

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**  
Département de Mécanique

**THESE DE DOCTORAT**

En Génie Mécanique

SIMULATIONS NUMERIQUES DE LA COUPE DES PIECES MECANIQUESET  
IMPACT DES PARAMETRES DE COUPE SUR  
LA GEOMETRIE DE CES PIECES

Par :

**NesrineMelzi**

Devant le jury composé de :

AllaliAbderezak	Professeur, USD de Blida 1	Président
Tiberkak Rachid	Maitre de Conférences A, USD de Blida 1	Examineur
Mahieddine Ali	Maitre de Conférences A, UDB K.Miliana	Examineur
OualiMohamed	Professeur, USD de Blida 1	Rapporteur
Temmar Mustapha	Professeur, USD de Blida 1	Co-Rapporteur

Blida, Janvier2018

## Remerciements

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

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

Je voudrais tout d'abord remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Je remercie le Professeur **Allali Abderezzak**, de l'Université Saad Dahlab de Blida 1, pour avoir accepté la présidence de mon jury de thèse.

J'ai été privilégié par l'acceptation de Monsieur **Mahieddine Ali** et Monsieur **Tiberkak Rachid**, respectivement Maitres de Conférences A à l'Université Djillali Bounaama de Khemis Miliana et à l'Université Saad Dahlab de Blida 1, d'être membres de jury.

Je suis très reconnaissante au Professeur **Ouali Mohamed**, mon promoteur, et au Professeur **Temmar Mustapha**, mon co-promoteur pour avoir accepté de diriger cette thèse, et dont l'aide précieuse m'a été indispensable sur le plan scientifique et humain. Je leurs présente également ma plus sincère gratitude pour la confiance et la sympathie qu'ils m'ont témoignée au cours de ces années de travail en me faisant découvrir l'état de l'art de l'usinage. Sans eux, ce travail n'aurait pas vu le jour.

J'exprime toute ma gratitude au Professeur **Bounazef Mokhtar**, de l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas et au Professeur **Hanane Farouk** de l'Université Saad Dahlab de Blida 1, pour leurs soutiens techniques et leurs conseils judicieux.

Je remercie en particulier Monsieur **Melbous Abdelkader** pour sa disponibilité et son aide lors de l'étude de la simulation, ainsi que Professeur **Merzouk Mustapha** et **Monsieur Azzine Mohamed** pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Je remercie également Monsieur **Bentrad Hocine** pour m'avoir accompagné dans la découverte du domaine de la modélisation.

Je remercie finalement les enseignants, le personnel administratif, le personnel technique et les Doctorants (LMD) de notre Département de Mécanique.

## Dédicaces

A ma mère, à mon père, en remerciements de leurs efforts qui m'ont permis de faire de longues études,

A ma sœur Samira et son mari,

A mon frère Salim et sa femme,

A ma nièce Malak et mes neveux Mohamed Ramzi et Mehdi,

A la mémoire de mes grands-parents paternels : Fatma et Abdelkader,

A la mémoire de mes grands-parents maternels : Chérifa, Ahmed et sa femme,

A ma tante Zohra, ses enfants Amel, Nassima et Yacine sans oublier mon oncle Mokhtar,

A mes oncles, leurs femmes, mes cousins et mes cousines,

A mon oncle Kherarba Mehdi, sa femme et ses enfants,

A mes amies Asma et Nacira,

A tous mes collègues doctorantes et doctorants de notre Département de Mécanique.

Je voudrais remercier de nombreuses personnes sans qui cette thèse n'aurait pas pu aboutir et être menée à bien sans leurs aides et leurs idées. Je ne voudrais pas les citer nominativement de peur d'oublier une ou plusieurs personnes,

Encore une dernière fois, merci à tous.

## Résumé

Actuellement, tous les secteurs de l'industrie sont soumis à une grande concurrence. Pour répondre à cet état de fait et afin de garantir 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.

Notre travail, simulations numériques de la coupe des pièces mécaniques et impact des paramètres de coupe sur la géométrie de ces pièces, va nous permettre d'étudier le comportement des paramètres géométriques et cinématiques lors de l'usinage et leur impact sur la géométrie des pièces à usiner. La qualité des tolérances dimensionnelles des pièces usinées est d'une certaine manière directement liée à l'état de surface. Notre objectif est de proposer une méthodologie concernant la relation du système POM ; à savoir Pièce-Outil de coupe-Machine outil. Le domaine concerné porte sur la fabrication des pièces mécaniques lors d'un procédé de tournage. L'étude se comporte sur la détermination de la rugosité et la température lors du contact de la pièce à usiner avec l'outil de coupe.

**Mots-clés:** Procédés d'usinage, modélisation, Vibrations, Outils de coupe, Efforts de coupe, Rugosité, Température de coupe.

## Abstract

Currently , all industry sectors are subject to intense competition. To answer this situation in order to ensure the service life and the machined parts quality, a global modeling approach of the manufacturing process impact is necessary. All the steps, from obtaining the stock until the piece finishing , must be respected and studied. The cutting modeling is particularly important because of finishing operations, which give the surface the majority of its properties, are usually machining operations.

In our work, mechanical parts cutting simulations and the cutting parameters impact on the geometry of these parts, will allow us to study the geometric and kinematic parameters behavior during machining and their impact on the parts geometry to be machined. The dimensional tolerances quality of the machined parts is in some way directly related to the surface condition. Our purpose is to propose a methodology concerning the relationship of the POM system; as Piece-Tool cutting-Machine tool. The field concerned relates to the mechanical parts manufacturing during a turning process. The study is about the determination of roughness and temperature when the workpiece is in contact with the cutting tool.

**Keywords:** Machining processes, modelisation, Vibrations, Cutting tools, Cutting forces, Roughness, Temperature.

## الملخص

حالياً، تخضع جميع قطاعات الصناعة لمنافسة أكبر ما بينها من أجل ضمان الوصول إلى تصنيع قطع ذات جودة عالية و ضمان أقصى عمر ممكن لهاته القطع المصنعة. وبالتالي اتباع نهج سليم ونموذجي لتأثير عملية التصنيع و مراعاة جميع الخطوات اللازمة للوصول إلى احسن منتج ممكن من المادة الخام حتى الوصول على المنتج النهائي بطريقة عملية ومدروسة . نمذجة القطع مهم جدا خصوصا في عمل اللمسة الأخيرة للقطعة والتي تمنح الأسطح اللازمة وهي على العموم عمليات التصنيع .

عملنا، التقدير الرقمي لتصميم القطع الميكانيكية وتأثير شروط القطع على حالة السطح . وهذا ما يسمح لنا بدراسة سلوك الشروط الهندسية والحركية خلال عملية التصنيع وتأثيرها على أبعاد القطع المصنعة، حيث أنّ جودة أبعاد القطع مرتبط مباشرة بحالة السطح.

هدفنا هو اقتراح منهجية بشأن العلاقة بين نظام قطعة / أداة / آلة القطع . المجال المعني يتعلق بتصنيع القطع الميكانيكية خلال عملية الخراطة. وتشمل الدراسة تحديد خشونة ودرجة الحرارة أثناء اتصال القطعة مع أداة القطع.

**كلمات البحث:** طرق تصنيع الآلات، الاهتزاز، جهود القطع، أدوات القطع، خشونة، درجة الحرارة.

## Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	16
<b>ETAT DE L'ART</b> .....	19
<b>CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR L'USINAGE</b>	
1.1. Introduction .....	24
1.2. Le procédé de tournage .....	25
1.2.1. Opération de base dans le tournage .....	25
1.2.2. Les paramètres de coupe .....	26
1.2.2.1. La vitesse de coupe $V_c$ .....	26
1.2.2.2. La profondeur de passe $a_p$ .....	27
1.2.2.3. Vitesse d'avance $V_f$ , avance par tour $f$ .....	27
1.3. Les outils de coupe .....	28
1.4. Usinage à grande vitesse (UGV) .....	29
1.4.1. Facteurs et avantages pour le développement de l'UGV .....	30
1.4.2. Principaux contraintes et inconvénients dans l'UGV.....	31
1.5. Comportement mécanique global du système pièce/outil/machine (POM).....	31
1.6. Modélisation du comportement dynamique du système POM .....	33
1.7. Les vibrations en usinage .....	34
1.7.1. Causes principales des vibrations en usinage .....	35
1.7.2. Types de vibrations .....	35
1.7.2.1. Vibrations forcées .....	35
1.7.2.2. Vibrations auto-entretenues .....	36
1.7.2.3. Régénération de la surface .....	37
1.8. Les aspects technologiques de la coupe .....	38
1.9. Formation du copeau .....	39

1.9.1. Les différentes zones de formation du copeau.....	41
1.10. Définition des forces de coupe .....	42
1.10.1. Influence des conditions de coupe sur les contraintes résiduelles .....	42

## **CHAPITRE 2 : EFFETS THERMIQUES ET MODELES NUMERIQUES ASSOCIES A LA COUPE DES METAUX**

2.1. Introduction .....	44
2.2 .Effets de la température de coupe élevée sur l'outil et la pièce .....	45
2.3. Détermination de la température de coupe .....	46
2.4. Modèles Numériques de la Coupe des Métaux .....	47
2.5. Formulation des modèles .....	47
2.5.1. Approche Lagrangienne .....	47
2.5.2. Approche Eulérienne .....	48
2.5.3. Approche Eulérienne-Lagrangienne Arbitraire (ALE) .....	49
2.6. Maillage .....	49
2.7. Modèles constitutifs de la coupe des métaux .....	51
2.7.1. Modèle de Johnson et Cook.....	51
2.7.2. Loi de Johnson et Cook modifiée.....	51
2.7.3. Modèle de Zerilli et Armstrong (1987).....	52
2.8. Quelques travaux numériques de la coupe des métaux en 2D et 3D .....	53

## **CHAPITRE 3 : MODELISATION DE L'OPERATION D'USINAGE ET OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE**

3.1. Introduction.....	57
3.2. Historique .....	59
3.3. Modèle dynamique .....	60
3.4. Etude de la stabilité de système .....	63
3.4.1.Calcul de la vitesse de rotation de la broche .....	65
3.4.2.Calcul de la profondeur de passe limite ( $b_{lim}$ ) en fonction de la pulsation debroutement.....	65
3.4.3.Calcul du déphasage.....	66
3.5.Etude expérimentale.....	72
3.5.1.Machine outil.....	72

3.5.2. Outil de coupe utilisé .....	73
3.5.3. Appareil de mesure de la rugosité.....	73
3.6. Vérification des résultats de simulation .....	74
3.7. Optimisation des conditions de coupe .....	75
3.7.1. Détermination de la rugosité arithmétique .....	76
3.7.2. Méthode des plans d'expérience .....	76
3.7.2.1. Définition .....	76
3.7.2.2. Notion d'espace expérimental et terminologie .....	78
3.7.2.2.A. Le facteur .....	78
3.7.2.2. B. La réponse .....	80
3.7.2.2. C. Surface de réponse .....	80
3.7.2.3 . Notion de modélisation mathématique et application .....	81
3.8. Méthodes et algorithmes d'optimisation.....	84

## **CHAPITRE 4 : LA SIMULATION NUMERIQUE DU PROFIL DE LA TEMPERATURE AL'INTERFACE OUTIL-COPEAU PAR LES ELEMENTS FINIS**

4.1. Introduction.....	88
4.2. Application au modèle numérique .....	89
4.2.1. ANSYS explicite.....	89
4.3 .Lois de comportement.....	90
4.3.1. Comportement mécanique de la pièce.....	90
4.3.2. Critère d'endommagement de Johnson-Cook .....	91
4.4. Simulation du problème en ANSYS.....	91
4.4.1. Les étapes à suivre pour la modélisation .....	91
4.5. Modélisation de l'outil de coupe .....	93
4.6. Modélisation de la pièce à usiner .....	93
4.7. Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce et de l'outil .....	94
4.8. Conditions aux limites et chargement.....	94
4.8.1. Le modèle thermique 3-D du dispositif de coupe.....	95
4.8.2. Les conditions initiales aux limites.....	96
4.9. Le maillage et la gestion de contact .....	96
4.10. Résultats de la simulation .....	97
4.10.1. Distribution de la température à l'interface outil/pièce/copeau .....	97
4.10.2. Distribution des contraintes à l'interface outil/pièce/copeau .....	99

4.11. Discussion des résultats de la simulation numérique.....	102
4.12. Etude de transfert de chaleur par Ansys thermique transitoire .....	103
4.12.1.Méthode de la résolution .....	103
4.13. Vérification expérimentale (Mesure de la température de contact).....	106
4.14.Modélisation de la température par la méthode des plans d'expériences...109	
4.14.1. Proposition d'un modèle.....	110
4.14.2. Obtention et mesure des réponses .....	111
4.14.3. Analyse des résultats d'essai.....	111
4.14.4.Codage associé aux modèles.....	112
4.14.4.a. Codage du facteur $x_1$ (vitesse de coupe) .....	112
4.14.4.b. Codage du facteur $x_2$ (l'avance).....	112
4.14.5. Estimation des coefficients du modèle .....	112
4.14.6. Modélisation mathématique.....	113
4.14.7.Effet des paramètres de coupe sur la température .....	115
4.14.8.Les courbes d'iso-réponses .....	115
4.14.9.Surface de réponse de la variation de la réponse .....	117
<b>Conclusion Générale</b> :.....	119
<b>Liste des symboles</b> :.....	123
<b>Recherche bibliographique</b> :.....	126
<b>Annexe</b> :.....	135

## Liste des figures

<b><u>Figure 01</u></b> : Les différents niveaux d'étude de la coupe .....	20
<b><u>Figure 02</u></b> : Distribution de la température lors de l'usinage .....	23
<b><u>Figure 03</u></b> : Contact de la pièce à usiner et l'outil de coupe .....	23
<b><u>Figure 1.1</u></b> : Différents éléments permettant de définir le procédé d'usinage .....	24
<b><u>Figure 1.2</u></b> : Opération de chariotage en tournage .....	25
<b><u>Figure 1.3</u></b> : les opérations de base en tournage .....	26
<b><u>Figure 1.4</u></b> : Vitesse de Coupe $V_c$ .....	26
<b><u>Figure 1.5</u></b> :Profondeur de Passe $a_p$ .....	27
<b><u>Figure 1.6</u></b> :Vitesse d'Avance $V_f$ .....	28
<b><u>Figure 1.7</u></b> : Plaquettes .....	29
<b><u>Figure 1.8</u></b> : Vitesses de coupe selon les matériaux usinés .....	30
<b><u>Figure 1.9</u></b> : Les éléments dépendants de l'opération d'usinage.....	32
<b><u>Figure 1.10</u></b> :schéma structural de la coupe dynamique.....	32
<b><u>Figure 1.11</u></b> : Modèles de simulation du procédé de coupe .....	33
<b><u>Figure 1.12</u></b> : Les différents modes de vibration dans un procédé d'usinage .....	34
<b><u>Figure 1.14</u></b> : Causes principales des vibrations en usinage.....	35
<b><u>Figure 1.15</u></b> : Effet régénératif .....	37
<b><u>Figure 1.16</u></b> : Vibrations régénérées .....	38
<b><u>Figure 1.17</u></b> : Interactions entre la machine-outil et les aspects technologique de la coupe.....	39
<b><u>Figure 1.18</u></b> :Micrographie d'un copeau (a) continu (b) discontinu (c) avec arête rapportée .....	40
<b><u>Figure 1.19</u></b> : Formation du copeau en coupe orthogonale.....	41
<b><u>Figure 1.20</u></b> :Contraintes résiduelles en sous couches .....	43
<b><u>Figure 2.1</u></b> :Flux généré à l'interface de contact outil/copeau .....	44
<b><u>Figure 2.2</u></b> : Paramètres ayant une influence sur la température de coupe .....	45

<b>Figure 2.3:</b> Configurations initiale et finale issues du modèle de Kim, Lee et Sin	46
<b>Figure 2.4:</b> Raffinement: (a) maille locale initiale, (b) réduction de la taille de l'élément	50
<b>Figure 2.5:</b> Lissage: (a) maille locale initiale, (b) Réallocation des nœuds	50
<b>Figure 2.6:</b> flux de chaleur après 20 et 180 secondes et la déformation totale par (Pavel KOVAČ,2011)	53
<b>Figure 2.7 :</b> Simulation d'un copeau à 0.9 s.	53
<b>Figure 2.8:</b> la morphologie des copeaux et le champ des contraintes obtenues par Piotr NIESLONY	54
<b>Figure 2.9 :</b> Localisation des trois zones A, B et C dans le plan de cisaillement.	54
<b>Figure 2.10:</b> Distribution de la température pour des vitesses de coupe de (a) 140 m / min; (B) 200 m / min; (C) 260 m / min	55
<b>Figure 2.11:</b> Comparaison de la formation des copeaux prédite et mesurée en 3D	56
<b>Figure 2.12 :</b> distribution de la température par BUCHKREMER	56
<b>Figure 3.1:</b> Exemple de broutement.	58
<b>Figure 3.2 :</b> Schématisation du procédé de tournage (dressage).	61
<b>Figure 3.3 :</b> Etapes utilisées pour une modélisation dynamique d'une opération d'usinage	61
<b>Figure 3.4:</b> Schéma-bloc du modèle dynamique d'usinage à un degré de liberté	64
<b>Figure 3.5 :</b> Organigramme utilisé.	67
<b>Figure 3.6 :</b> réponse impulsionnelle	68
<b>Figure 3.7 :</b> a )La partie réelle de la fonction de transfert pour un système vibrant à un seul degré de liberté.b) magnitude.	69
<b>Figure 3.8 :</b> Evolution de $b_{lim}$ en fonction de $\omega_c$	70
<b>Figure 3.9 :</b> Tracé des lobes de stabilité.	70
<b>Figure 3.10 :</b> Tracé des lobes de stabilité.	71
<b>Figure 3.11:</b> Tour utilisé.	72
<b>Figure3.12 :</b> Outil à pastille utilisé	73
<b>Figure3.13:</b> RugosimètreTR100 Surface Roughness Tester.	73
<b>Figure 3.14:</b> Mise en œuvre des plans d'expériences.	77
<b>Figure 3.15 :</b> Domaine de variation d'un seul facteur	78
<b>Figure 3.16 :</b> Domaine de variation de deux facteurs	79
<b>Figure 3.17 :</b> Points expérimentaux dans l'espace expérimental.	79

<b>Figure 3.18</b> : Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs.....	80
<b>Figure 3.19</b> : Représentation d'une surface de réponse.....	81
<b>Figure 3.20</b> : Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai.....	83
<b>Figure 3.21</b> : Organigramme utilisé .....	86
<b>Figure 4.1</b> : Procédure de la modélisation numérique de la formation des copeaux lors de l'utilisation de logiciel ANSYS Workbench explicite dynamique.....	92
<b>Figure 4.2</b> : Création du modèle sur ANSYS Workbench.....	94
<b>Figure 4.3</b> : modélisation de la coupe orthogonale 3D par Ansys.....	95
<b>Figure 4.4</b> : Méthode appliquée pour le contact outil / pièce.....	97
<b>Figure 4.5</b> : la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ( $V_c=300\text{m/min}$ and $f=0,4\text{mm/tr}$ ).....	98
<b>Figure 4.6</b> : la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ( $V_c=120\text{m/min}$ et $f=0,2\text{mm/tr}$ ).....	99
<b>Figure 4.7</b> : Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises ( $V_c=300\text{m/min}$ and $f=0,4\text{mm/tr}$ ).....	100
<b>Figure 4.8</b> : Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises ( $V_c = 120\text{m / min}$ , $f = 0,2\text{mm / tr}$ ).....	101
<b>Figure 4.9</b> : Détermination des copeaux.....	101
<b>Figure 4.10</b> : Variation de la température à l'interface de contact outil-copeau ( $T_1: V_c = 300\text{ m / min}$ , $f = 0,4\text{ mm / tr}$ ; $T_2: V_c = 120\text{ m / min}$ , $f = 0,2\text{ mm / tr}$ ).....	101
<b>Figure 4.11</b> : Phénomène de transfert de chaleur à l'interface Outil-pièce lors de la découpe de l'acier XC48 pour $V_c = 120\text{m / min}$ , $f = 0,2\text{mm / tr}$ .....	104
<b>Figure 4.12</b> : Phénomène de transfert de chaleur à l'interface Outil-pièce lors de la découpe de l'acier XC48 pour $V_c = 300\text{m / min}$ , $f = 0,4\text{mm / tr}$ .....	105
<b>Figure 4.13</b> : Transfert de chaleur avec couplage thermomécanique a) $V_c = 300\text{m / min}$ , $f = 0,4\text{mm / tr}$ et b) $V_c = 120\text{m / min}$ , $f = 0,2\text{mm / tr}$ .....	105
<b>Figure 4.14</b> : Prédiction et validation expérimentale .....	107
<b>Figure 4.15</b> : Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai.....	110
<b>Figure 4.16</b> : Influences des coefficients du modèle mathématique sous forme d'histogramme et sectorielle.....	114
<b>Figure 4.17</b> : l'effet et interaction de la vitesse de coupe et de l'avance sur la température.....	115
<b>Figure 4.18</b> : courbes d'iso-réponses par intervalles.....	115

**Figure 4.19:** courbes d'iso-réponses exprimant la variation de la température en fonction des paramètres de coupe .....116

**Figure 4.20:** Courbe de réponse exprimant la variation de la température en fonction des paramètres de coupe.....117

## Liste des tableaux

<b><u>Tableau3.1:</u></b> Vérification des résultats dans les conditions de coupe : a,b,c et d.....	7
4	
<b><u>Tableau3.2:</u></b> Les mesures de la rugosité arithmétique de surface $Ra$ .....	83
<b><u>Tableau3.3 :</u></b> Les 3 facteurs ; leurs unités, leurs maximums et leurs minimums...	84
<b><u>Tableau 4.1:</u></b> Paramètres de la loi de comportement de l'acier XC48.....	93
Tableau 4.2 : Critère d'endommagement Johnson-Cook de l'acier XC48.....	93
<b><u>Tableau 4.3:</u></b> Les propriétés thermomécaniques de matériau et de l'outil .....	94
<b><u>Tableau 4.4:</u></b> Comparaison de la distribution de la température expérimentalement et par simulation pour différentes vitesses de coupe et différentes avances.....	107
<b><u>Tableau 4.5:</u></b> Les 2 facteurs ; leurs unités, leurs maximums et leurs minimums.....	111
<b><u>Tableau 4.6:</u></b> Les valeurs codées des facteurs combinées avec les résultats obtenus.....	113

## INTRODUCTION GENERALE

La coupe des métaux occupe une place importante dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière. Quel que soit le type de procédé d'usinage utilisé, il est toujours nécessaire d'obtenir une pièce finie conforme au dessin de définition. Celle-ci doit être de bonne qualité et doit avoir une bonne précision dimensionnelle des formes géométriques. Cette précision est liée directement à la rugosité définie lors de la conception. Aussi, la qualité des états de surfaces est importante et surtout lors des opérations de finition.

