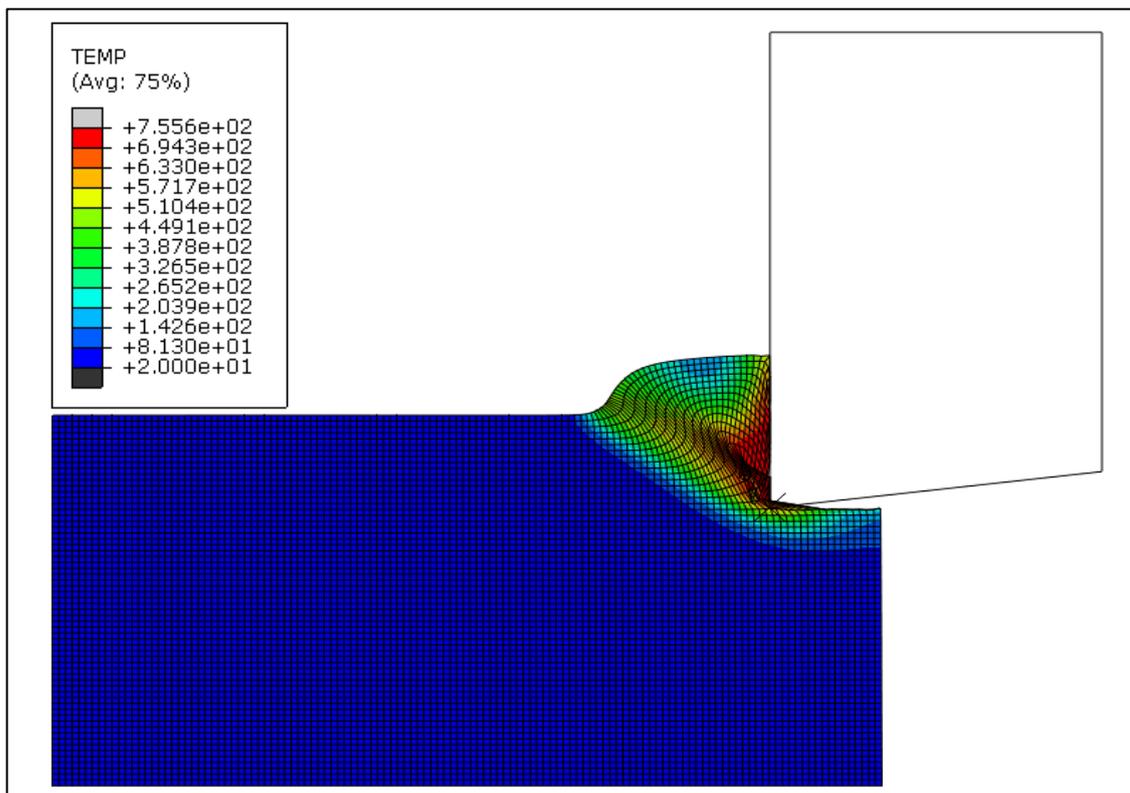


Figure III-14 : Température pour $\gamma = 0^\circ$.

✓ Température pour l'angle de coupe $\gamma = 5^\circ$:

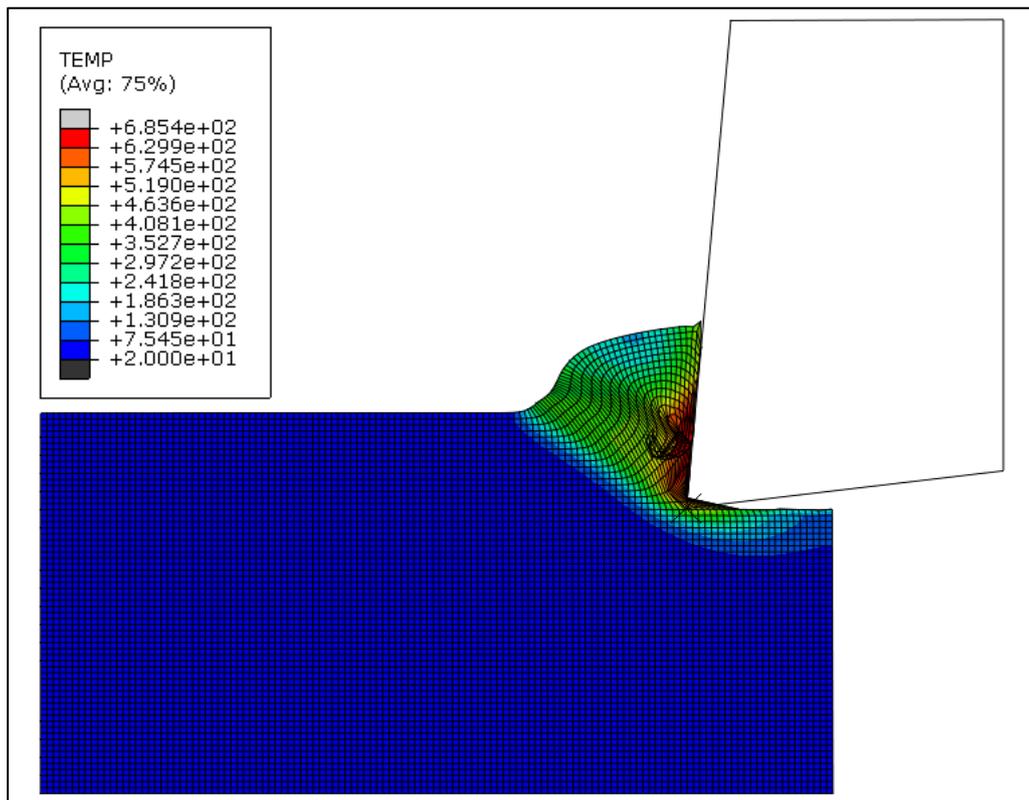


Figure III-15 : Température pour $\gamma = 5^\circ$.

✓ Effort de coupe pour l'angle $\gamma = 5^\circ$:

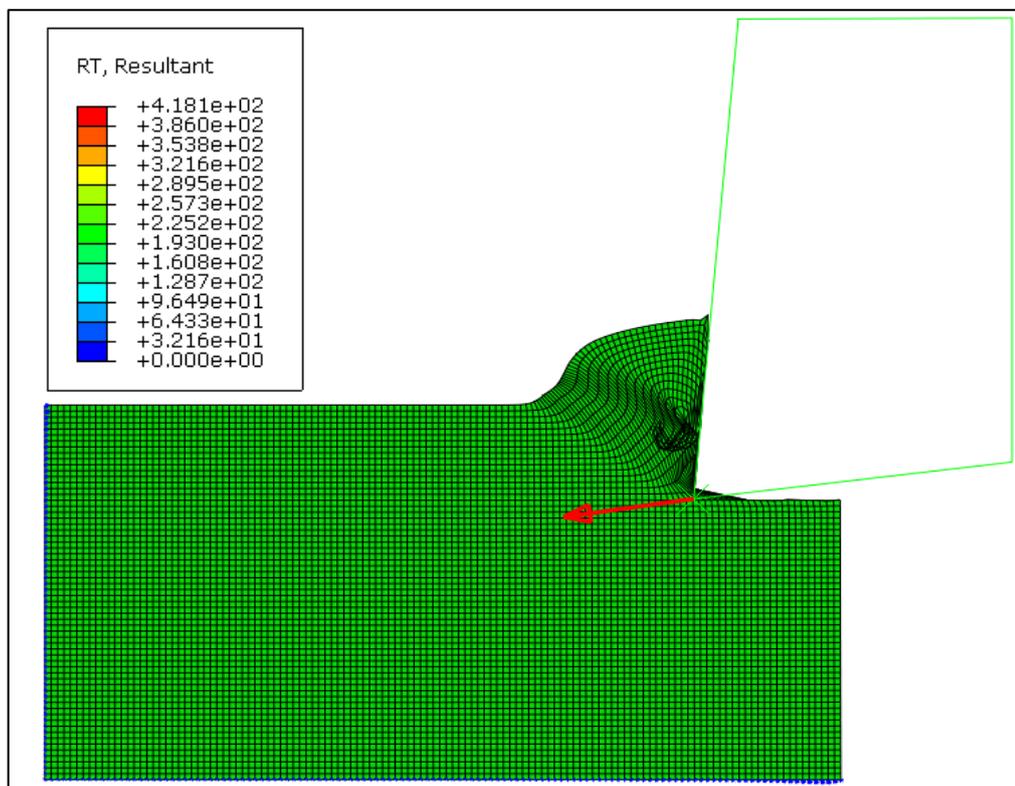


Figure III-16 : Effort de coupe résultant pour $\gamma = 5^\circ$.

À travers les résultats présentés ci-dessus, la température et l'effort diminuent avec l'augmentation de l'angle de coupe.