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

Ainsi, la coupe des métaux est toujours d'actualité malgré l'arrivée et le développement de procédés concurrents. On peut citer l'électroérosion ou les procédés de fabrication par ajout de la matière.

Pour parler aux différents problèmes rencontrés en pratique, l'amélioration et l'optimisation des moyens de production existants sont devenus une exigence capitale. On peut maintenant modéliser et numériser un procédé d'usinage. On peut aussi prévoir tous les phénomènes pouvant intervenir lors de l'usinage, avant la mise en production de la pièce, en un minimum de temps, et de la manière la plus automatisée possible. Ainsi, on peut prédire les efforts de coupe, le comportement dynamique de la machine-outil ou de la pièce à usiner, la température, les contraintes résiduelles et autres. On peut maintenir les performances des différents procédés au plus haut niveau pour répondre finalement aux exigences de l'industrie mécanique,

Notre étude s'est basée sur une simulation numérique de la coupe des pièces mécaniques et impact des paramètres de coupe sur la géométrie de ces pièces. Le procédé d'usinage utilisé est le tournage. Nous avons opté pour les outils coupants, un procédé d'usinage par enlèvement de matière (avec copeaux) et l'Usinage à Grande Vitesse (UGV).

Ce choix a été sélectionné du fait que leurs avantages sont nombreux.

On peut citer : la réduction des efforts de coupe, la suppression du lubrifiant et une meilleure qualité de la surface à usiner obtenue.

Toutes les parties de notre étude ont été menées de manière similaire, des expériences et des vérifications par des simulations.

### **Plan de travail :**

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 tournage et sur l'usinage à grande vitesse (UGV). Aussi, une introduction sur les notions d'un comportement d'un système POM (Pièce/Outil de coupe/Machine-outil) sera traitée ainsi que le mécanisme de la formation des copeaux et les différentes zones déduites lors du contact de l'outil de coupe avec la pièce à usiner.

Le chapitre II sera consacré au phénomène de la température 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 sur l'apparition des vibrations lors de l'usinage. Ainsi et lors de ce processus, le rôle de la stabilité d'une machine-outil est important du fait que la possibilité d'accomplir l'enlèvement de matière dépend des

domaines favorables comme la puissance, la précision et autres. Le but est l'utilisation de la théorie des lobes de stabilité qui est basée sur un modèle de coupe avec des vibrations régénératives. Une simulation numérique sera étudiée pour obtenir la réponse de machine à des conditions de coupe bien définies. Aussi, et dans ce chapitre, les résultats des simulations dynamiques relatives à l'étude de la stabilité de coupe durant une opération de dressage seront présentés.

Le chapitre IV sera consacré à la modélisation et à la simulation de la formation du copeau en 3D d'une opération de chariotage de procédé de tournage à sec de l'acier XC48. A cet effet, une loi de comportement et d'endommagement de Johnson-Cook sera utilisée dans le but de prévoir la distribution de la température à l'interface outil/copeau. Par la suite, une étude mathématique sera mise en œuvre pour modéliser la température par la méthode des plans d'expériences. Le but est d'optimiser les paramètres de coupe et de montrer l'influence de telles conditions sur le processus de coupe et de déduire laquelle des valeurs de température peut se rapprocher d'une usure nulle qui permet d'augmenter la durée de vie de l'outil de coupe.

La dernière partie concernera les principaux résultats de notre étude.

## ETAT DE L'ART

L'usinage avec ou sans enlèvement de matière a fait l'objet de nombreuses études depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Le but est de :

- Maintenir les performances des différents procédés au plus haut niveau,
- Répondre aux exigences de l'industrie mécanique,
- Améliorer la productivité,
- Réduire les couts de production,
- Etre en conformité avec les normes actuelles de l'environnement.

Malgré l'introduction et le développement de plusieurs procédés concurrents dans l'industrie mécanique, le procédé d'usinage par enlèvement de matière est toujours d'actualité et il est toujours utilisé. Il assure le bon déroulement des opérations d'usinage et la qualité des pièces à usiner. Afin de garantir 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 des propriétés, sont généralement des opérations d'usinage.

Toute pièce usinée est représentée par l'intégrité de sa surface à usiner par un ensemble de caractéristiques permettant de qualifier une surface vis à vis d'une application donnée.

Cette intégrité regroupe les spécifications suivantes :

- Ecoulements fluides.
- Mécaniques,

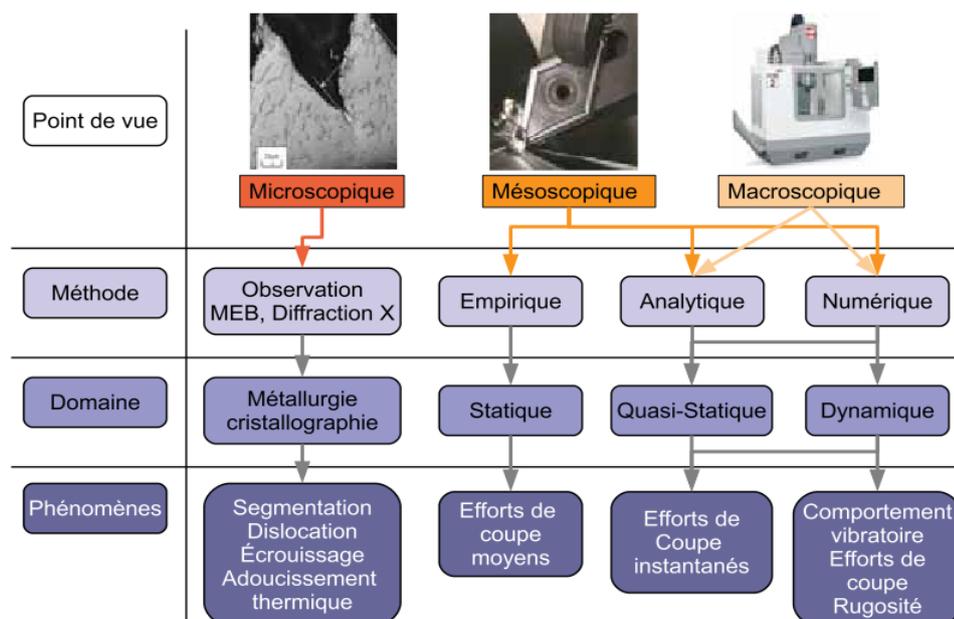
- Métallurgiques,
- Optiques,
- Thermiques,
- Tribologiques,

Aussi, et pour être en conformité avec cette intégrité, de nombreuses expériences ont été réalisées. Par la suite, des simulations numériques furent introduites et utilisées afin de prédire les différents paramètres ayant trait au contact de la pièce à usiner avec l'outil de coupe. De ces paramètres, on peut citer la température, les contraintes résiduelles et autres.

En pratique, une opération de coupe peut être modélisée selon trois méthodes de modélisation:

- La modélisation analytique,
- La modélisation empirique,
- La modélisation numérique. Celle-ci est divisée en trois approches : l'approche Lagrangienne, l'approche Eulérienne et l'approche Arbitraire Lagrangienne Eulérienne qui combine les deux approches.

La figure suivante représente les différents niveaux de coupe :



**Figure 01** : Les différents niveaux d'étude de la coupe [1]

Dans une opération de coupe, on trouve trois différentes échelles qui varient selon le type d'usinage et selon les objectifs à atteindre :

- L'échelle microscopique: interaction entre une géométrie d'outil donnée et le matériau. IL s'agit de déduire certaines propriétés mécaniques, métallurgiques à partir de la structure du matériau (dislocation, fissuration, contraintes résiduelles...). Ces propriétés mécaniques sont, par exemple, les lois de comportement définies aux niveaux des grains.

- L'échelle mésoscopique: description de la formation du copeau. Elle est basée sur une description thermomécanique faisant intervenir les différents phénomènes physiques et métallurgiques, mais à l'échelle de la mécanique des milieux continus pour de grandes déformations (de 1 à 5) et à hautes températures (700°C à 900°C). Ces propriétés mécaniques sont, par exemple, les lois de comportement de type élastoplastique ou encore viscoélastoplastique. A cette échelle, les efforts de coupe sont déterminés au niveau de l'arête de coupe et pièce à usiner sous des conditions de contact avec frottement aux interfaces.

- L'échelle macroscopique: C'est l'échelle des problèmes de rigidité dynamique, de vibrations, liées à la machine dans son ensemble et à la pièce. La modélisation des efforts de coupe constitue donc un chaînon essentiel dans l'établissement d'un modèle de prédiction global du processus de fabrication et de la prédiction de la tenue en service des pièces.

En se focalisant sur l'interface pièce-outil, les efforts de coupe peuvent être reliés aux contraintes résiduelles ou à l'intégrité de surface, en vue de prédire la tenue en fatigue ou la résistance à la corrosion des pièces. Cette connaissance nous permet de concevoir les outils de coupe.

Actuellement, les constructeurs souhaiteraient adapter en pratique les paramètres de coupe dans le but d'obtenir les caractéristiques spécifiées de la pièce.

On peut citer :

- La durée de vie de l'outil,

- L'utilisation de l'Usinage à Grande Vitesse (UGV),
- Stabilité du système POM (Pièce/Outil de coupe/Machine-Outil).

Ces paramètres de coupe s'opèrent par différents moyens :

- Outils coupants,
- Abrasifs,
- Procédés spéciaux : laser, électroérosion, jets d'eau,...

Notre étude s'est basée sur une simulation numérique de la coupe des pièces mécaniques et impact des paramètres de coupe sur la géométrie de ces pièces. Le procédé d'usinage utilisé est le tournage. Nous avons opté pour les outils coupants, un procédé d'usinage par enlèvement de matière (avec copeaux) et l'Usinage à Grande Vitesse.

Ce choix a été sélectionné du fait que leurs avantages sont nombreux.

On peut citer : la réduction des efforts de coupe, la suppression du lubrifiant et une meilleure qualité de la surface à usiner obtenue.

Toutes les parties de notre étude ont été menées de manière similaire, des expériences et des vérifications par des simulations.

Les premiers à avoir travaillé dans ce domaine furent Davies et Insperger [3.5]. Leurs méthodes furent l'utilisation d'une résolution basée sur la discrétion des termes de l'équation dynamique décrivant le système.

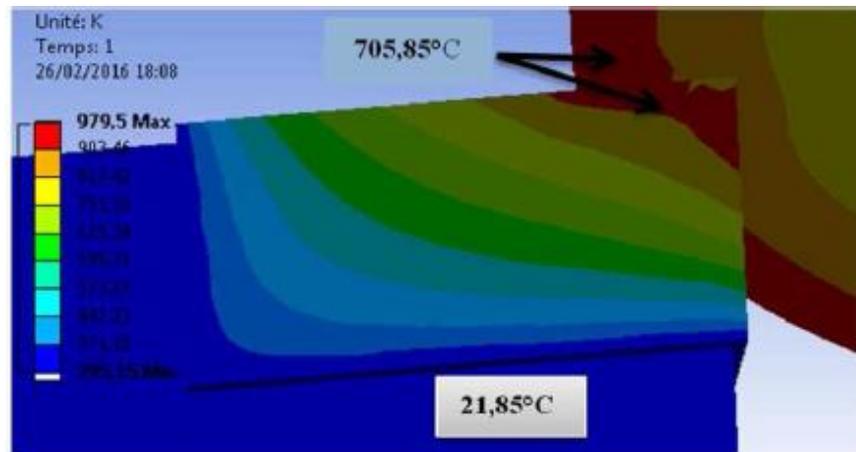
Par la suite, cette approche a été mise en œuvre expérimentalement par Insperger et Wahi. [6.7].

Notre recherche bibliographique nous a permis de déterminer les modèles analytiques ou semi analytiques. Ces modèles ont permis de prédire les paramètres d'usinage comme les efforts de coupe en prenant en compte le cisaillement primaire, les conditions de coupe, les conditions de contact entre la pièce à usiner et l'outil de coupe, et la détermination de la température lors du contact entre ces derniers éléments. [8.12]. Le contact entre la pièce à usiner et l'outil de coupe engendre généralement des déformations plastiques accompagnées d'une forte élévation de température. Les conséquences de ce

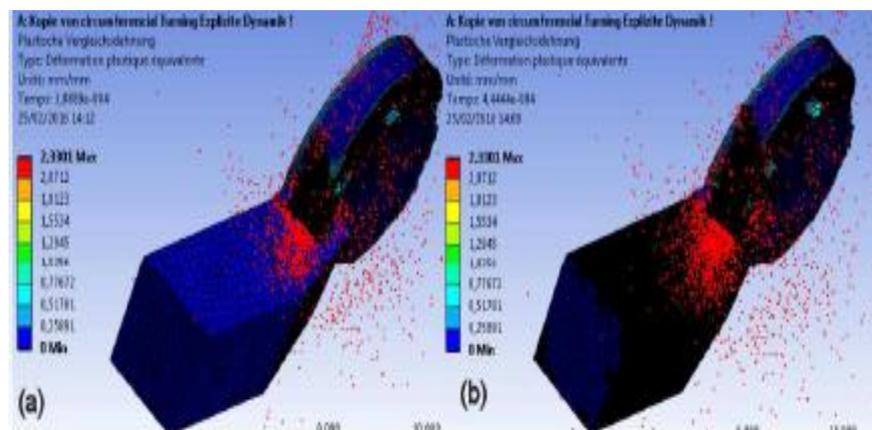
contact est l'usure prématurée de l'outil de coupe [13.16].

Tous ces travaux se sont basés sur le contact entre la pièce à usiner et l'outil de coupe du fait que lors de ce contact, des phénomènes tribologiques prennent forme et leurs déterminations deviennent complexes.

Actuellement, et grâce à ces études, presque tous les paramètres ayant une relation avec le contact de la pièce à usiner et l'outil de coupe peuvent être déterminé par des expériences et validé par la suite par des simulations. Pour notre cas, nous nous sommes basés sur la stabilité du système et la détermination de la température lors du contact de la pièce à usiner avec l'outil de coupe.



**Figure 02 :** Distribution de la température lors de l'usinage [17]



**Figure 03 :** Contact de la pièce à usiner et l'outil de coupe [17]

## CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR L'USINAGE

### 1.1. Introduction :

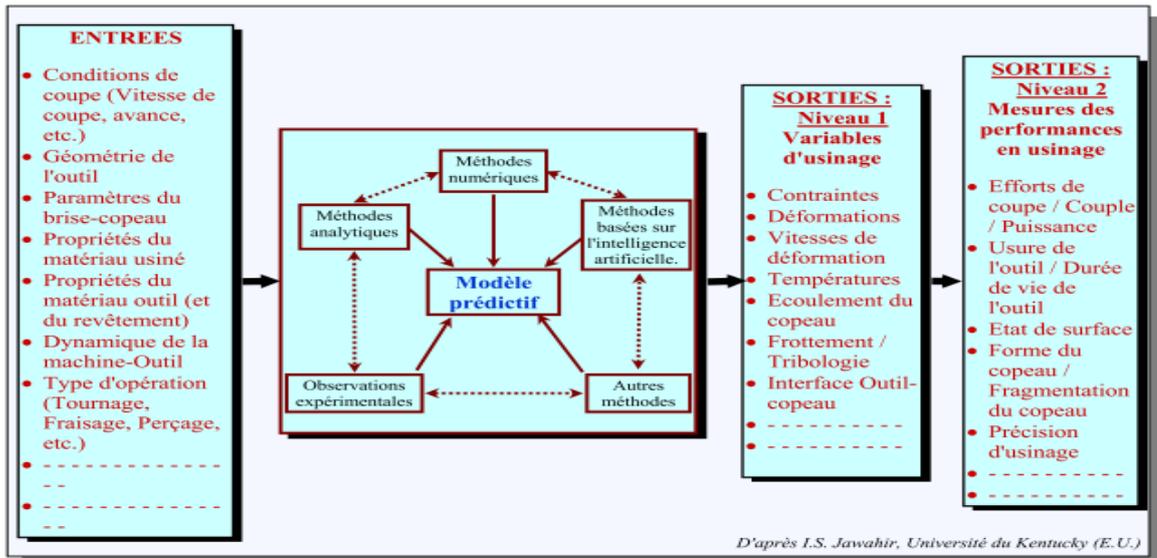
Le but de l'usinage est de donner aux pièces brutes la forme, les dimensions nécessaires, et la pression exigée par le concepteur. Cet usinage doit être conforme au dessin de définition.

En fonction de la forme à donner et du type de la machine-outil, on distingue plusieurs types d'opérations de coupe dont : le tournage, le perçage, la rectification, le fraisage, le rabotage, etc...

La figure (1.1) représente les différents éléments permettant de définir un procédé d'usinage.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse des travaux existants sur l'usinage par enlèvement de matière, et particulièrement le procédé de tournage et l'usinage à grande vitesse.

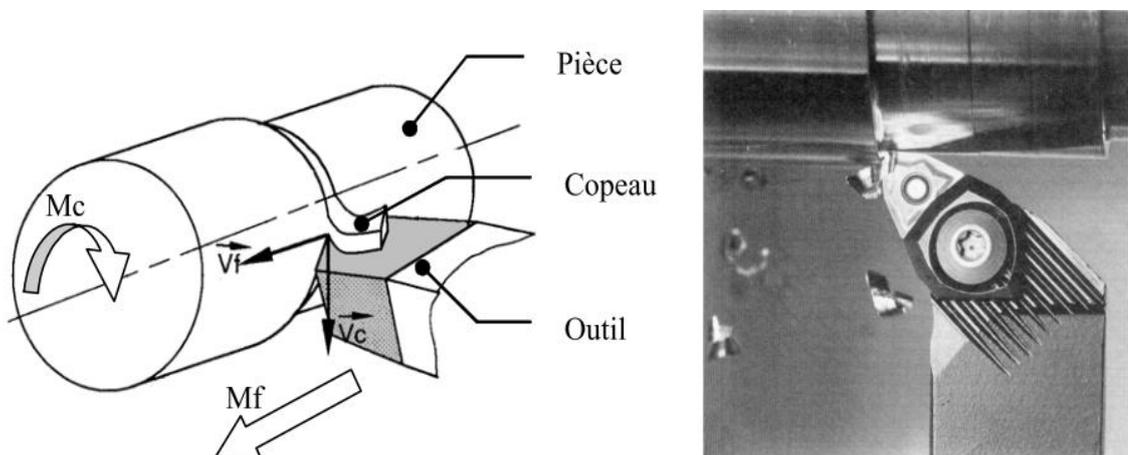
Aussi, nous allons introduire les notions d'un comportement d'un système POM (Pièce/Outil de coupe/Machine-outil). De ce comportement, on peut citer les différents types de vibrations ayant trait au phénomène de broutement régénératif. Une dernière partie concernera le mécanisme de la formation des copeaux et les différentes zones déduites lors du contact de l'outil de coupe avec la pièce à usiner.



**Figure 1.1 :** Différents éléments permettant de définir le procédé d'usinage [18]

### 1.2. Le procédé de tournage :

Le tournage est un procédé mettant en jeu des outils à arête de coupe unique. La pièce à réaliser est animée d'un mouvement de rotation imposé par la machine-outil assimilable au mouvement de coupe (généralement, il s'agit du mouvement principal du procédé). Aussi, l'outil est quant à lui animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance et permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements permet de positionner la partie active de l'outil (arête tranchante de l'outil) et permet d'obtenir des formes de révolution complexes. Bien que les cinématiques du procédé et des outils soient simples, le procédé de tournage est essentiel au vu de l'importance de ses applications dans l'industrie [19].



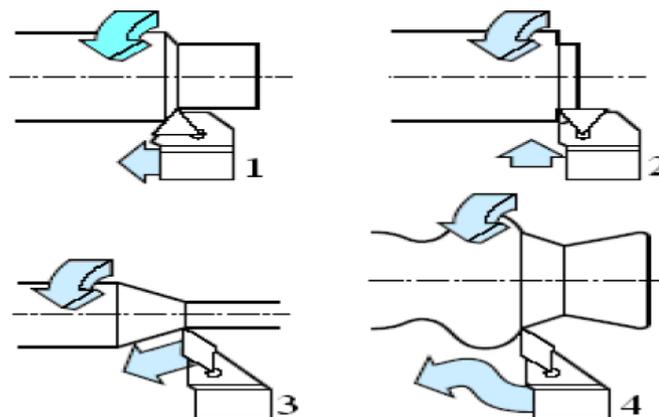
**Figure 1.2:** Opération de chariotage en tournage [20].

### 1.2.1. Opération de base dans le tournage :

En tournage, il existe quatre opérations de base (figure) [21] :

**Tournage longitudinal, où chariotage** : où le mouvement d'avance correspond à une translation rectiligne de l'outil parallèlement à l'axe de révolution de la pièce, ce qui permet de réaliser des cylindres.

- ✓ **Dressage** : Où le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculairement à l'axe de révolution de la pièce, ce qui permet d'ajuster la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe.
- ✓ **Tournage de cônes** : Combine les deux types d'opérations précédentes pour générer des cônes de révolution.
- ✓ **Contournage** : Consiste à imposer une trajectoire quelconque à l'outil, des formes de révolution quelconques peuvent alors réalisées.



**Figure 1.3 :** les opérations de base en tournage [21]

- 1) Chariotage    2) Dressage    3) Tournage des cônes    4) Contournage

### 1.2.2. Les paramètres de coupe :

L'introduction des paramètres de coupe est indispensable pour la suite de l'étude car ils conditionnent la modélisation des phénomènes physiques rencontrés.

#### 1.3.2.1. La vitesse de coupe $V_c$ :

La vitesse de coupe est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du

couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la vitesse de rotation de la pièce[22] .

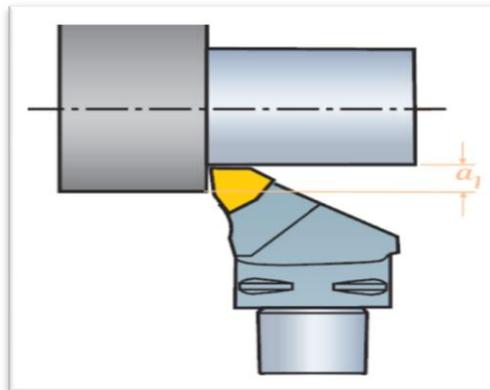


**Figure1.4:** Vitesse de Coupe  $V_c$ .

$$N[tr/min] = \frac{1000 \times V_c[m/min]}{\pi D[mm]} \quad (1.1)$$

### 1.3.2.2. La profondeur de passe $a_p$ :

La profondeur de passe (figure) notée  $a$  en [mm], correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [23].



**Figure1.5:** Profondeur de Passe  $a_p$ .

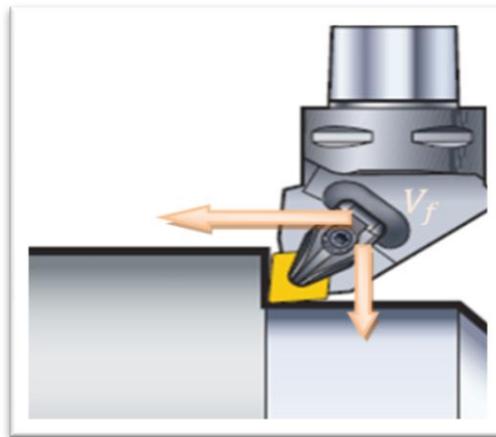
### 1.3.2.3. Vitesse d'avance $V_f$ , avance par tour $f$ :

La vitesse d'avance  $V_f$  [mm/min] est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti.

L'avance par tour  $f$  [mm/tr] est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée.

L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. La vitesse d'avance est égale à :

$$V_f [\text{mm/min}] = f [\text{mm/tr}] \cdot N [\text{tr/min}] \quad (1.2)$$



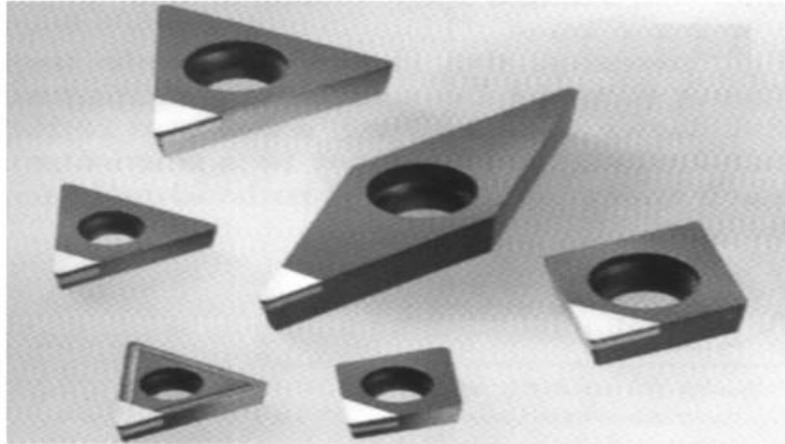
**Figure 1.6:** Vitesse d'Avance  $V_f$ .

### 1.4. Les outils de coupe :

Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe.

Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance. Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants [21]:

- matière de la pièce, usinabilité.
- configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage.
- limitations : tolérances, état de surface.
- machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques.
- stabilité, rigidité de la pièce.

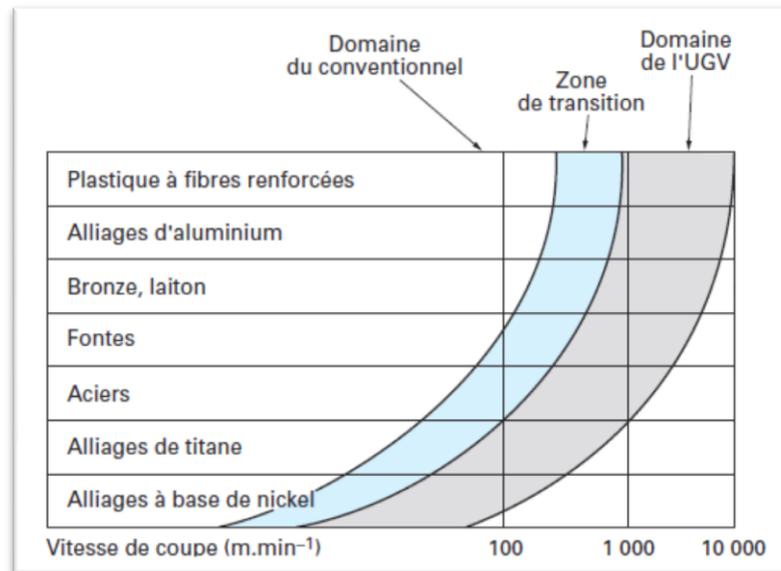


**Figure 1.7:** Plaquettes [21]

#### **1.4. Usinage à grande vitesse (UGV) :**

La mise en forme des matériaux à l'échelle industrielle impose le respect d'un cahier des charges regroupant à la fois des contraintes de coût, de qualité et de délai. Souhaitant améliorer la productivité des gammes de fabrication, les industriels ont, depuis une vingtaine d'années, cherché à accroître les vitesses des procédés de mise en forme. S'il est désormais technologiquement envisageable d'usiner des pièces mécaniques sur de larges plages de vitesses, force est de constater que la forme du copeau obtenu et, par conséquent les propriétés du matériau usiné, diffèrent grandement selon le régime de vitesse employé. En effet, lorsque l'on augmente la vitesse de coupe au-delà des limites de vitesse de l'Usinage Conventionnel (UC), on observe tout d'abord une zone de vitesses inexploitable appelée « Vallée de la mort » dans laquelle les conditions de coupe sont dégradées (usure rapide de l'outil, mauvais état de surface...). Augmenter encore davantage la vitesse de coupe conduit à atteindre un régime, appelé Usinage Grande Vitesse (UGV), dans lequel les propriétés du matériau

sont excellentes. Il est à noter que la limite entre ces zones est arbitraire. Elles sont fonction du matériau à usiner (Figure I.8) mais aussi de l'opération mise en jeu (Fraisage, Tournage...).



**Figure 1.8:** Vitesses de coupe selon les matériaux usinés[24]

#### **1.4.1. Facteurs et avantages pour le développement de l'UGV :**

L'UGV offre des conditions de coupe excellentes, qui découlent des phénomènes de formation du copeau.

Le processus de formation du copeau est principalement basé sur des déformations plastiques de cisaillement pour les métaux. Aux faibles vitesses de coupe, le copeau est continu et ces déformations sont quasi-stationnaires aux faibles vitesses de coupe.

Les phénomènes de coupe qui existent entre la pièce, l'outil et le copeau sont différents de ceux observés en usinage conventionnel. Ils sont dus aux vitesses de coupe élevées. La chaleur dégagée lors du cisaillement du copeau n'a pas le temps de se propager dans la pièce et l'outil. On note que :

- la majeure partie de cette chaleur est évacuée par le copeau : 80 % en UGV et 40 % en usinage conventionnel.
- plus la vitesse de coupe augmente, plus l'énergie spécifique de coupe diminue.

L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne l'augmentation de la vitesse d'avance.

Parmi les avantages de l'UGV, on cite :

- augmentation de la productivité,
- amélioration de l'état de surface,
- conservation de l'intégrité matière,
- amélioration de la précision,
- possibilité d'usinage à sec,
- possibilité d'usiner des aciers traités thermiquement,...

En outre, il y a des problèmes qui sont liés à l'UGV. Ces derniers sont dus aux fréquences de rotation élevées des outils, et des phénomènes d'instabilité dynamique (broutement, vibrations) surviennent régulièrement lors d'opérations d'UGV.

#### **1.4.2. Principaux contraintes et inconvénients dans l'UGV [26]**

**Équipements et outillages plus coûteux :** L'UGV nécessite une machine, une commande numérique, une broche, un porte-outil et des outils spécifiques qui représentent un investissement lourd, 2.5 fois plus cher que le conventionnel.

**Sécurité renforcée :** Les vitesses de coupes en UGV sont souvent grande ce qui est impose une sécurité consolidée durant l'usinage pour protéger l'opérateur.

**Formation spécifique au processus d'Usinage Grande Vitesse :** L'utilisation d'une machine UGV nécessite une formation spécifique des opérateurs.

**Approche différente de l'usinage conventionnel :** Le temps de mise au point peut être plus long qu'en conventionnel. Il est nécessaire de faire une préparation méticuleuse.

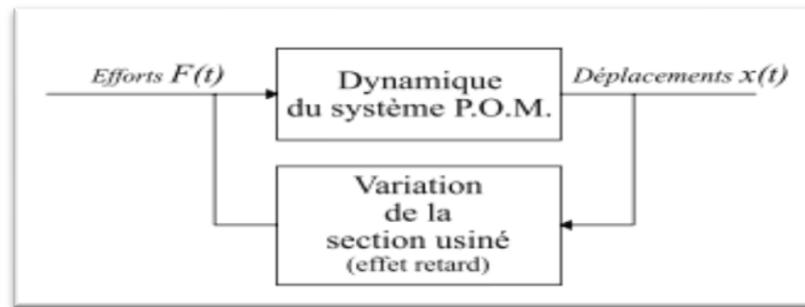
#### **1.6. Comportement mécanique global du système pièce/outil/machine (POM) :**

La machine-outil est un ensemble complexe mettant en œuvre un ou plusieurs procédés, des éléments de structure fixes (bâtis, glissières) ou mobiles (broches et arbres tournants dans des paliers) ainsi qu'une partie commande. La machine-outil est donc un véritable système qui doit être étudié comme tel. Tous les éléments, qu'ils soient actifs ou passifs, interagissent. La machine a un comportement dynamique dont ne saurait rendre compte l'étude séparée de chacun de ses éléments.



**Figure 1.9 :** Les éléments dépendants de l'opération d'usinage

La coupe ,en tant que processus physique ,ferme la boucle qu'elle forme avec la dynamique du système POM (Figure 1.10).Les équations décrivant la génération de la surface usinée remplacent les équations de compatibilité de déformations pour les systèmes mécaniques en général .



**Figure 1.10:** schéma structural de la coupe dynamique

### **1.6. Modélisation du comportement dynamique du système POM :**

D'après B. BENMOHAMMED [27], il est généralement admis que le comportement dynamique du système POM peut être décrit par l'équation :

$$[M].(\ddot{\vec{q}}) + [C].(\dot{\vec{q}}) + [K].(\vec{q}) = (\overline{\vec{F}(t)}) \quad (1.3)$$

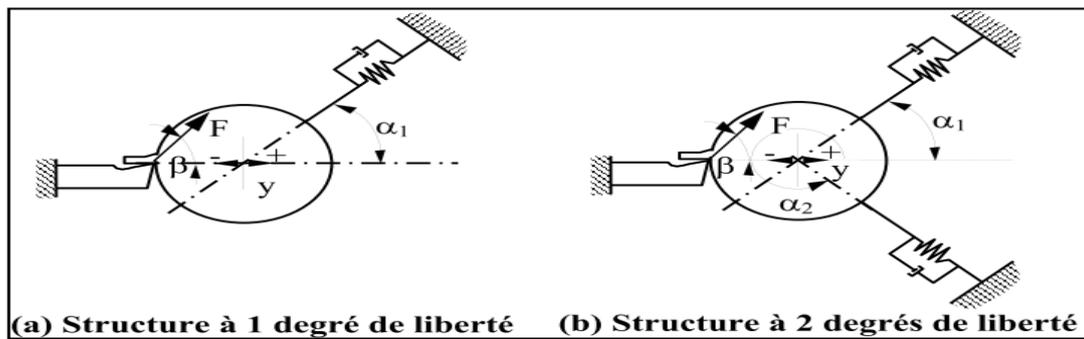
avec  $(\vec{q})$  le vecteur des degrés de liberté du système POM caractérisé par les matrices de masse  $[M]$ , d'amortissement  $[C]$  et de rigidité  $[K]$ . Le deuxième membre dépend directement du modèle de la loi de coupe retenue.

A priori, tous les termes de l'équation varient au cours du temps. Cependant, sous certaines conditions [28], lorsque nous isolons le système mécanique qui est constitué de l'ensemble POM pour modéliser le comportement dynamique du dispositif d'usinage, nous considérons les matrices de masse, d'amortissement et de raideur comme constantes. Ceci simplifie le calcul du premier membre des équations (II.1). Le caractère non linéaire du système différentiel est dû essentiellement à la nature complexe des efforts de coupe, qui implique la relation suivante :

$$(\overline{\vec{F}(t)}) = (\vec{F}(q(t), q(t-T), \dots, \dot{q}(t), \dot{q}(t-T), \dots)) \quad (1.4)$$

Merrit[29] a établi une équation générale permettant la modélisation de la structure d'une machine-outil avec un ou deux degrés de liberté. Dans cette

modélisation, il a considéré que seule la force instantanée de coupe agisse et tende à déplacer la pièce et la structure de la machine-outil (Fig1.11).

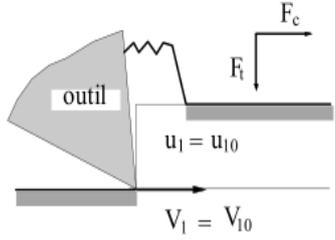
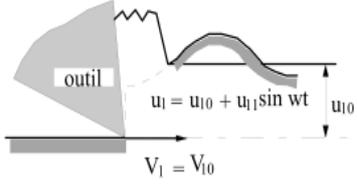
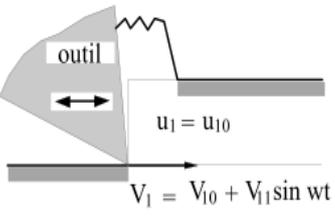
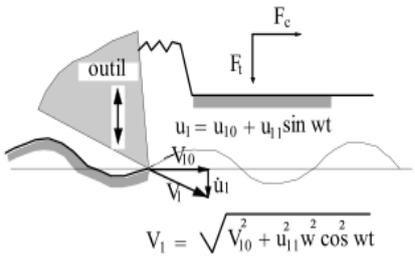


**Figure 1.11:** Modèles de simulation du procédé de coupe [29]

### 1.7. Les vibrations en usinage :

Le phénomène de vibration représente l'une des contraintes qui gênent l'opération d'usinage des pièces. Ainsi, en ébauche les vibrations limitent le débit des copeaux et déstabilisent le processus de coupe. Parallèlement, elles dégradent l'état de surface des pièces en question lors de la phase de finition.

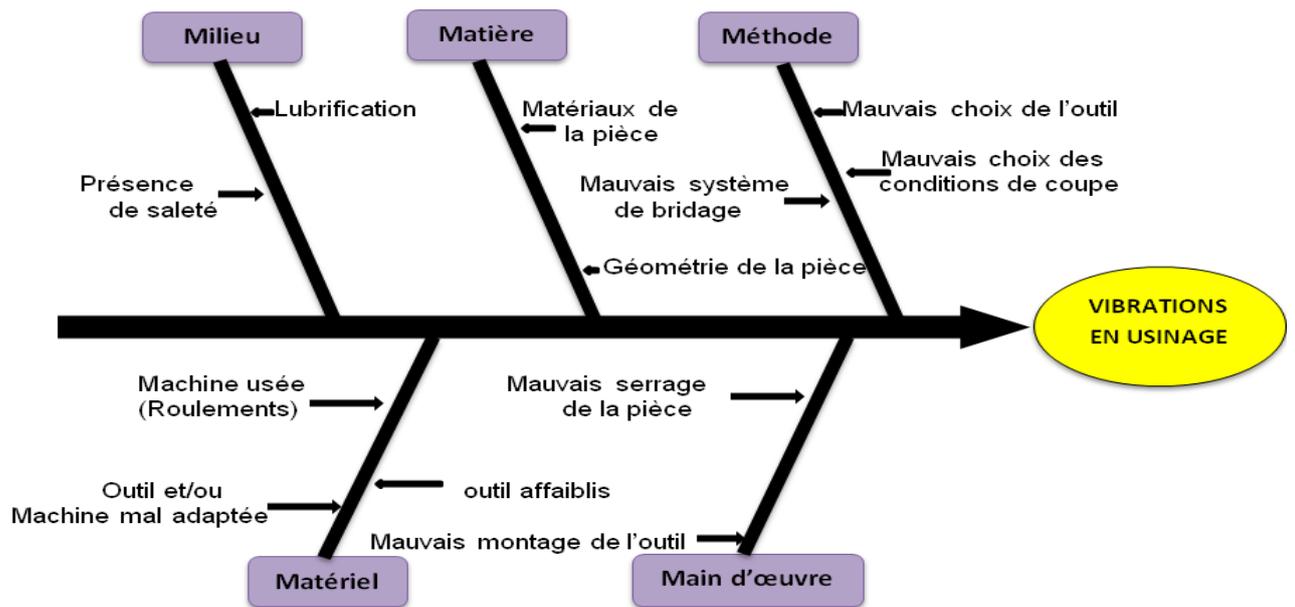
Par ailleurs, malgré la présence de nombreuses études théoriques des phénomènes vibratoires, les issues sur le secteur industriel et économique ont été assez faibles. Ceci revient, d'une part, au manque de moyens de calcul suffisants, et d'autre part, au désintérêt de certains fabricants qui estiment que le sujet est trop difficile à traiter. Par conséquent, ces utilisateurs préféreraient utiliser leur savoir faire ou réagir par des méthodes empiriques plutôt que de choisir des démarches assez contraignantes de modélisation qui nécessitent des investissements coûteux.