Nous allons dans ce qui suit considérer la variation de la vitesse de coupe ; à cet effet, l'angle de coupe sera conservé à sa première valeur de -5° et la vitesse de coupe V_c sera prise égale à 200 m/min et 400 m/min.

Les figures qui suivent relatent la température et l'effort dans la zone de coupe.

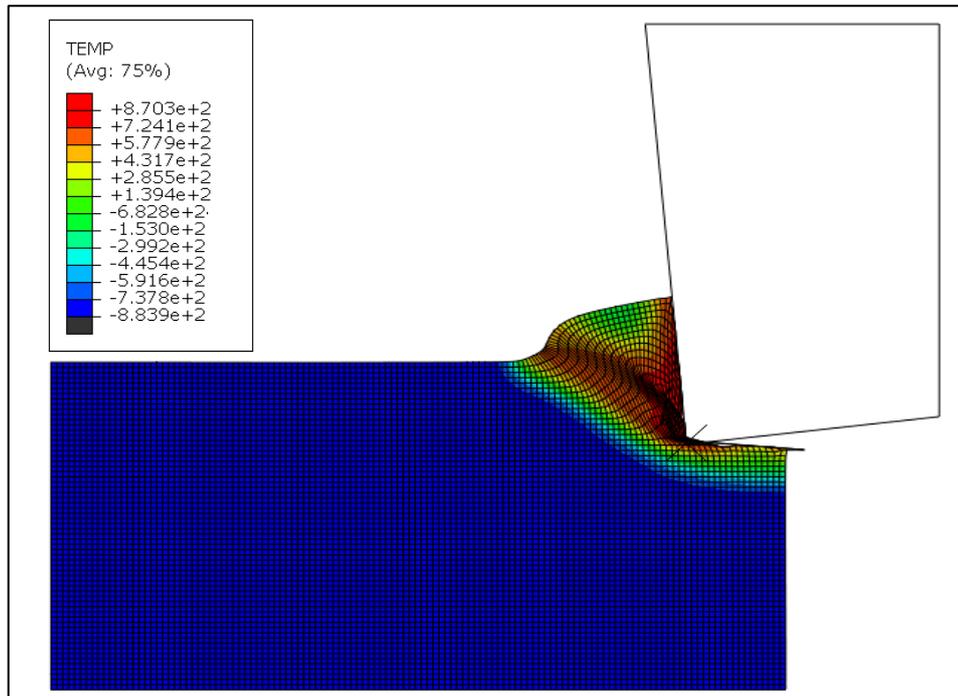


Figure III-17 : Température pour $\gamma = -5^\circ$ et $V_c = 200$ m/min.

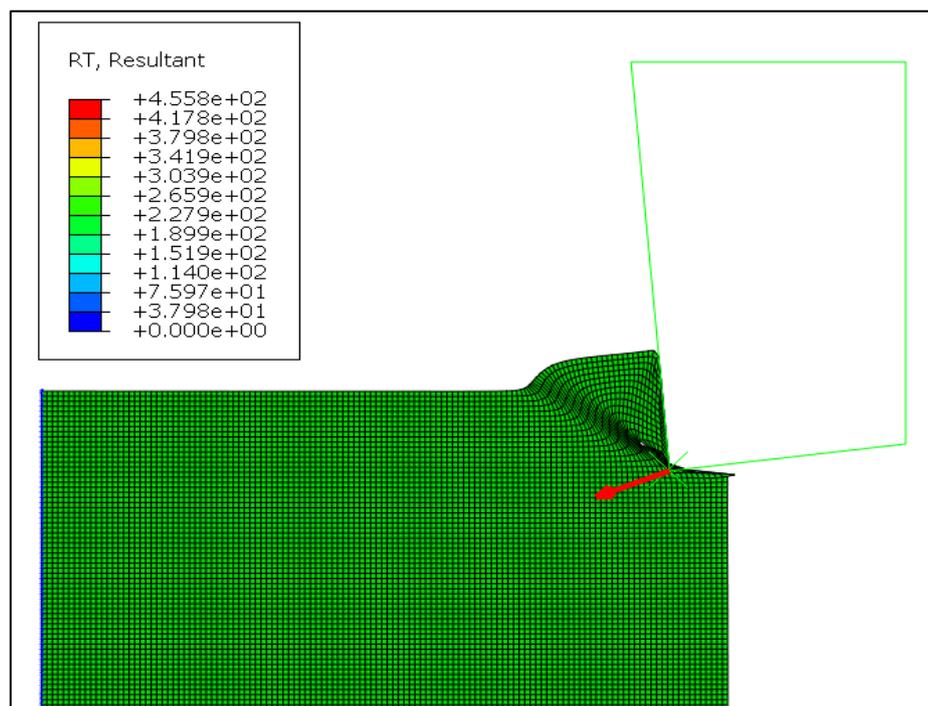


Figure III-18 : Effort de coupe pour $\gamma = -5^\circ$ et $V_c = 200$ m/min.