		Profondeur de passe $u_1$	
		Constante	Variable
Vitesse de Coupe $V_1$	Constante	<p>coupe stable</p>  <p><math>u_1 = u_{10}</math></p> <p><math>V_1 = V_{10}</math></p>	<p>surface ondulée</p>  <p><math>u_1 = u_{10} + u_1 \sin wt</math></p> <p><math>V_1 = V_{10}</math></p>
	Variable	<p>Vibration de l'outil suivant la direction de la force de coupe <math>F_c</math></p>  <p><math>u_1 = u_{10}</math></p> <p><math>V_1 = V_{10} + V_1 \sin wt</math></p>	<p>vibration de l'outil suivant la direction de la force de répulsion <math>F_t</math></p>  <p><math>u_1 = u_{10} + u_1 \sin wt</math></p> <p><math>V_1 = \sqrt{V_{10}^2 + u_1^2 w^2 \cos^2 wt}</math></p>

**Figure 1.12 :** Les différents modes de vibration dans un procédé d'usinage [29]

### **1.7.1. Causes principales des vibrations en usinage :**

Les vibrations du système POM peuvent se produire sous certaines conditions (Figure 1.14), qui dégradent la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Ces dernières diminuent la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil. Il en existe deux types, les vibrations forcées et les vibrations auto excitées (générées par le processus de la formation du copeau)[30].



**Figure 1.14:** Causes principales des vibrations en usinage

## 1.7.2. Types de vibrations :

### 1.7.2.1. Vibrations forcées :

Elles sont propres à la coupe discontinue comme le fraisage, mais elles peuvent apparaître aussi lors du tournage de pièces n'ayant pas de symétrie de révolution.

Elles résultent de l'excitation périodique de la coupe, qui naît en fraisage suite au passage successif des dents lors d'une excentration de la chaîne cinématique (outil de coupe, plaquette, porte-outils, pièce, broche), ou hétérogénéité de la matière usinée.

Les vibrations forcées peuvent également être provoquées par des irrégularités technologiques des éléments dans l'ensemble de la machine-outil [31].

Peigné [32] et Albrecht [33] introduisent d'autres sources possibles de vibrations forcées comme :

- Des hétérogénéités matière.
- Des irrégularités géométriques de la pièce.

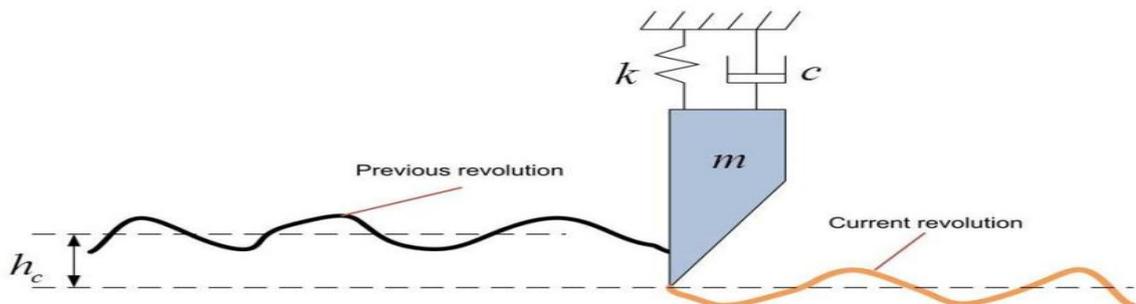
- Des effets de faux-rond et de balourds ; Schmitz[34]a étudié ces effets sur l'état de surface et la stabilité.
  - Une usure excessive ou la casse d'une des dents dans le cas du fraisage.
- Cependant, elles restent secondaires par rapport à l'irrégularité de la coupe, mais ne doivent pas être oubliées dans certaines circonstances comme par exemple :
- Un outil tournant à très grande vitesse en fraisage.
  - Une pièce déformée par le serrage des mors en tournage.

- **1.7.2.2. Vibrations auto-entretenues :**

L'apparition des vibrations auto-entretenues correspond à l'instabilité dynamique de la machine-outil. Les vibrations auto-entretenues sont aussi appelées vibrations régénératives.

Les vibrations à l'interface outil de coupe/copeau, lors de l'usinage sont principalement dues aux variations du frottement à l'interface, au contact sur la face en dépouille de l'outil et aux variations d'épaisseur et de largeur usinée. Ces dernières proviennent de la génération d'une surface ondulée lors de la passe précédente, qui influence le comportement dynamique de l'ensemble outil de coupe/porte-outils lors de la passe suivante.

Le mouvement de l'outil est alors entretenu. La fluctuation des efforts de coupe excite le système. Ces mécanismes se produisent simultanément, sont interdépendants et sont à l'origine des vibrations autoentretenues.



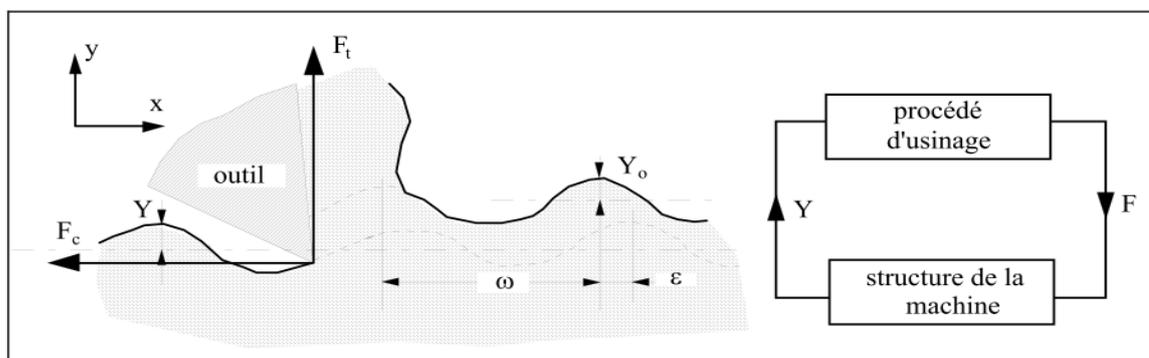
**Figure 1.15:** Effet régénératif : dépendance de la section coupée au passage de l'outil lors du tour précédent[35].

### 1.7.2.3. Régénération de la surface :

Les vibrations régénératives viennent du phénomène de régénération de la surface usinée. Ce phénomène fut mis en évidence dans les années 50 par Tlusty et Polacek[36] et par Tobias et Fishwick[37]. Pour des opérations de tournage en coupe orthogonale, l'arête de coupe est normale à la direction d'avance de l'outil. Cette régénération intervient lorsque l'outil entre en vibration sous l'effet d'une variation de l'effort de coupe (entrée dans la matière, inclusion dans la matière...). Ce mouvement de l'outil se répercute sur la surface usinée qui présente alors une forme ondulée. Lorsque la dent suivante (en fraisage) ou l'outil (en tournage) usine à nouveau cette surface, la hauteur de copeau varie. L'outil est donc soumis à une variation d'efforts de coupe qui vont à nouveau le faire entrer en vibration et générer une surface ondulée (figure 1.16). Le mouvement vibratoire de l'outil va ainsi s'auto-entretenir. Les vibrations vont alors soit s'atténuer, soit s'amplifier.

Si le déphasage qui existe entre la surface précédemment usinée et la surface actuelle générée par l'outil (ou la dent) est suffisamment faible, la section de copeau ne varie pas significativement. La variation d'effort de coupe n'est alors pas suffisante, au regard de la raideur et de l'amortissement de l'outil, pour entretenir les vibrations. Celles-ci vont alors avoir tendance à s'atténuer.

Au contraire, si le déphasage est assez grand, la variation de la section de copeau est suffisamment importante pour que la variation d'efforts de coupe entretienne et amplifie les vibrations jusqu'à ce que l'outil sorte de la matière. Dès lors, la qualité de la surface obtenue est fortement dégradée et l'usure de l'outil augmente anormalement.

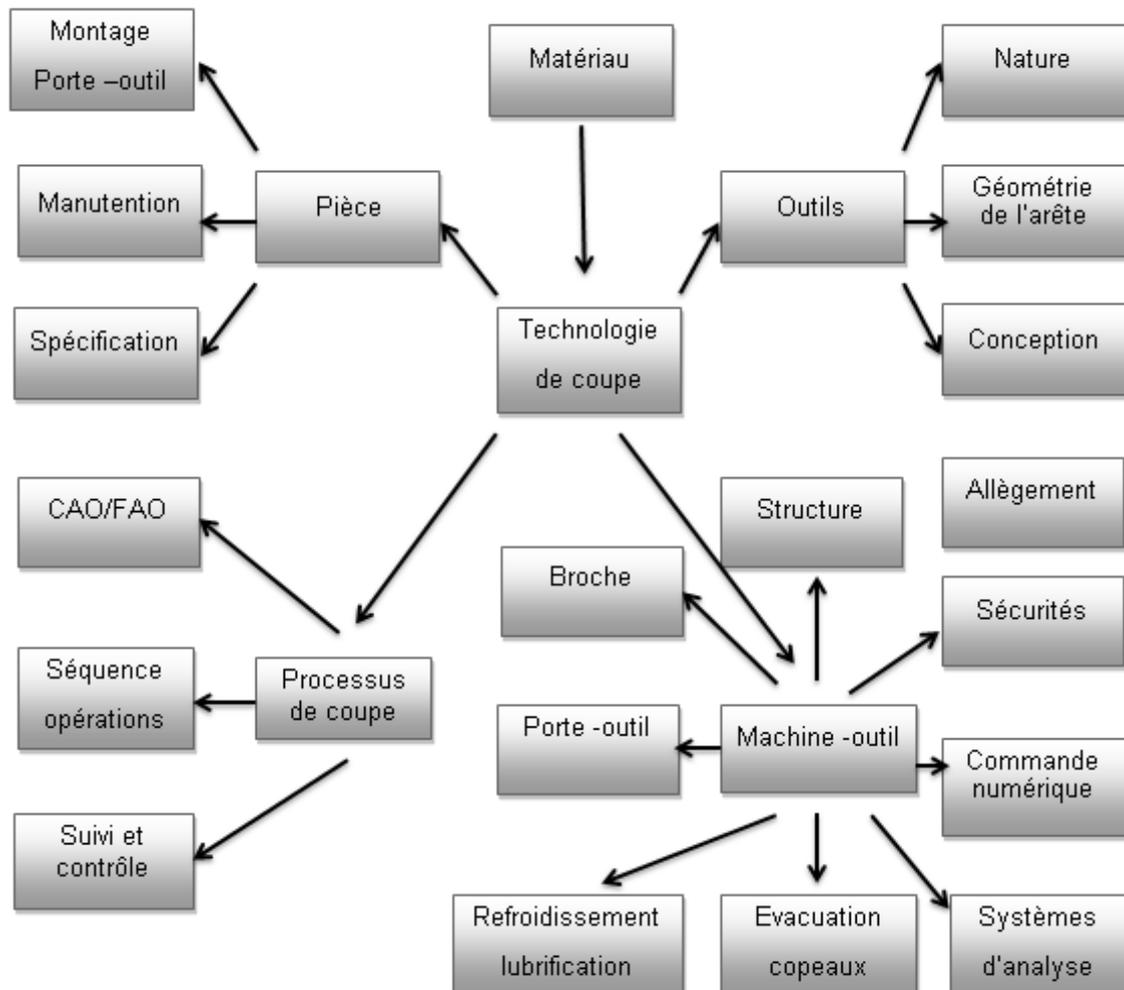


**Figure 1.16:** Vibrations régénérées [38]

### **1.8. Les aspects technologiques de la coupe :**

Les divers procédés qui sont qualifiés de traditionnels, sont, de loin, les plus utilisés. Ils ont acquis une nouvelle jeunesse et une vitalité considérable grâce, en particulier, au développement, dans les années 60, des machines-outils à commande numérique qui regroupent une panoplie d'opérations de coupe comme : centre d'usinage, centre de tournage.... et « Fraiseuses et centres d'usinage ».

L'opération de coupe consiste à transformer une ébauche, constituée d'un certain matériau, en une pièce par l'action d'outils animés d'un mouvement relatif par rapport à la pièce par la machine –outil .La figure décrit de manière synthétique ce processus et ses caractéristiques principales [39].



**Figure 1.17 :** Interactions entre la machine-outil et les aspects technologique de la coupe.

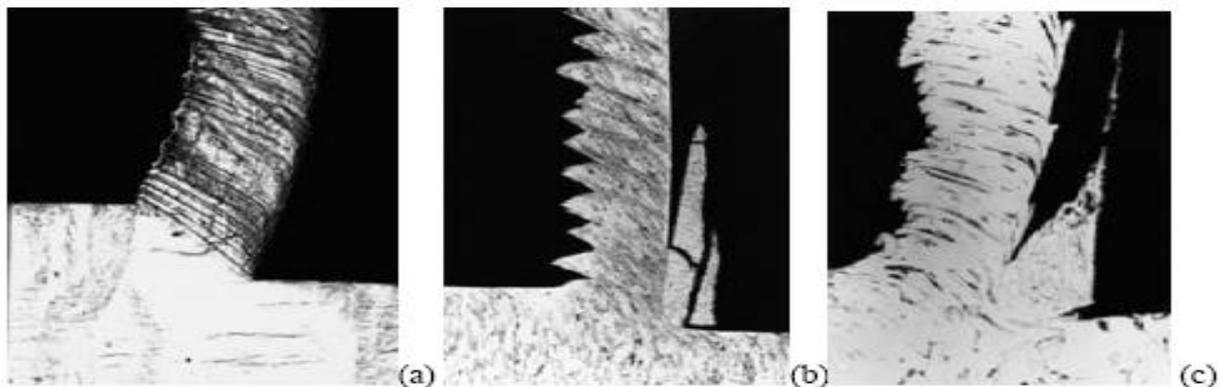
### **1.9. Formation du copeau :**

La coupe (formation du copeau) est un processus physique complexe qui s'accompagne de déformations plastiques et élastiques. Elle donne lieu à un frottement important (outil-pièce), au dégagement de chaleur, à la formation d'une arête rapportée (copeau adhérent sur le bec de l'outil), à l'enroulement et au retrait du copeau, au durcissement de la pièce (surface usinée écrouie) et à l'usure de l'outil (détérioration de la partie active de l'outil).

La formation du copeau joue un rôle important sur la rugosité de la surface usinée. La formation du copeau est un phénomène de déformation élastique et plastique (compression) de la couche cisailée.

Les formes du copeau varient suivant les conditions d'usinage. L'usinage des métaux plastiques (aciers) donne lieu à trois types de copeaux : continu, cisailé et discontinu. On obtient aussi le copeau fragmenté produit par l'usinage de métaux peu plastiques (fontes, bronzes,...).

- ✓ **Copeau continu:** est caractérisé par un processus de déformation plastique dans la zone de cisaillement primaire. La contrainte de cisaillement n'atteignant pas la limite à rupture du métal, le copeau s'écoule de manière continue. C'est la configuration qui, de par sa simplicité, a été la plus modélisée dans la littérature (figure a).
- ✓ **Copeau discontinu:** est caractérisé par sa rupture périodique et par l'apparition de segments. La contrainte de cisaillement atteint, dans la zone de cisaillement primaire, la limite à rupture du matériau et une fissure se propage de la surface de la pièce vers la pointe de l'outil. Il s'agit d'un phénomène cyclique sur lequel nous reviendrons par la suite (figure b).
- ✓ **Copeaux avec formation d'une arête rapportée:** est quant à lui caractérisé par l'apparition d'un amas de matière écrouie sur la face de coupe de l'outil. Cette accumulation forme alors une nouvelle arête de coupe qui donne son nom à cette configuration de copeau. Cette configuration de copeau est rencontrée lorsque les vitesses de coupe sont faibles. Abstraction faite de l'arête rapportée, le copeau en lui-même est en général continu. (Figure c)



**Figure 1.18:** Micrographie d'un copeau (a) continu (b) discontinu (c) avec arête rapportée[40]

Selon différents auteurs [41], le processus de formation de copeau dépend fortement de la rhéologie du matériau usiné comme :

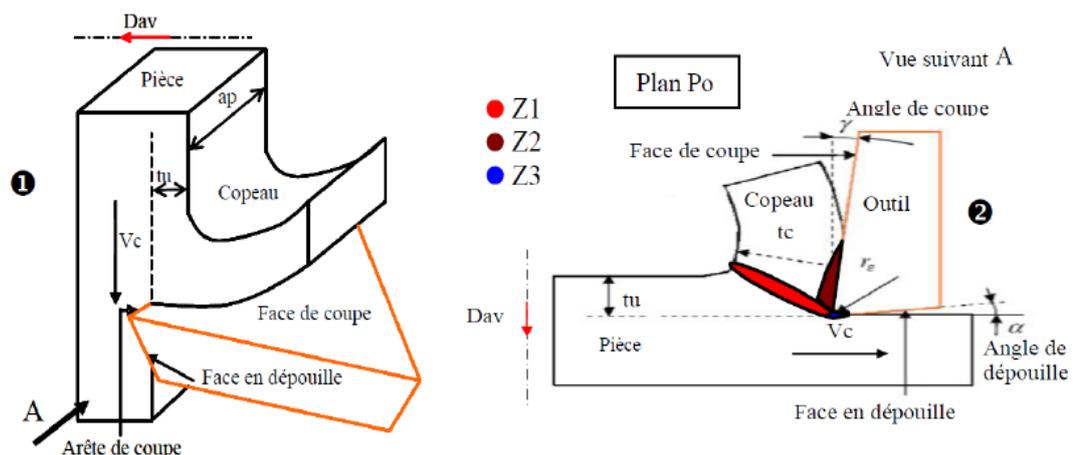
- Les propriétés thermomécaniques du matériau usiné et de l'outil de coupe,
- La géométrie de l'outil de coupe (brise copeau, rayon d'arête, etc....),
- La nature du contact à l'interface outil-copeau (collant ou glissant),
- La nature de l'opération effectuée (fraisage, tournage, brochage, etc....)

### 1.9.1. Les différentes zones de formation du copeau:

La matière à usiner, la géométrie de l'outil, la vitesse de coupe, l'avance et le choix du liquide de coupe influent sur la formation des copeaux.

La formation du copeau pendant l'usinage se fait par cisaillement de la matière dans une petite zone très proche de l'arête de coupe. En modélisation, cette zone est souvent ramenée à un plan, appelé plan de cisaillement faisant un angle  $\phi$  avec la direction de coupe.

Trois zones principales de sollicitations sévères peuvent être distinguées lors de l'usinage. Ces zones sont représentées dans la figure 1.19. il s'agit : la zone de cisaillement primaire (Z1), la zone de cisaillement secondaire (Z2) et la zone de cisaillement tertiaire (Z3) [42].



$ap$  : profondeur de passe ;  $tu$  : épaisseur du copeau non déformé (avance) ;  $tc$  : épaisseur du copeau ;  $Vc$  : vitesse de coupe ;  $Dav$  : direction d'avance ;  $r_e$  : rayon de l'arête ; Z1 : zone de cisaillement primaire ; Z2 : zone de cisaillement secondaire ; Z3 : zone morte ;  $Vc$  : vitesse de coupe

**Figure 1.19:** Formation du copeau en coupe orthogonale

**Zone de cisaillement primaire (Z1):** la formation du copeau se fait principalement dans cette zone sous l'effet du changement de la direction d'écoulement de la matière. Elle est le lieu de grandes déformations plastiques et d'échauffements. Le comportement de cette zone définit la nature géométrique des copeaux. ) [43].

**Zone de cisaillement secondaire (Z2):** correspond à la zone de frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil.

**Zone de cisaillement tertiaire (Z3):** correspond au frottement entre la face en dépouille de l'outil et la surface usinée. Un phénomène de cisaillement est aussi identifié dans cette zone.

### **1.10. Définition des forces de coupe :**

Parmi les grandeurs physiques expérimentales caractérisant une coupe, on peut citer :

- Les efforts de coupe,
- La température,
- Les contraintes résiduelles.

Les efforts résultants de l'interaction de l'outil de coupe et de la pièce proviennent de contraintes. Ils apparaissent dans les zones de cisaillement primaire et secondaire comme le montre la figure (1.19).

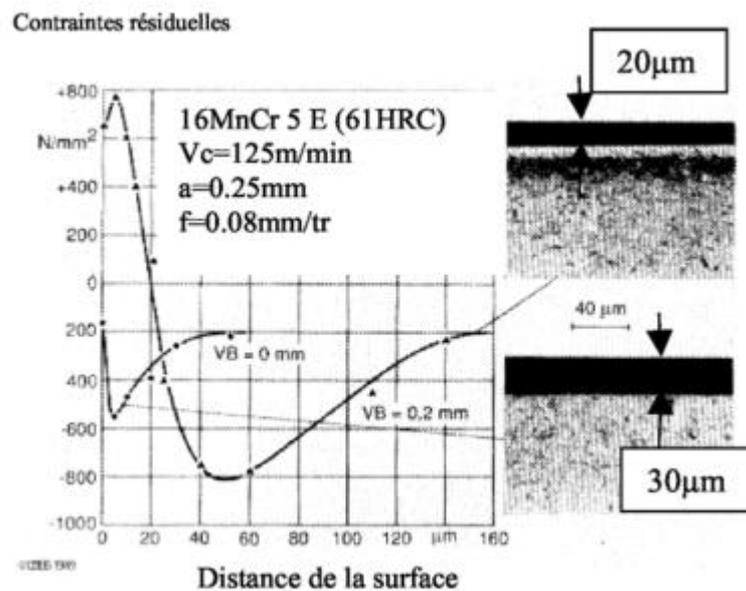
#### **1.10.1. Influence des conditions de coupe sur les contraintes résiduelles :**

Les contraintes résiduelles sont les contraintes provenant de l'absence de toute sollicitation extérieure. Les processus de fabrication sont souvent à l'origine de ces contraintes résiduelles. Les effets de ces contraintes sont souvent préjudiciables. Leurs effets peuvent s'ajouter ou se retrancher aux contraintes de service selon leur amplitude, leur signe et leur répartition. Elles constituent donc un facteur d'endommagement et de mauvaise tenue des pièces à la fatigue.

Lors de l'usinage, une augmentation des vitesses peut conduire à la production de contraintes résiduelles importantes en liaison avec les contraintes

mécaniques élevées générées sur les surfaces usinées. De plus, les forces transversales augmentent avec l'usure des outils. Les températures associées au frottement augmentent en provoquant une contrainte de tractions résiduelles au voisinage de la surface de la pièce usinée et des contraintes de compression dans la zone la plus profonde de la surface.

La figure (1.20) illustre l'effet de l'usure sur les contraintes résiduelles dans la surface usinée en tournage d'un acier allié. On peut observer une couche trempée de  $20\mu\text{m}$  pour un outil vierge et de  $30\mu\text{m}$  et ayant subi une usure correspondante à celle de la couche de la dépeuille de l'outil [44].



**Figure 1.20:** Contraintes résiduelles en sous couches [45]

## CHAPITRE 2

### EFFETS THERMIQUES ET MODELES NUMERIQUES ASSOCIES A LA COUPE DES METAUX

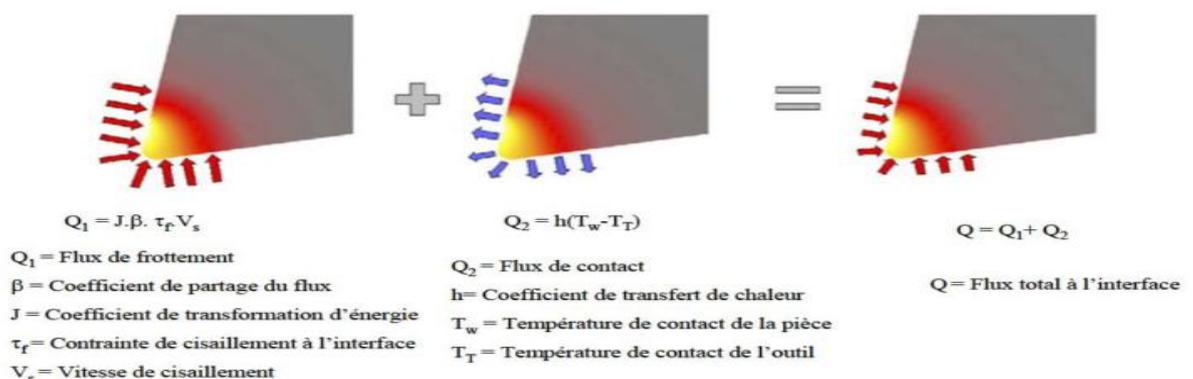
#### 2.1. Introduction :

La température de coupe, générée à l'interface outil - copeau, est le facteur le plus influant sur l'usinabilité des métaux [46].

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 [47].

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[48]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 ( $Q_2$ ) [42].



**Figure 2.1 :** Flux généré à l'interface de contact outil/copeau [48].

## 2.2 .Effets de la température de coupe élevée sur l'outil et la pièce :

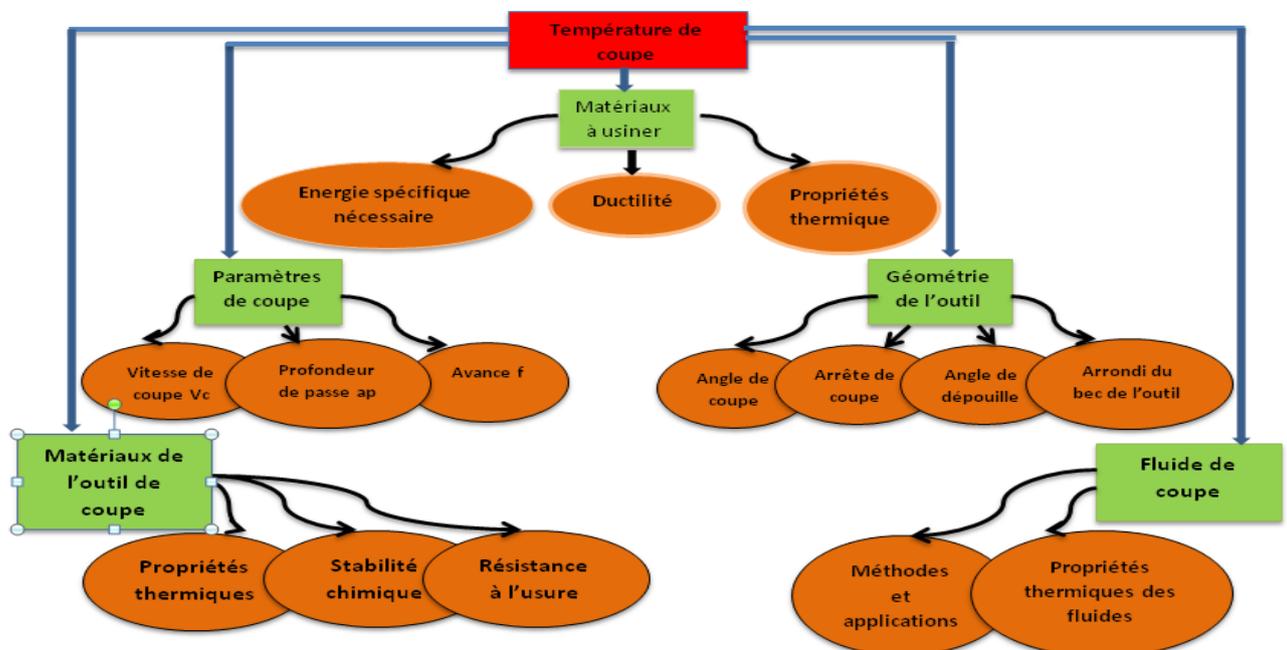
L'effet de la température de coupe, particulièrement quand elle est élevée, est nuisible pour l'outil de coupe et la pièce.

Les effets néfastes sur l'outil de coupe sont :

- L'usure, qui réduit la durée de vie de l'outil de coupe,
- La déformation plastique des arêtes de coupe si le matériau de l'outil n'est pas assez dur,
- Endommagement des arêtes de coupe dus aux chocs thermiques,
- Formation de l'arête rapportée.

Les effets néfastes de la température sur la pièce :

- Le manque de précision des dimensions de la pièce à cause de la distorsion thermique, l'expansion et la contraction durant et après l'usinage.
- Endommagement de la surface par oxydation, corrosion rapide, inflammation.



**Figure 2.2:** Paramètres ayant une influence sur la température de coupe [49]

### **2.3. Détermination de la température de coupe :**

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la température au cours de l'usinage [50]. On peut citer : L'utilisation de thermocouples, la thermographie infrarouge, l'analyse métallographique, l'utilisation de poudres fines à température de fusion constante et l'emploi de peintures thermosensibles.

Les thermocouples s'utilisent de deux façons :

- Thermocouples de faibles dimensions insérés dans l'outil de coupe.
- Thermocouple naturel formé par la pièce et l'outil eux-mêmes.

Les thermocouples sont les plus utilisés mais ils restent imprécises et ne permettent d'obtenir qu'une température moyenne à l'interface outil-copeau. Pour avoir une information complète sur la distribution de la température, d'autres techniques doivent être envisagées. Il est possible de remonter à la distribution de température dans l'outil à partir d'analyses métallographiques effectuées sur l'outil après usinage. La méthode s'appuie sur la relation qui existe entre la dureté, la microstructure et la température atteinte dans les différents endroits de l'outil. Cette méthode permet de mesurer des températures avec une précision de  $\pm 25$  °C. La mise en œuvre de cette technique est longue et délicate. Cette dernière n'est employée que pour des outils de coupe en acier rapide [51].

La technique de thermographie infrarouge est également utilisée pour mesurer les champs de température dans les zones de coupe. Dès 1961, le dispositif photographique proposé par Boothroyd a permis d'obtenir le champ complet de température sur l'outil, le copeau et la pièce. Les caméras infrarouges sont de plus en plus employées pour mesurer la température et sa distribution, [52.55]. Néanmoins, ces techniques nécessitent un appareillage sophistiqué et doit être rigoureusement calibré. Les méthodes employées ne sont encore capables d'assurer des résolutions spatiales et temporelles acceptables ce qui rend l'exploitation des mesures difficile. En plus des techniques expérimentales, des méthodes analytiques et numériques ont été élaborées [56]. Parmi ces dernières, les méthodes des éléments finis sont les plus répandues. L'estimation du flux de chaleur et de la température en usinage peut être également abordée par la résolution de problème inverse de conduction de chaleur dans l'outil. Cette approche consiste à identifier les paramètres d'une loi liant le flux appliqué à l'outil

et la température mesurée par des capteurs placés en un ou plusieurs points proches de l'arête de coupe [57].

#### **2.4. Modèles Numériques de la Coupe des Métaux :**

La modélisation numérique de la coupe devient de plus en plus performante notamment grâce aux avancées de la technologie informatique (puissance des machines).

L'intérêt majeur de la simulation numérique est de modéliser le processus de la formation du copeau, elle permet aussi de tenir compte des sollicitations thermiques et mécaniques dans l'ensemble outil/pièce/copeau et de leurs interactions comme:

- Le frottement à l'interface de contact outil/pièce,
- La température à l'interface de contact,
- La déformation,
- Les contraintes de Von-Mises.....etc.

#### **2.5. 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 (ArbitraryLagrangian - Eulerian (ALE)).

##### **2.5.1. 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.

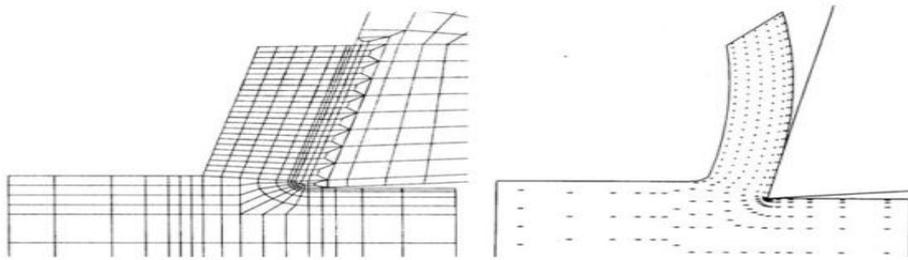
Cette description à certaines qualités pour l'application au problème de la coupe. Le traitement des conditions aux limites de surface libre est simple. Il est possible de suivre une grandeur attachée à une particule de l'écoulement. Les deux principales difficultés associées à cette approche sont d'une 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 [58.61] .

### **2.5.2. 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 [62.63] 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.



**Figure 2.3:** Configurations initiale et finale issues du modèle de Kim, Lee et Sin [63]

### **2.5.3. Approche Eulérienne-Lagrangienne Arbitraire (ALE) :**

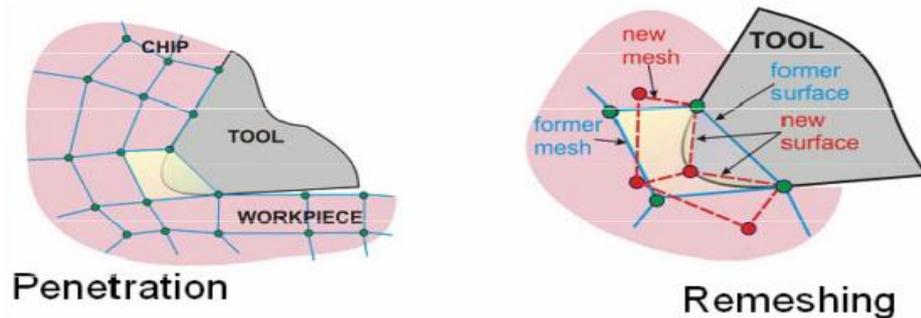
Cette approche est un compromis entre les approches Eulerienne et Lagrangienne. Elle repose sur l'utilisation d'un maillage mobile partiellement indépendant des points matériels. Le maillage est globalement Lagrangien, au sens où il est nécessaire que sa frontière suive la surface du domaine occupé par 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.

### **2.6. 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.

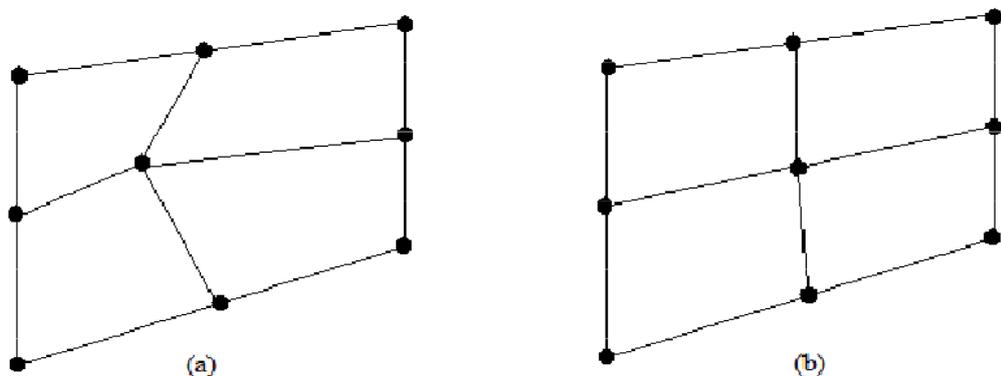
Les mailles initiales des EF ne peuvent pas maintenir leur forme générale et peuvent se détruire à cause des différentes déformations plastiques durant la coupe des métaux ou le formage du métal. La distorsion due au non linéarité, conduit à des erreurs numériques. Pour résoudre ce problème, une nouvelle maille FE doit être générée dans la manière à changer l'ataille, 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)[64].



**Figure 2.4:**Raffinement: (a) maille locale initiale, (b) réduction de la taille de l'élément[65]

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 [64].



**Figure 2.5:**Lissage: (a) maille locale initiale, (b) Réallocation des nœuds[66]

## **2.7. Modèles constitutifs de la coupe des métaux :**

Il existe divers codes de calculs (DEFORM, ANSYS ,Ls –DYNA , ABAQUS, FORGE, THIRDWAVE PRODUCT ADVANTEDGE ...), disponibles pour les simulations numériques des procédés d'usinage.

L'un des plus importants sujets sur la coupe des métaux est la modélisation de l'écoulement des contraintes des matériaux lors de l'usinage, celui-ci dépend des déformations, températures,...et peut être représenté par des formes mathématiques d'équations constitutives, parmi ces modèles les plus largement utilisés dans la simulation de la coupe des métaux sont : le modèle de Oxley, Johnson Cook, Zerilli Armstrong et Ramberg-Osgood[64].

### **2.7.1. Modèle de Johnson et Cook[67]:**

La loi de comportement de Johnson-Cook [67] est très utilisée dans les simulations numériques de procédés dynamiques notamment dans l'usinage.

Le modèle de Johnson-Cook [67] exprime la contrainte équivalente sous forme d'une fonction de 3 constantes du matériau :  $\bar{\epsilon}^p$  La déformation plastique  $\dot{\bar{\epsilon}}$  La vitesse de déformation.

$$\sigma = (A + B(\bar{\epsilon}^p)^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right)^m \right] \quad (2.1)$$

$T$  désignant la température. La loi de comportement de Johnson-Cook nécessite la connaissance de 5 paramètres :  $A, B, C, n$  et  $m$ . Les paramètres  $A, B$  et  $n$  sont liés au comportement élasto-plastique du matériau,  $C$  permet de décrire la sensibilité à la vitesse de déformation et  $m$  représente la sensibilité du matériau à la température. Les températures  $T_{amb}$  et  $T_0$  désignent une température de référence et une température de fusion.

### **2.7.2. Loi de Johnson et Cook modifiée[68]:**

Une modification de la loi de Johnson et Cook a été développé par (Marusich et Ortiz, 1995) [69]. Elle consiste à découpler la plage des vitesses de déformation

en deux domaines pour prendre en compte la modification de la sensibilité à la vitesse aux hautes vitesses de sollicitations. Le comportement est alors défini par:

$$\sigma = (A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right)^m \right] \text{Pour } \dot{\varepsilon} \leq \dot{\varepsilon}_t \quad (2.2)$$

$$\sigma = (A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n) \left( 1 + \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{(C_1 - C_2)} \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{C_2} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right)^m \right] \text{Pour } \dot{\varepsilon} \geq \dot{\varepsilon}_t \quad (2.3)$$

Avec :

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

### **2.7.3. Modèle de Zerilli et Armstrong (1987):[70]**

Le modèle de ZERILLI-ARMSTRONG (1987) [70], adopté très largement de la théorie régissant le mouvement des dislocations dans un matériau, propose une expression de la contrainte d'écoulement  $\sigma$  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 :

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

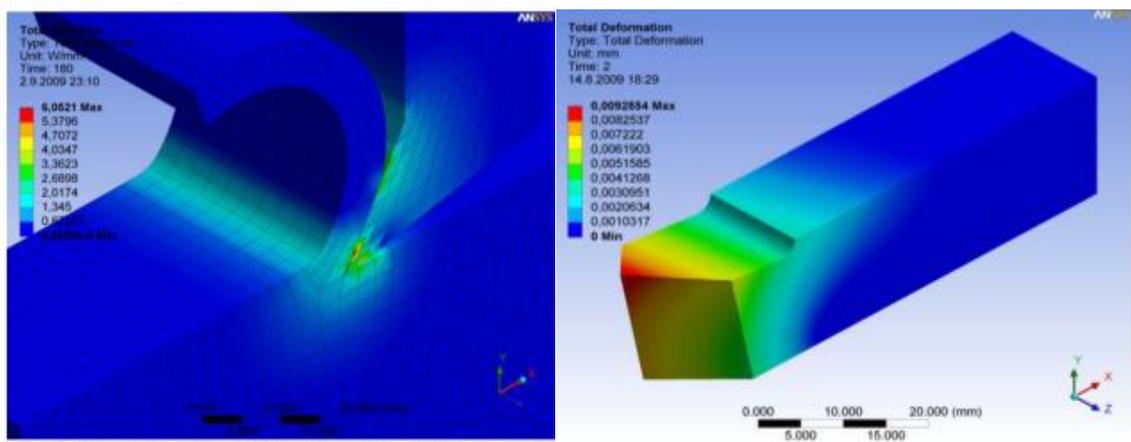
Dans le cas d'un matériau cubique centré :

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

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

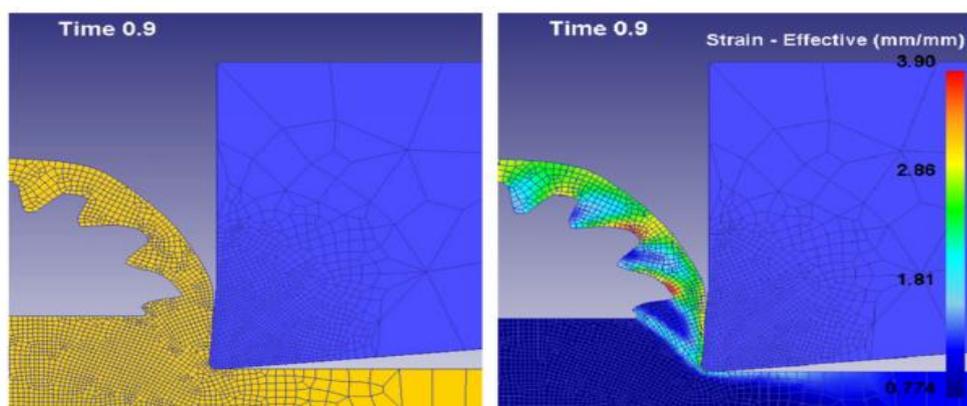
## 2.8. Quelques travaux numériques de la coupe des métaux en 2D et 3D:

- Pavel KOVAČ [71] a utilisé la MEF pour modéliser en 3D les phénomènes de coupe mécaniques et thermiques durant une opération de tournage par le logiciel ANSYS Workbench afin de déterminer le flux de chaleur et d'obtenir les informations à propos de la durée de vie de l'outil du fait qu'il est l'un des facteurs les plus importants à tester .