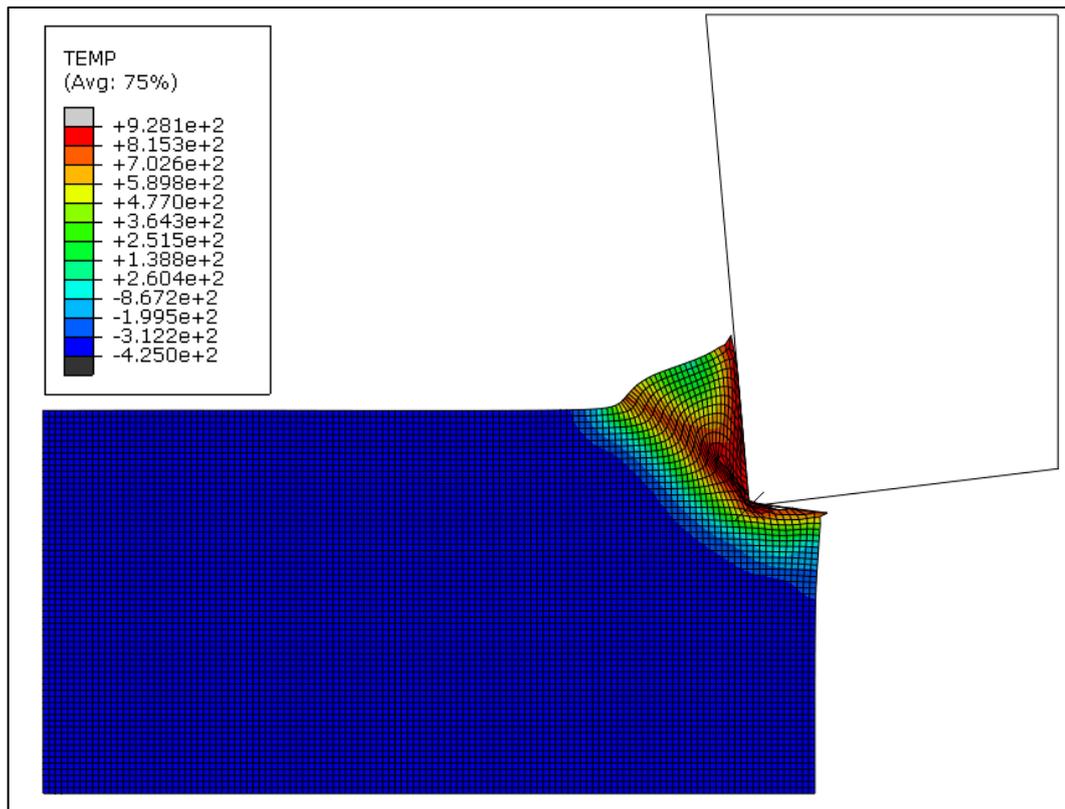


Figure III-19 : Température pour $\gamma = -5^\circ$ et $V_c = 400$ m/min.