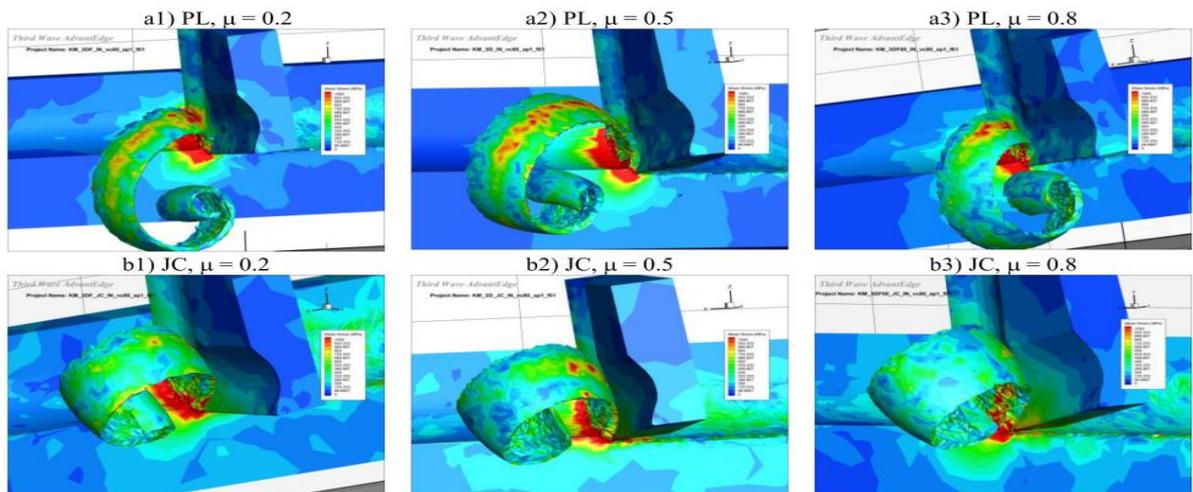
**Figure 2.6:** flux de chaleur après 20 et 180 secondes et la déformation totale par (Pavel KOVAČ,2011) [71]

- Elio Chiappini (2014) [72] a modélisé la formation des copeaux par de la méthode des éléments finis (FEM) de Ti- 6Al-4V dans l'usinage à grande vitesse et l'usinage à vitesse constante(CSM) pour prédire les forces de coupe, les températures de coupe et de la morphologie des copeaux.



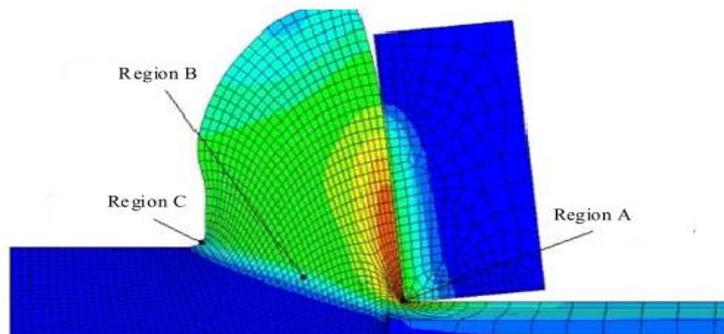
**Figure 2.7 :**Simulation d'un copeau à 0.9 s[72]

Piotr NIESLONY (2015) [73] a effectué une analyse expérimentale des aspects tribologiques de l'alliage 718 par la méthode des éléments finis, les simulations comprennent les forces de coupe et la température de coupe par l'utilisation des différents modèles (PL et JC) [73] .



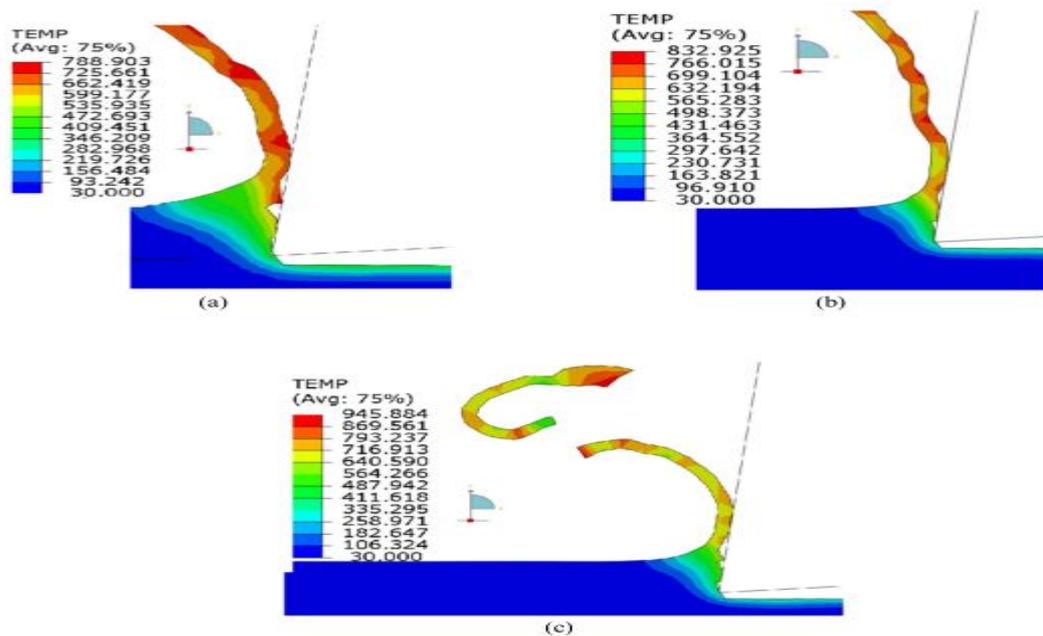
**Figure 2.8:** la morphologie des copeaux et le champ des contraintes obtenues par Piotr NIESLONY[73]

M.B. Guemmour (2015) [74] a simulé la formation des copeaux en 2D par la MEF afin d'étudier la répartition de la température, les déformations et les forces dans la zone de coupe de l'acier AISI 4340 avec le logiciel Abaqus®. Le modèle a montré que la température la plus élevée est générée à l'interface outil / copeau dans la zone de cisaillement primaire. L'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe jouent des rôles importants dans la génération de la chaleur à l'interface outil/pièce /copeau.



**Figure 2.9 :** Localisation des trois zones A, B et C dans le plan de cisaillement [74]

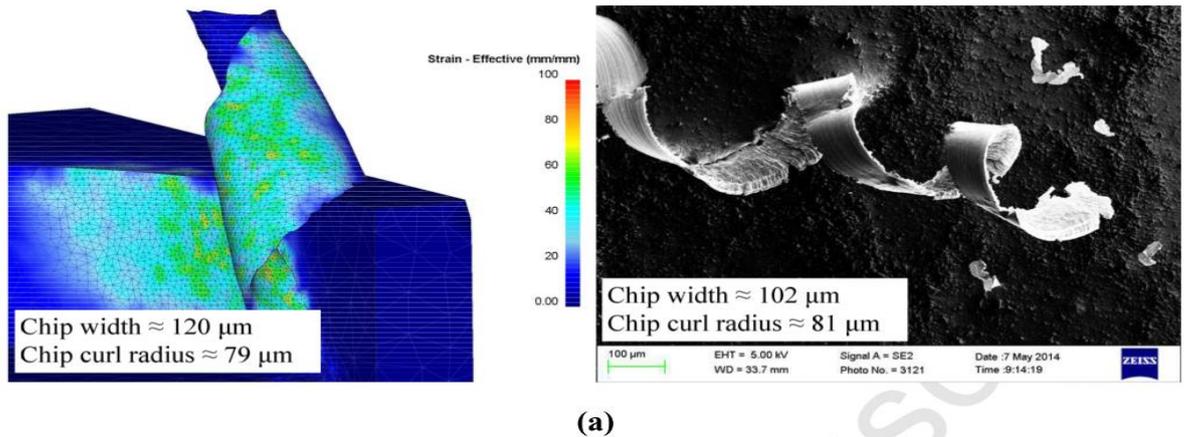
- Un modèle numérique a été créé par P.S. Bapat (2015) [75] pour obtenir la répartition de la température pendant une opération de tournage d'un acier dur AISI 52100 par le logiciel commercial ABAQUS explicite avec la méthode Lagrangienne-Eulérienne arbitraire (ALE), le modèle de Johnson Cook a été utilisé pour modéliser les propriétés du matériau de la pièce à usiner. Une série de simulations thermiques a été menée pour obtenir la valeur et la région de la température maximale à diverses conditions de coupe.



**Figure 2.10:** Distribution de la température pour des vitesses de coupe de (a) 140 m / min; (B) 200 m / min; (C) 260 m / min [75]

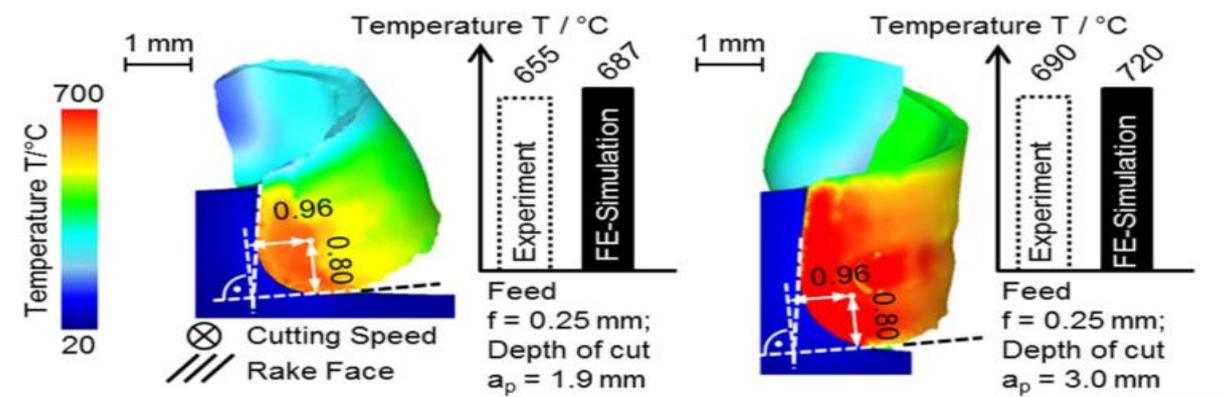
THEPSONTHI (2015) [76] a modélisé et simulé en 3D en utilisant la MEF la formation des copeaux lors d'une opération de fraisage pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V.

Les forces de coupe 3D, la température de coupe et les distributions d'usure des outils ont été développées par le logiciel de simulation DEFORM.



**Figure 2.11:** Comparaison de la formation des copeaux prédite et mesurée en 3D[76]

Un autre travail a été effectué par (S. Buchkremer, 2016) [77], il a traité la simulation numérique de la formation des copeaux par la MEF lors d'une opération de tournage de l'acier 1045, il a proposé une nouvelle procédure d'étalonnage non itérative qui décrit les relations entre la géométrie de l'outil à la rupture et l'état thermomécanique sur la surface libre du copeau.



**Figure 2.12 :** distribution de la température par BUCHKREMER[77]

## CHAPITRE 3

# MODELISATION DE L'OPERATION D'USINAGE ET OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE

### 3.1. Introduction :

L'apparition des vibrations pendant l'usinage par enlèvement de matière est l'un des problèmes importants dans l'industrie, du fait qu'il a des effets néfastes sur l'état de la surface de la pièce à usiner, sur la productivité et sur la rentabilité :

- Baisse de la durée de vie de l'outil,
- Usure prématurée de certains éléments de la broche comme les roulements et les paliers,
- Etc.,[78]
- De même, le broutement de la machine-outil provoque un bruit.Ce dernier entraîne des dommages sur l'outil et sur la stabilité du système POM.

Lors de l'usinage, le rôle de la stabilité d'une machine-outil est important du fait que la possibilité d'accomplir l'enlèvement de matière dépend des domaines favorables :

- des conditions opératoires : vitesses de rotation de la pièce et de déplacement de l'outil, profondeur de passe,
- de puissance,
- de précision,
- d'état de surface pour la pièce usinée.

La théorie des lobes de stabilité est basée sur un modèle de coupe avec des vibrations régénératives. Elle permet en usinage de déterminer une profondeur pour une vitesse de rotation désignée. Le but est d'éviter l'instabilité. Celle-ci apparaît après quelques opérations d'usinage.

La simulation numérique a pour but d'obtenir la réponse de machine à des conditions de coupe bien définies, sans passer par la réalisation d'essais expérimentaux.

L'utilisation de cette théorie est adaptée lors du procédé de tournage car les efforts de coupe sont constants en fonction du temps.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations dynamiques relatives à l'étude de la stabilité de coupe durant une opération de dressage.

Pour tracer les lobes de stabilité, on doit calculer la fonction de transfert obtenue par des propriétés de simplification des schémas bloc ou par un calcul direct.

Plusieurs méthodes sont appliquées pour déterminer la stabilité. On peut citer le critère de Nyquist [79], Routh[80].

De ces critères, on utilisera le cas où la pièce est considérée flexible et l'outil suffisamment rigide en utilisant le critère de Nyquist[79] pour prédire la stabilité et étudier l'influence des paramètres de coupe sur l'apparition du broutement.

Les programmes ont été réalisés et simulés avec le logiciel Matlab. Ce démonstrateur permet de valider le modèle et les algorithmes que nous avons employé. Nous avons, pour chaque paramètre (masse, raideur, amortissement, conditions de coupe) fait varier leurs niveaux dans une plage de valeurs prédéfinies en vue de connaître l'évolution de la stabilité en tournage.

Les résultats sont présentés sous une forme graphique liant les vitesses de rotation de la pièce (tr/min) et la profondeur de passe (mm).



**Figure 3.1:** Exemple d'un phénomène de broutement

### **3.2.HISTORIQUE :**

Des nombreuses études ont été faites sur la théorie des lobes de stabilité[81] ,[82.83]. A cet effet, des modèles mathématiques ont été créés et développés pour la prédiction de la qualité de surface et pour supprimer le broutement pendant l'usinage.

Notre recherche bibliographique nous a permis de déterminer plusieurs ensembles de modélisations existantes dans les différents procédés d'usinage par enlèvement de matière. Ainsi, plusieurs modèles mathématiques permettant la reproduction fidèle de la structure géométrique des surfaces usinées ont été développées. Ces modèles sont établis sur la base d'une description géométrique de la surface usinée et sont fonction des différents paramètres géométrique et cinématique de la coupe. La plupart de ces études se sont concentrées sur la coupe orthogonale (arête de l'outil perpendiculaire à l'écoulement du copeau) [84]. Ces modèles une fois mis au point, permettent l'étude de l'état de surface des pièces usinées et leurs variations en fonction des différents paramètres de coupe qu'ils soient géométriques où cinématiques. On peut noter que le modèle n'introduit pas d'interaction entre le calcul des efforts et la construction de la surface, donc pas de prise en compte de la flexion de l'outil due aux efforts de coupe. Or, la flexion de l'outil est un paramètre influant de manière importante sur la texture de la surface finale. On peut noter que la prise en compte de celle-ci est facilement intégrable dans l'approche développée. Historiquement, les vibrations de ce système sont connues depuis le début des années 1960. De nombreuses études ont été faites à cet effet. On peut citer : Tobias [37] et Tlusty[85]. Ils ont réussi à expliquer les causes de ces vibrations autoentretenues dans le cas de la coupe orthogonale appliquée au tournage. Par la suite, Merrit[86] a développé la boucle de retour permettant de représenter l'effet retard qui est actuellement utilisé unanimement par la communauté. Les résultats obtenus sont à la base de la théorie des lobes de stabilité car elle permet de sélectionner pour une vitesse de rotation fixée de choisir une profondeur de coupe axiale afin d'éviter l'instabilité. Le développement de cette méthode est très bien adapté au cas du tournage car les efforts de coupe sont constants en fonction du temps.

La notion de lobes de stabilité permet donc de visualiser de manière graphique les zones où l'usinage est stable en fonction des paramètres utilisés [87] :

- profondeur de passe,
- vitesse de rotation,
- Etc....

Dans un premier temps, les études sur le sujet ne concernaient que la coupe dynamique . Le système outil broche et pièce est modélisé par un système masse ressort amortissement. Le principe de cette modélisation analytique sera expliqué sur le modèle du tournage.

### **3.3.MODELE DYNAMIQUE :**

Lors de l'usinage, la stabilité de la machine-outil utilisée a un rôle important. De cette importance, dépend la possibilité d'accomplir l'enlèvement de matière dans des domaines favorables de conditions opératoires. Celles-ci sont : la vitesse de rotation de la broche et du déplacement de la pièce, la profondeur de passe, la puissance sélectionnée, la précision et l'état de surface de la pièce usinée.

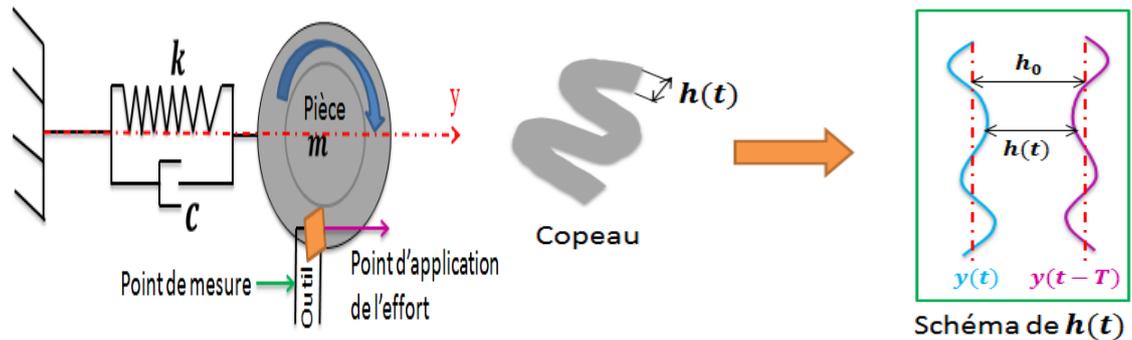
L'objectif de notre travail est de déterminer les zones stables et instables du système en fonction des paramètres de coupe utilisés. Notre système utilisé est modélisé par un ensemble masse/ressort et ou les caractéristiques du système dynamique sont la masse ( $m$ ), l'amortissement ( $c$ ) et la raideur ( $k$ ).

Notre expérience consiste en une opération de dressage du procédé de tournage. On a choisi cette opération du fait que la majorité des travaux scientifiques traite d'autres opérations comme par exemple celle du chariotage. Notre expérience s'est déroulée au niveau de l'atelier d'usinage de notre département de mécanique.

Les essais de coupe ont été réalisés sur un tour parallèle de marque Heckert, de type DZFG 200 et d'une puissance absorbée de 5.5 KW. La matière de la pièce cylindrique de dimensions 30x100mm est de l'acier XC 48. Notre travail, entièrement basé sur des essais de coupe avait pour but d'établir une corrélation entre les paramètres de coupe et la géométrie de l'outil avec des grandeurs modélisées (efforts de coupe, usure, qualité de la surface usinée,...).

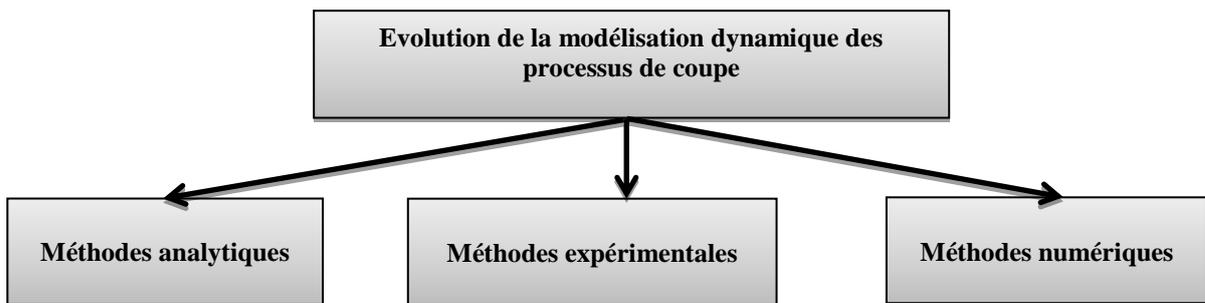
De cette expérience et afin de caractériser le système usinant, une modélisation, uniquement valable pour les conditions de coupe, de l'outil et de l'opération de

coupe, fut déterminée. Dans ce cas, le système est supposé n'admettre qu'un degré de liberté. Depuis les premières études sur le sujet, cette approche a été abordée et détaillée par plusieurs personnes dont Altintas et Segreti. [88.89]. L'approche analytique va être détaillée dans ce paragraphe pour le tournage orthogonal. Notre modèle dynamique est représenté dans la figure 3.2 [90].



**Figure 3.2 :** Schématisation du procédé de tournage (dressage)

Les étapes utilisées pour la modélisation dynamique de notre opération de dressage, représentées dans la figure suivante, ont été effectuées conformément aux travaux d'Ehmann [91].



**Figure 3.3 :** Etapes utilisées pour une modélisation dynamique d'une opération d'usinage

La figure 3.2 permet de représenter le comportement dynamique le plus simple d'une structure qui se repose sur un modèle masse -ressort-amortisseur.