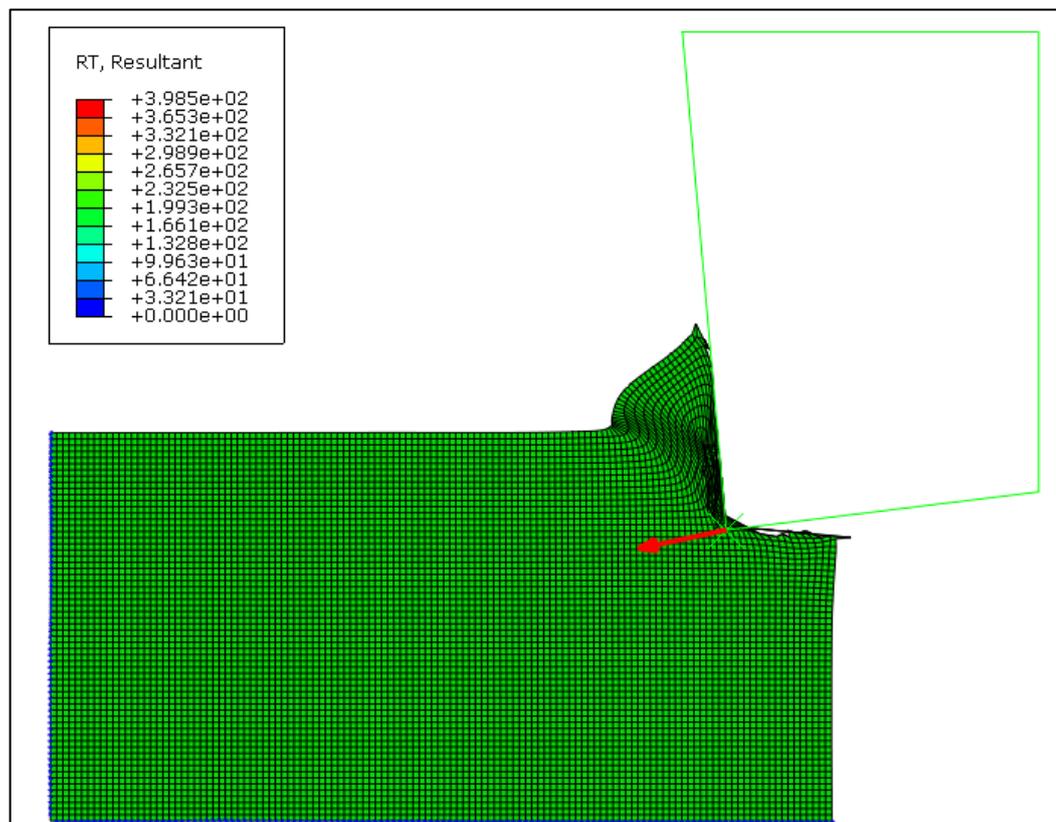


Figure III-20 : Effort de coupe pour $\gamma = -5^\circ$ et $V_c = 400$ m/min.

À travers les figures III-17, III-18, III-19 et III-20, nous constatons que la température a

augmenté avec l'augmentation de la vitesse de coupe mais l'effort de coupe a diminué.

En conclusion, nous pouvons avancer que nous sommes à une phase d'initiation au progiciel Abaqus. Lors de la simulation numérique, d'autres éléments peuvent être considérés tels que le choix d'un outil déformable, le type de maillage, le nombre des nœuds, la nature du contact outil-copeau, etc. Pour un travail d'initiation, les résultats de simulation semblent prometteurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons effectué une simulation numérique d'un procédé d'usinage en vue d'analyser les efforts de coupe et les échauffements dans la zone de coupe. Aussi, ce travail est une continuité aux développements déjà investigués au laboratoire des Technologies Industrielles. Il s'agit de la prédiction, entre autres, des efforts de coupe et des échauffements dans la zone de coupe d'un acier AISI 1045 par une modélisation analytique utilisant le modèle thermomécanique d'Oxley modifié.

La simulation numérique, objet de la présente étude, à l'aide du code Abaqus utilise la formulation Lagrangienne-Eulérienne-Arbitraire en faisant appel à la méthode des éléments finis. La loi rhéologique du matériau usiné et son critère d'endommagement sont de type Johnson-Cook. Afin que nous puissions confronter nos résultats de simulation, nous avons retenu a priori les mêmes conditions de coupe ainsi que le même jeu de paramètres choisis dans la référence [5].

Après introduction des données et simulation par le code Abaqus, la confrontation des résultats est prometteuse. Néanmoins, notre utilisation du code nécessite davantage l'acquis de ses fonctionnalités.

Aussi pour nos simulations, nous avons considéré la variation de l'angle de coupe et de la vitesse de coupe. À cet effet, la température et l'effort de coupe diminuent avec l'augmentation de l'angle de coupe. De plus, la température augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe ; par contre, l'effort de coupe diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

À travers cette modeste étude, nous avons acquis des connaissances théoriques sur les modèles analytique et thermique de prédiction des échauffements dans la zone de coupe ainsi que l'utilisation du code Abaqus dédié à la simulation numérique.

Nous souhaitons que la présente étude soit enrichie par la maîtrise du code Abaqus et étendue à la prédiction des échauffements en coupe oblique (3D).