A partir de cette figure, on obtient l'équation dynamique suivante :

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_f(t) \quad (3.1)$$

L'étude se porte sur un système à un degré de liberté. [88]

La force dans la direction d'avance peut être exprimée comme suit :

$$F_f(t) = K_f b h(t) \quad (3.2)$$

Avec :

$F_f(t)$  : Effort d'avance [N] ;

$K_f$  : Effort de coupe [MPa] ;

$b$  : Largeur de copeau [mm] ;

$F_f(t)$  : Effort de coupe linéaire [N] ;

$h(t)$  : Epaisseur instantanée du copeau [mm] ;

Calcul du Laplacien de l'épaisseur de coupe instantanée :

En introduisant la fonction de Laplace sur l'équation de l'épaisseur de coupe instantanée, on obtient :

L'expression de l'épaisseur instantanée du copeau  $h(t)$  est donnée par :

$$h(t) = h_0 + [y(t - T) - y(t)] \quad (3.3)$$

Avec :

$h_0$  : Épaisseur de copeau nominale [mm] ;

$T$  : Période de révolution de la pièce en tournage ou la période de passage de dents en fraisage [s] ;

$[y(t - T) - y(t)]$  : Variation de l'épaisseur du copeau [mm].

Donc :

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = K_f b (h_0 + [y(t - T) - y(t)]) \quad (3.4)$$

En appliquant le domaine de Laplace, l'équation devient :

$$\begin{aligned} ms^2 y(s) + csy(s) + ky(s) &= k_f b [h_0 + (e^{-sT} - 1)y(s)] \\ y(s)[ms^2 + cs + k] &= F_f(s) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Tel que :

$$F_f(s) = K_f b h(s)$$

$$\frac{y(s)}{F_f(s)} = \frac{1}{[ms^2 + cs + k]} = \Psi(s) \quad (3.6)$$

$$\Leftrightarrow y(s) = F_f(s) \cdot \Psi(s)$$

Les paramètres du système à un degré de liberté (1ddl) sont :

- Pulsation propre du système  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$
- Le coefficient d'amortissement  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{k.m}}$

$$\Psi(s) = \frac{1}{[ms^2 + cs + k]} = \frac{1/m}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}}$$

On multiplie par  $\frac{k}{k}$  ;

La fonction de transfert du système à 1 degré de liberté  $\Psi(s)$  est définie par :

$$\Psi(s) = \frac{\omega_n^2}{k[s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2]} \quad (3.7)$$

### 3.4. ETUDE DE LA STABILITE DE SYSTEME :

La recherche de la stabilité du système s'effectue par l'étude du rapport entre l'épaisseur du copeau non déformée  $h_0$  et l'épaisseur moyenne du copeau  $h(s)$ .

Pour le cas où la pièce est flexible et l'outil est considéré rigide, on va calculer la fonction de transfert analytiquement puis la stabilité est calculée de façon analytique. On se place toujours dans les cas d'une coupe orthogonale. On va ensuite développer des critères de stabilité par un calcul analytique et par la suite simuler.

La stabilité de la stabilité du système s'effectue par l'étude du rapport entre les transformées de Laplace de l'épaisseur du copeau non déformée  $h(0)$  et l'épaisseur instantanée du copeau  $h(s)$ .

La détermination de  $\frac{h(s)}{h_0}$  :

$$h(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1)y(s) \quad (3.8)$$

Avec :

$$y(s) = F_f(s) \cdot \Psi(s)$$

et  $F_f(s) = K_f b h(s)$

$$h(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1).K_f b h(s)\Psi(s)$$

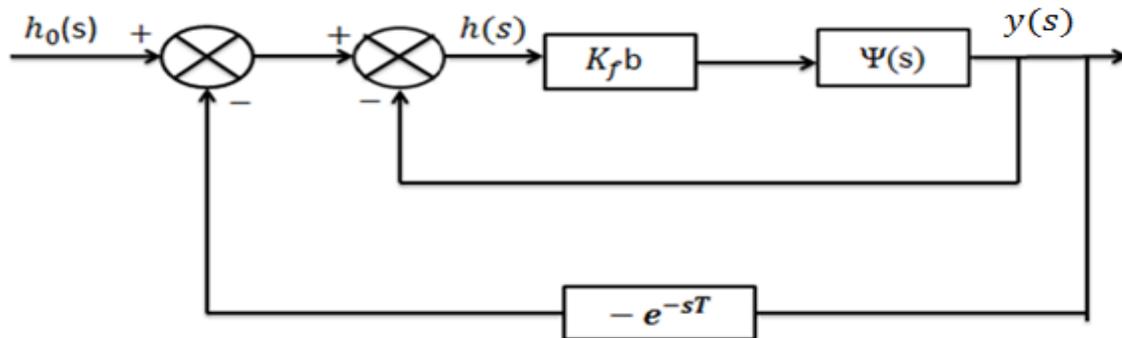
$$\Leftrightarrow h_0 = h(s) - (e^{-sT} - 1).K_f b h(s)\Psi(s)$$

$$\Leftrightarrow h_0 = h(s). [1 + (1 - e^{-sT}).K_f b\Psi(s)]$$

Ceci mène finalement à la relation suivante:

$$\Leftrightarrow \frac{h(s)}{h_0} = \frac{1}{[1+(1-e^{-sT}).K_f b\Psi(s)]} \quad (3.9)$$

Cette équation nous permet de modéliser le comportement dynamique du procédé de tournage sous forme d'un diagramme représenté ci-dessous :



**Figure 3.4:** Schéma-bloc du modèle dynamique d'usinage à un degré de liberté[81]

La stabilité de cette fonction de transfert dépend de ses pôles  $s = \sigma + j\omega_c$  qui est une racine complexe de l'équation caractéristique associée à l'équation (9).

Dans le cas où  $\sigma$  est positif, la transformée inverse de Laplace de la racine comporte un terme  $e^{-|\sigma|t}$ , ce qui nous amène à une amplitude tendant vers l'infini : le système sera donc instable.

Par contre, si  $\sigma$  est négatif, la transformée inverse de Laplace de la racine possède un terme en  $e^{-|\sigma|t}$  ; le système sera stable.

Pour obtenir la frontière de stabilité, il faut prendre  $\sigma=0$ . La résolution de l'équation caractéristique en ce point permet d'obtenir la largeur de coupe limite (blim).

En régime critique  $s = j\omega_c$  et  $b = b_{lim}$ .

$$[1 + (1 - e^{-j\omega_c T}).K_f b\Psi(j\omega_c)] = 0 \quad (3.10)$$

Le système global peut être décomposé selon la relation suivante :

$$\text{Soit } \Psi(j\omega) = G + jH \quad (3.11)$$

On obtient :

$$1 + k_f b_{lim} [G(1 - \cos\omega_c T) - H(\sin\omega_c T)] + j(k_f b_{lim} [G\sin\omega_c T - H[1 - \cos\omega_c T]]) = 0 \quad (3.12)$$

En considérant la partie imaginaire de l'équation (11),

$$\Leftrightarrow (k_f b_{lim} [G\sin\omega_c T - H[1 - \cos\omega_c T]]) = 0 \quad (3.13)$$

$$G\sin\omega_c T = H[1 - \cos\omega_c T]$$

$$\frac{H(\omega_c)}{G(\omega_c)} = \frac{\sin\omega_c T}{1 - \cos\omega_c T} = \tan \left[ \frac{\omega_c T}{2} + \frac{3\pi}{2} \right] = \text{tang}\varphi$$

Où l'on introduit  $\varphi$ , le déphasage dû au système.

D'où :

$$\frac{\omega_c T}{2} + \frac{3\pi}{2} = \varphi + \lambda\pi k \in \mathbb{Z} \quad (3.14)$$

### **3.4.1. Calcul de la vitesse de rotation de la broche**

On cherche ici à exprimer la vitesse de rotation .

$$N = \frac{60}{T} = \frac{60\omega_c}{3\pi + 2\varphi(\omega_c) + 2k\pi} \lambda \in \mathbb{Z}$$

D'où :

La vitesse de rotation est exprimée en fonction de la pulsation de broutement et le déphasage  $\varphi$ :

$$N(\omega_c) = \frac{60\omega_c}{3\pi + 2\varphi(\omega_c) + 2k\pi} \quad (3.15)$$

### **3.4.2. Calcul de la profondeur de passe limite ( $b_{lim}$ ) en fonction de la pulsation de broutement**

L'expression de la profondeur de passe limite ( $b_{lim}$ ) provient de la partie réelle de l'équation caractéristique:

$$b_{lim} = \frac{-1}{2kG(\omega_c)} \quad (3.16)$$

Avec :

$$G(\omega_c) = \text{Re}(\Psi(j\omega_c))$$

$\omega_c$  : Pulsation de broutement (pulsation de vibration du système).

### **3.4.3. Calcul du déphasage**

Le déphasage est exprimé par le nombre d'ondes, il est donné par la formule suivante :

$$f_c T = \frac{f_c}{n} = \lambda + \frac{\varepsilon}{2\pi} \quad (3.17)$$

**Avec :**

$\frac{\varepsilon}{2\pi}$ : Fraction exprimant le taux du déphasage;

$\varepsilon$ : Déphasage entre l'onde actuelle et l'onde précédente,

Dans le cas où  $\varepsilon$  est nul ou un multiple de  $2\pi$  le nombre d'onde est un entier, l'épaisseur de coupe sera constante, on parle alors de parallélisme de deux ondes vibratoires des surfaces générées.

Par contre, dans le cas contraire on est devant un cas de broutement qui atteint la valeur maximale pour le cas où ce déphasage est égal à  $\pi$ .

Pour plusieurs cycles, on a :

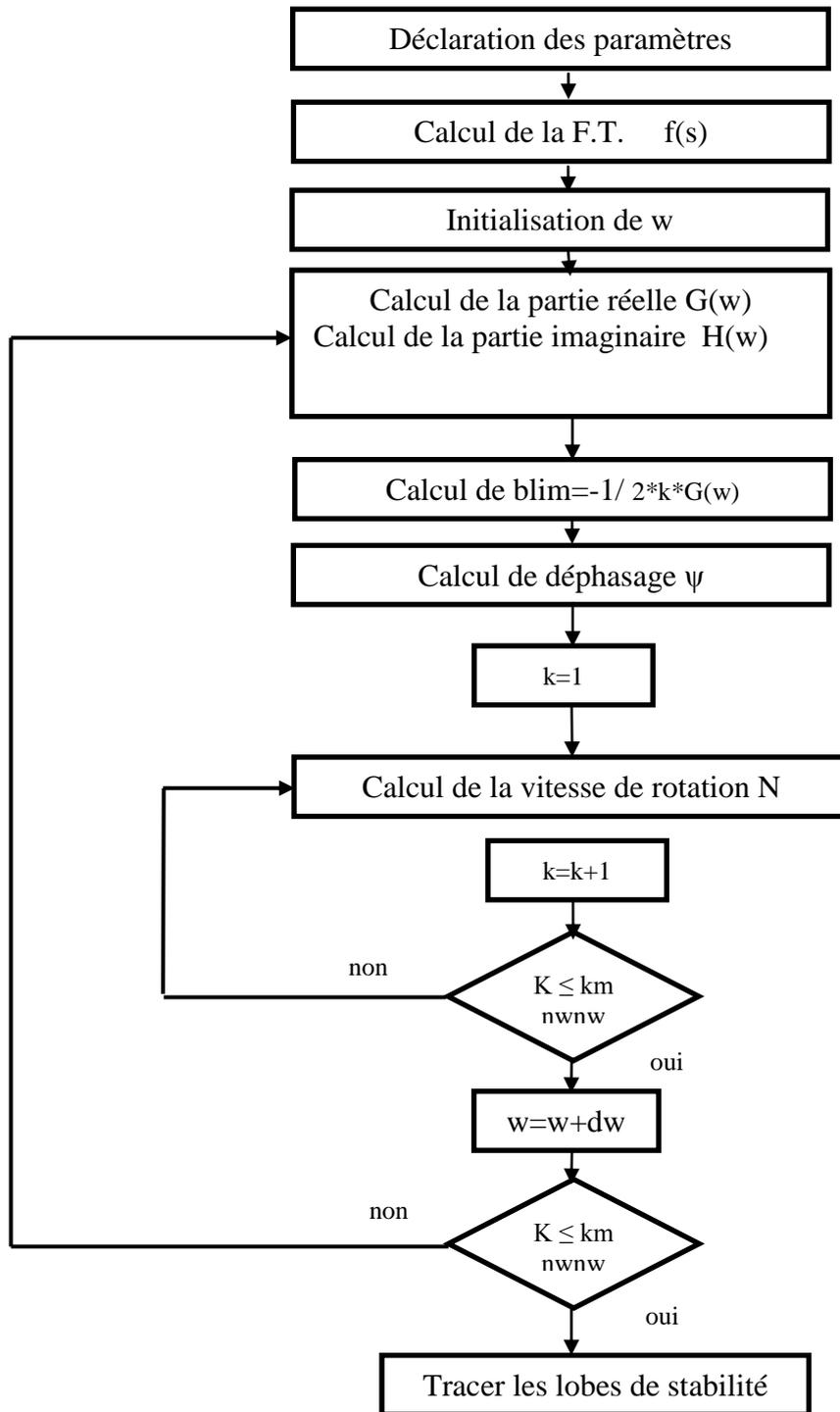
$$2\pi \cdot f_c \cdot T = 2\pi\lambda + \varepsilon \quad (3.18)$$

$$\varepsilon = 2\varphi + 3\pi \quad (3.19)$$

Ce graphique permet de délimiter les zones stables et instables de la coupe en fonction de la vitesse de rotation et de la profondeur de passe. Ils permettent par conséquent d'optimiser les conditions de coupe pour un système outil/pièce donné. En effet, le changement d'un des paramètres dynamiques de l'équation (3.1), nécessite de rééditer tout le calcul précédemment expliqué.

Pour cela, on a développé un organigramme pour pouvoir tracer les lobes de stabilité pour le cas du tournage.

**L'organigramme utilisé est le suivant :**



**Figure 3.5 :** Organigramme utilisé

L'utilisation de l'organigramme précédent nous a permis de développer un programme de simulation qui nous donne les figures (3.6), (3.7), (3.8) et

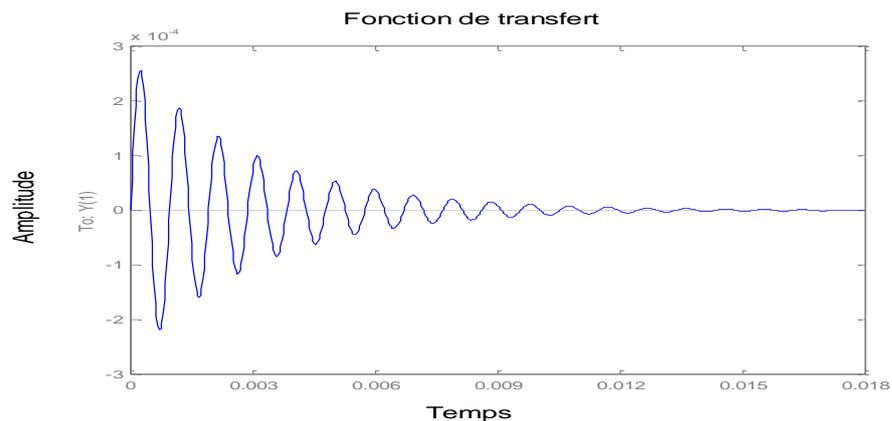
(3.9)représentant les graphes de la partie réelle et de la partie imaginaire de la fonction de transfert, successivement, pour un système à un seul degré de liberté.

### Résultats des simulations des lobes de stabilité :

Paramètres utilisés pour le tracer des lobes de stabilité

- La Masse =  $m = 0,55 \text{ Kg}$
- Raideur =  $k = 23,82.10^6 \text{ N/m}$
- Coefficient d'amortissement =  $c = 361,95.10^3 \text{ N.s/m}$
- Taux d'amortissement =  $\xi = 0,05$
- Effort de coupe =  $K_f = 2\,400 \text{ MPa}$

La détermination de la raideur dynamique a été effectuée selon une modélisation de la pièce sous forme d'une poutre encastrée pour déterminer analytiquement sa raideur.[Voir Annexe]

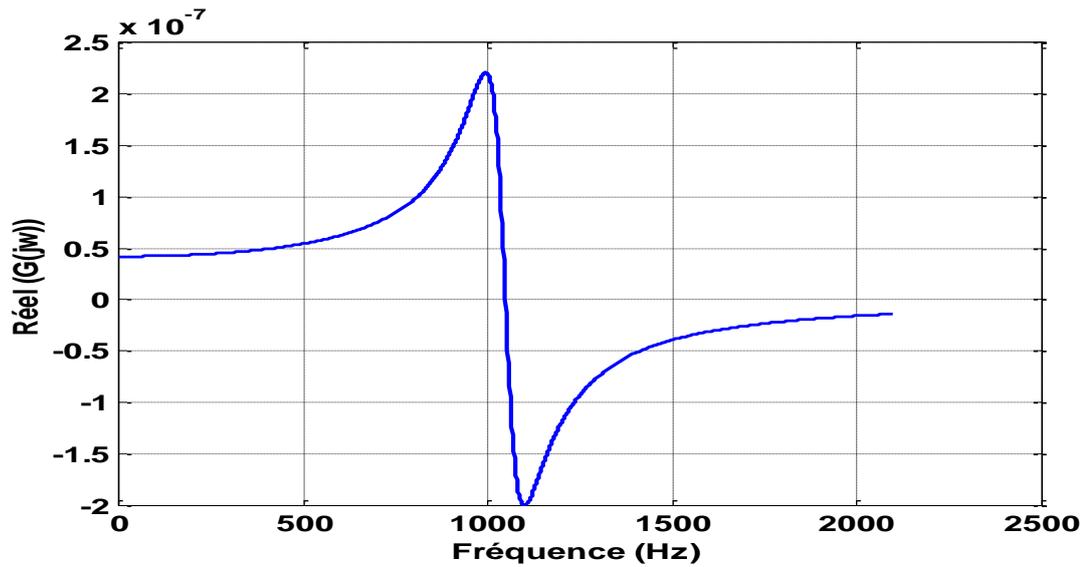


**Figure 3.6** :réponse impulsionnelle

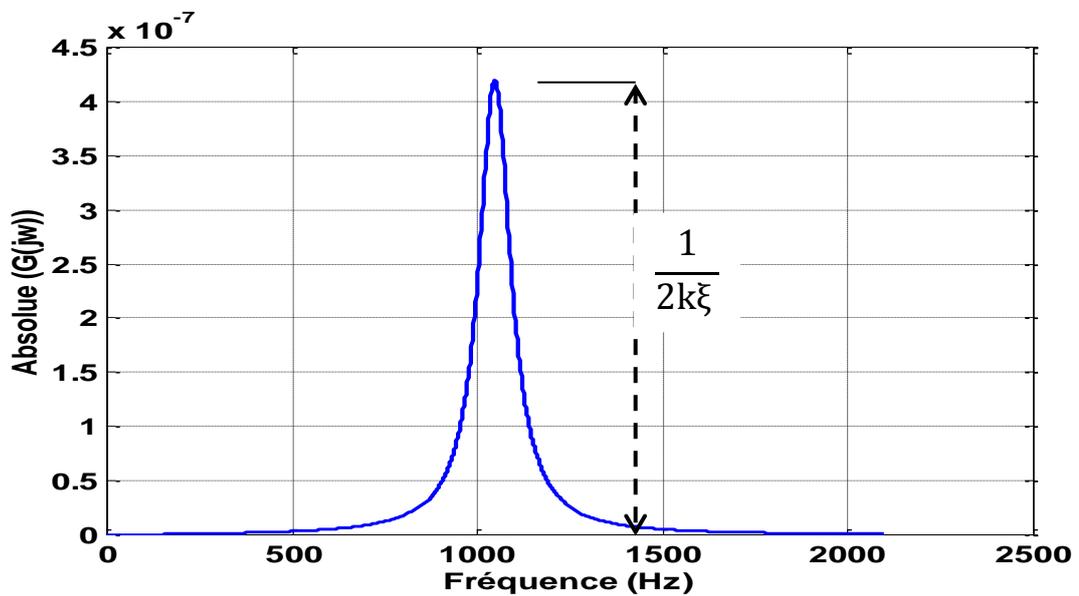
De la figure (3.6), on constate que pour des valeurs d'amplitudes comprises entre - 2.2 et +2.5m, les zones sont instables. Par la suite, et pour des valeurs d'amplitudes comprises entre -0.3 et +0.3m les zones sont stables.