Références bibliographiques

- [1] **E. FELDER**, " Procédés d'usinage ", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, B 7000 / 1-16.
- [2] <http://www.coromant.sandvik.com/fr>.
- [3] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/procedes-d-usinage-42190210/tournage-bm7086/>.
- [4] **D. FERHAT**, " Modélisations statistiques de la rugosité en tournage dur ", Mémoire de Master, Département de Génie Mécanique, Université de Tiaret, 2017.
- [5] **K. MOUSSAOUI**, " Influence de l'usinage sur la durée de vie en fatigue de pièces aéronautiques en alliage de titane ", Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3, 2013.
- [6] **S. MAKHFI**, " Modélisation et simulation du comportement thermomécanique de l'usinage à grande vitesse ", Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2018.
- [7] **M. HABAK**, " Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6 ", Thèse de Doctorat, ENSAM Angers, 2006.
- [8] **A. LAMARAT**, " Prédiction de la température de coupe de l'acier AISI D3 : Application au tournage en utilisant la méthode de surface de réponse (RSM) ". Mémoire de Master, Université d'Ouargla, 2017.
- [9] **K. DJELLOULI**, " Synthèse et analyse des effets tribologiques associés à l'usinage des matériaux métalliques ", Mémoire de Master, Département de Génie Mécanique, Université de Tiaret, 2016.
- [10] **F. ILLILTEN**, " La simulation de l'usinage en coupe orthogonale avec le logiciel Abaqus ", Département de Génie Mécanique, Université de Bejaïa, 2015.
- [11] **K. CENK**, " Modelling and simulation of metal cutting by finite element method ", Institut de Technologie d'Izmir, 2009.
- [12] **F. KONE** " Etude expérimentale, modélisation et simulation numérique de l'usinage à sec des aciers inoxydables : étude de l'effet des revêtements mono et multicouches ", Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [13] **F. BENABID**, " Etude des transferts thermiques au cours d'une opération d'usinage : influence sur l'usinage à grande vitesse ", Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2015.
- [14] <https://www.deform.com/general/>.
- [15] <https://fr.wikipedia.org/wiki/abaqus>.

- [16] **B. KEITA**, " Synthèse des rhéologies en usinage : Application pour la prédiction des échauffements dans la zone de coupe de l'acier 42CrMo4 ", Mémoire de Master, Département de Génie Mécanique, Université de Tiaret, 2017.
- [17] **K. PRAKASH MARIMUTHU, H. P. THIRTA PRASADA & C. S. CHETHAN KUMAR**, " 3D finite element model to predict machining induced residual stresses using Arbitrary Lagrangian Eulerian approach ", Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 309 – 320, 2018.
- [18] **T. ÖZEL & E. ZEREN**, " A methodology to determine work material flow stress and tool-chip interfacial friction properties by using analysis of machining ", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, pp. 1 – 11, 2006.

ملخص:

من خلال هذه الدراسة، نهتم بعملية محاكاة رقمية خاصة بقطع المعدن (AISI 1045). الهدف هو التنبؤ فيما يخص قوى القطع و ارتفاع درجة الحرارة في مجال القطع. كما تعد هذه الدراسة امتدادا للأعمال المحققة بواسطة النموذج الحراري الميكانيكي المعدل لـ Oxley. النتائج المحصل عليها من خلال المحاكاة الرقمية بواسطة البرنامج (Abaqus) تعتبر مرضية.

كلمات المفاتيح: محاكاة رقمية، النموذج الحراري الميكانيكي، التنبؤ، قوة القطع، درجة الحرارة، برنامج (Abaqus).

Résumé :

Dans la présente étude, nous nous intéressons à la simulation numérique de la coupe orthogonale d'un acier AISI 1045. L'objectif sera de prédire les efforts et les échauffements dans la zone de coupe ; il s'agit, d'une continuité aux développements effectués par une modélisation analytique utilisant le modèle thermomécanique analytique d'Oxley modifié. La simulation, qui semble être prometteuse, a été effectuée sous le progiciel Abaqus/Explicit.

Mots clés : Simulation numérique, Modèle thermomécanique, Modèle thermique, Prédiction, Effort de coupe, Température, Abaqus.

Abstract:

In the present study, we are interested to the numerical simulation of the orthogonal cutting of AISI 1045 material. The goal is to predict the cutting forces and heat in the cutting zone. This work is a continuation of the developments made by analytical modeling using the modified thermomechanical model of Oxley. The simulation, which seems to be promising, was conducted under the Abaqus/Explicit package.

Keywords: Numerical simulation, Thermomechanical model, Prediction, Cutting force, Temperature, Abaqus.