Lorsque la valeur du taux d'amortissement augmente, la zone de stabilité augmente. Lorsque la valeur de la pression spécifique de coupe augmente, la zone d'instabilité augmente aussi.

a)



b)



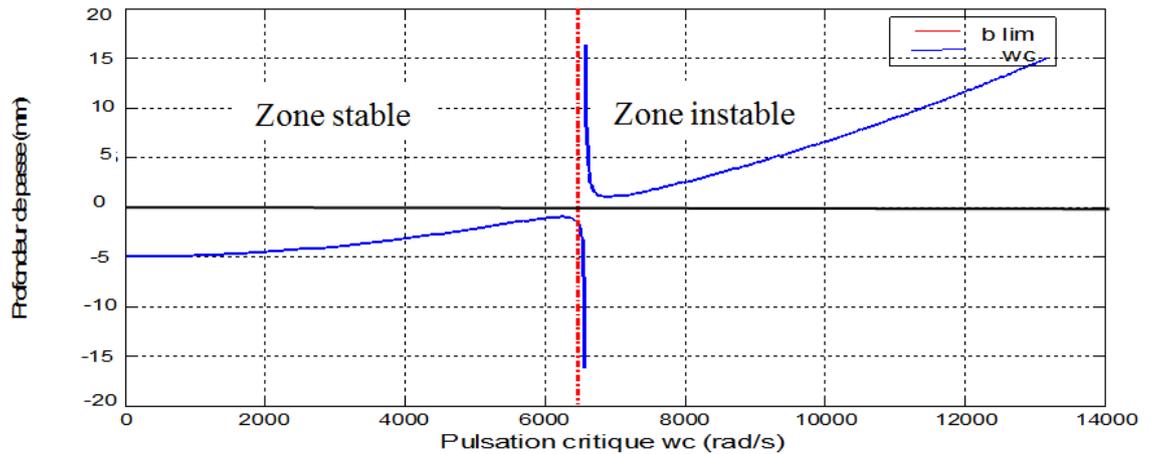
**Figure 3.7 :** a) La partie réelle de la fonction de transfert pour un système vibrant à un seul degré de liberté.

b) magnitude

La figure (3.7) présente la partie réelle de la fonction de réponse en fonction de la fréquence de l'outil de coupe. Il est possible de remarquer que la fréquence naturelle  $f_n$  analysée est proche à 1050 Hz.

On peut déterminer la fréquence naturelle par l'équation suivante :

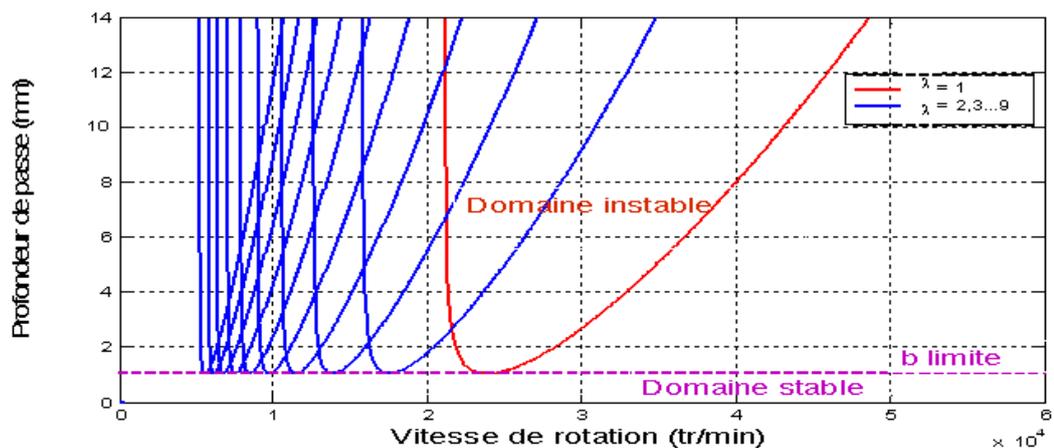
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.20)$$



**Figure 3.8 :** Evolution de  $b_{lim}$  en fonction de  $\omega_c$

L'équation 15 permet de tracer les courbes de la figure 6, où, pour un nombre fixé de la longueur d'onde  $k$ , on obtient une vitesse de rotation de la broche correspondant à une pulsation de broutement  $\omega_c$ .

L'évolution de  $b_{lim}$  en fonction de  $\omega_c$  donnant quelques valeurs négatives qui ne doivent pas de ce fait être conservées [81].

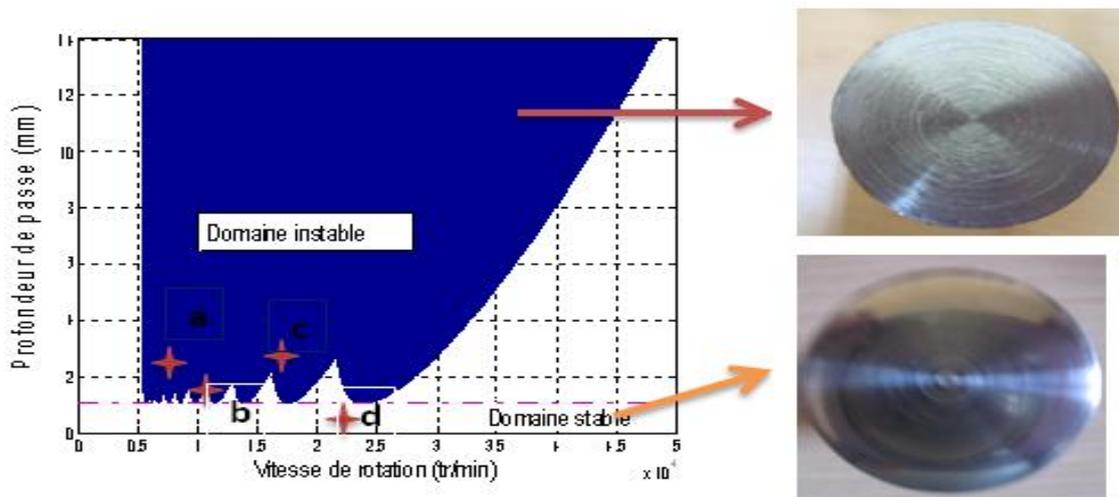


**Figure 3.9 :** Tracé des lobes de stabilité

De la figure (3.9), la largeur des lobes augmente en parallèle avec les vitesses de rotation et c'est l'une des principaux critères de la théorie des lobes de stabilité. Les courbes montrent l'évolution de l'influence des différents paramètres retenus à savoir la masse ( $m$ ), la raideur dynamique ( $k$ ) et l'amortissement ( $c$ ) sur

la stabilité du système Machine-outil/Outil de coupe/Pièce (POM). De là, le comportement vibratoire a été identifié de notre processus de coupe ainsi que le comportement dynamique du système Machine-outil/Outil de coupe/Pièce (POM). D'après la figure, le broutement se produira lorsque la largeur de coupe  $b$  est plus grande que  $b_{limite}$ .

Par ailleurs, il convient de considérer que sur les lobes de stabilités obtenues, la limite de stabilité comporte en réalité une enveloppe d'incertitude non négligeable. Cette imprécision provient essentiellement de l'approximation de la loi de coupe et dans une moindre mesure, des incertitudes sur les caractéristiques dynamiques de la structure (fréquences propres, amortissements modaux) obtenues.



**Figure 3.10 :** Tracé des lobes de stabilité

Ce graphique permet de délimiter les zones stables et instables de la coupe en fonction de la vitesse de rotation et de la profondeur de passe. Elles permettent par conséquent d'optimiser les conditions de coupe pour un système outil/pièce donné. En effet, le changement d'un des paramètres dynamiques de l'équation 1, nécessite de rééditer tout le calcul précédemment expliqué.

Ainsi, et en guise de solution, une représentation appelée « **diagramme des lobes de stabilité** » a été universellement adoptée. L'allure des lobes de stabilité est illustrée dans les différentes figures pour un mode propre de l'outil. Si les conditions d'usinage sont réunies, l'opération sera stable. Au-delà de certaines valeurs, l'usinage sera instable. En aucun cas, cette méthode ne prédit les

vibrations en termes d'amplitudes, de fréquences ou de rugosité générée. Nous rappelons que cette approche a été reprise dans d'autres travaux [92] .

La méthode des lobes de stabilités présente les avantages de simplicité et de rapidité de mise en œuvre. Elle permet rapidement de trouver des conditions d'usinage sans vibrations.

Ainsi pour la vitesse de rotation considérée, il est possible d'identifier la profondeur de passe critique à partir de laquelle l'état de surface se dégrade subitement.

### **3.5. ETUDE EXPERIMENTALE**

Nous présentons dans ce paragraphe, l'ensemble des matériels, outils mis en œuvre pour une approche expérimentale et pour une vérification des résultats obtenus par la programmation Matlab. Cela va permettre de présenter les différents équipements et appareils utilisés qui ont servi à l'opération de dressage de procédé de tournage.

#### **3.5.1.Machine outil**

Les essais de coupe ont été réalisés sur un tour parallèle de marque Heckert, de type DZFG 200 et d'une puissance absorbée de 5.5 KW.



**Figure 3.11:** Tour utilisé

### **3.5.2.Outil de coupe utilisé :**

Nous avons utilisé un outil de type PSKN 2020 K12 en carbure.



**Figure3.12** :Outil à pastille utilisé

### **3.5.3.Appareil de mesure de la rugosité**

Les mesures des rugosités ont été effectuées par un rugosimètre TR100 Surface Roughness Tester composé d'un capteur qui sert à détecter les déplacements verticaux du palpeur, ainsi que d'un calculateur et d'une unité d'affichage.



**Figure3.13**:RugosimètreTR100 Surface Roughness Tester

### **Caractéristiques techniques de l'appareil**

- Paramètres de mesures de Ra et Rz
- Plage de mesure 0.05 :10 $\mu$ m pour Ra 0.1 :50 $\mu$ m pour Rz,
- Longueur de mesure 6mm,
- Calibre  $\lambda_1=0.25$  mm pour Ra=0.05 0.25,  
 $\lambda_2=0.8$  mm pour Ra=0.32 2.5,  
 $\lambda_3=2.5$  mm pour Ra=2.5 10.

### **3.6.VERIFICATION DES RESULTATS DE SIMULATION :**

La validation expérimentale a pour but de vérifier que le modèle développé permet de reproduire l'état réel. Nous nous sommes limités uniquement à la mesure de la rugosité pour déterminer la qualité de l'état de surface en fonction des performances et des capacités du banc d'essai. Ainsi, les mesures des forces et des déplacements relatifs outil/pièce ne sont pas effectuées dans cette partie.

Pour la vérification des résultats de la simulation avec les résultats expérimentaux, nous avons pris 2 points dans le domaine stable et deux points dans la zone instable en l'état a, b, c et d. Le but de cette méthode est de prédire la précision pour éviter les vibrations lors de l'usinage. De ces chiffres, nous avons observé que les résultats obtenus concordent entre eux dans presque tous les cas.

Les points	Conditions de coupe		Topographie de surfaces finies	Résultats
	N (tr/min)	b (mm)		
a	4000	1.5		Broutement
b	6000	2		Broutement
c	6000	1		Stable
d	20000	0.5		Stable

**Tableau 3.1:** Vérification des résultats dans les conditions de coupe : a, b, c et d

Dans la deuxième partie, nous avons tendance à choisir des solutions qui rendent la production plus efficace afin d'obtenir une bonne qualité de surface, pour cela

nous nous sommes intéressés à la zone de stabilité; Nous allons utiliser un algorithme pour optimiser les paramètres de coupe des résultats obtenus.

### **3.7.OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE**

Les paramètres de coupe lors de l'usinage affectent de façon importante l'état de surface. Cependant, l'utilisation correcte des paramètres de coupe peut améliorer la finition de surface, un mauvais choix d'un paramètre de coupe conduit à l'obtention d'un mauvais état de surface.

Grace à la connaissance des lobes de stabilité, on peut optimiser le procédé de tournage. Plusieurs objectifs mis en évidence pour effectuer la simulation : [93]

La recherche des conditions de coupe conduisant à un usinage stable :

- ✓ La recherche de paramètres de coupe permettant de maximiser le taux d'enlèvement des copeaux en tenant compte des caractéristiques de la machine (courbe couple-vitesse de rotation de la proche, rigidité du bâti.....etc) ;
- ✓ La gestion efficiente du parc d'outils de coupe en recherchant les conditions d'usinage minimisant l'usure.

A cet effet, l'optimisation des conditions de coupe a un impact très important pour le contrôle de la rugosité des pièces à usiner, afin d'éviter l'apparition des vibrations ainsi que les défauts de surface et améliorer l'efficacité de coupe.

Dans cette partie, un algorithme d'optimisation globale basé sur la méthode "Essaims particulaires"(PSO) a été implémenté.

Mais avant de passer à cette méthode, il est d'abord nécessaire de déterminer le problème d'équation à résoudre, la fonction objective et les contraintes.

La détermination de l'équation de la rugosité arithmétique est une étape très importante pour caractériser la qualité de surface et définir l'équation à optimiser.

Nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences pour développer le modèle de la rugosité arithmétique.

### **3.7.1. Détermination de la rugosité arithmétique :**

Le critère le plus important pour l'évaluation de la qualité de surface est la rugosité, Ra, calculée selon:

$$R_a = kV_c^{x_1} * f^{x_2} * a_p^{x_3} \quad (3.21)$$

Où  $x_1, x_2, x_3$  et  $k$  sont les constantes relatives à une combinaison outil-pièce donnée.

Dans notre cas, nous allons appliquer la méthode des plans d'expériences.

### **3.7.2. Méthode des plans d'expérience :**

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé celle des plans d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux [94].

Dans les différentes recherches, les essais sont obligatoires. Or ces essais sont trop souvent conduits sans méthodologie et les résultats obtenus sont le plus souvent mal exploités.

La méthode des plans d'expérience permet une meilleure organisation des essais accompagnant des résultats expérimentaux et ces essais seront applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries.

Les plans d'expérience servent à optimiser l'organisation des essais afin d'obtenir le plus de renseignements possibles avec le minimum d'expériences. Elle permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats [95].

#### **3.7.2.1. Définition :**

Les plans d'expériences sont une méthode de calcul d'une fonction décrivant un phénomène à  $n$  variables indépendantes basé sur les statistiques.

Sir Ronald Fisher (1890-1962), l'un des fondateurs de la statistique inductive moderne, introduit la notion de plan d'expérience. Durant les années 20, son travail se fera dans une station expérimentale agricole où il sera amené à réaliser un nombre important d'expériences. Son intérêt était de trouver une méthode réduisant le nombre d'expériences réalisées et augmentant la précision des expériences.

Cependant, c'est Genichi Taguchi, ingénieur et statisticien Japonais qui va démocratiser cette méthode afin que les techniciens puissent en bénéficier.

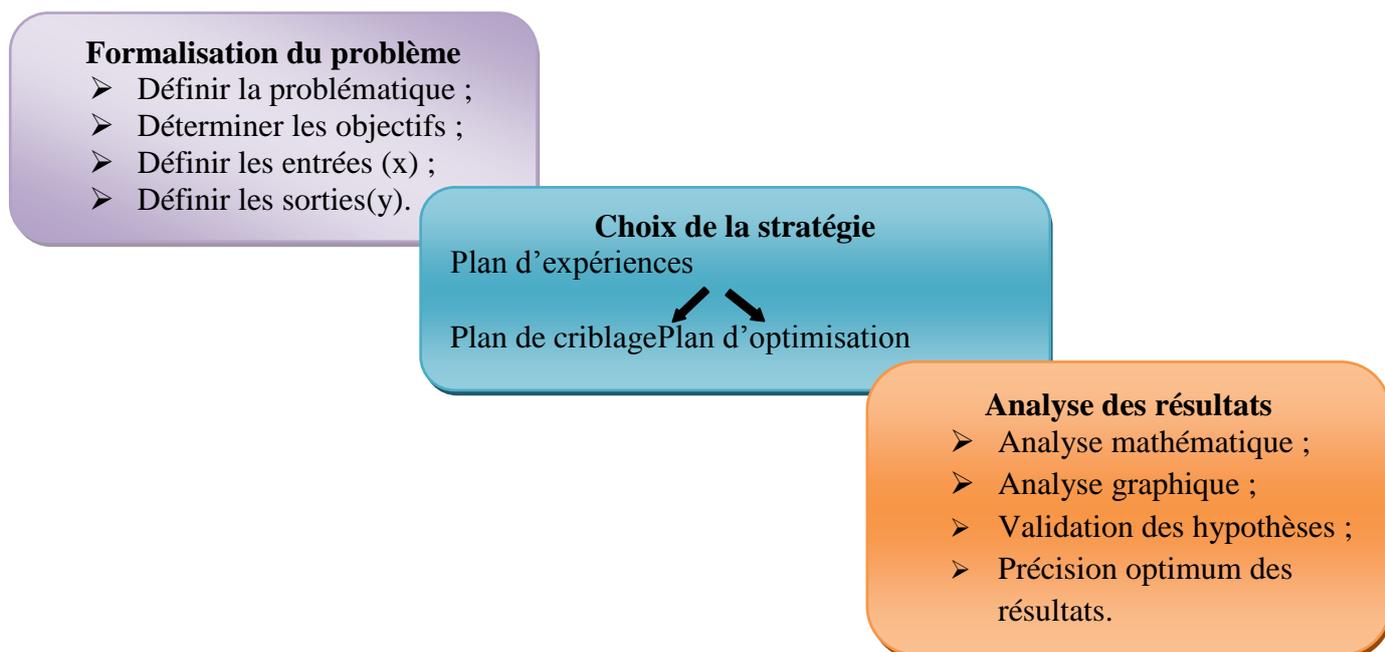
Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais,
- Etude d'un grand nombre de facteurs,
- Détection des interactions entre facteurs,
- Modélisation des réponses étudiées,
- Précision optimale des résultats.

Cette méthode permettra une interprétation rapide et infaillible des résultats en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié, et donnera le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. On devra suivre alors des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de cette méthode est basée sur deux notions essentielles : la notion d'espace expérimental et la notion de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

La méthodologie des plans d'expériences s'articule selon les trois étapes suivantes :



**Figure 3.14:** Mise en œuvre des plans d'expériences.

### **3.7.2.2. Notion 'espace expérimental et terminologie :**

Ce paragraphe rappelle les principaux termes utilisés dans la méthode des plans d'expériences qui sont :

- Le facteur,
- La réponse,
- La surface de réponse.

#### **3.7.2.2.A. Le facteur :**

Lors de l'étude, les variables à étudier sont appelées facteurs. Ces derniers varient généralement entre deux bornes :

- La borne inférieure,
- La borne supérieure.

Lors de l'application des plans d'expérience, le facteur varie entre le niveau bas et le niveau haut qui sont représentés respectivement par -1 et + 1. L'ensemble de toutes les valeurs prises par le facteur entre le niveau bas et le niveau haut est dénommé le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

La figure (3.15) représente le domaine de variation d'un seul facteur :



**Figure 3.15 :** Domaine de variation d'un seul facteur

Avec :

-1 : niveau bas

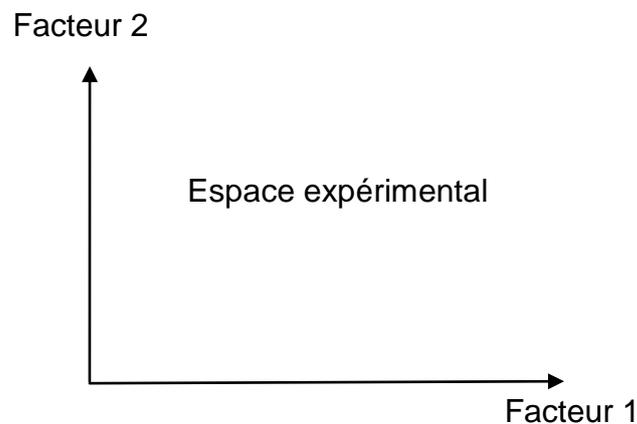
+1 : niveau haut

Les facteurs étudiés peuvent être des variables continues que l'on ne peut pas ordonner ou des variables discontinues que l'on peut ordonner. On parlera alors de facteurs continus, de facteurs discrets et de facteurs ordonnables.

Un facteur est représenté par un axe orienté. Si le facteur est continu, cet axe est gradué selon une certaine échelle. Si le facteur est ordonnable, on indique l'ordre choisi sur l'axe.

S'il y a 2 facteurs, le second facteur est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur : son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. L'espace créé est appelé espace expérimental.

La figure (3.16) montre le domaine de variation de deux facteurs :

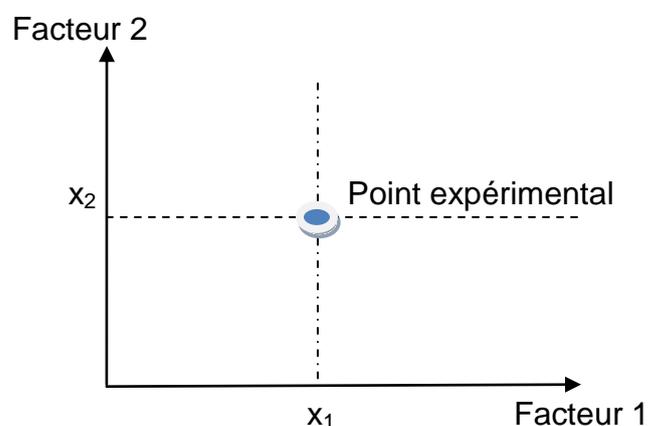


**Figure 3.16 :** Domaine de variation de deux facteurs

Les niveaux des facteurs peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental.

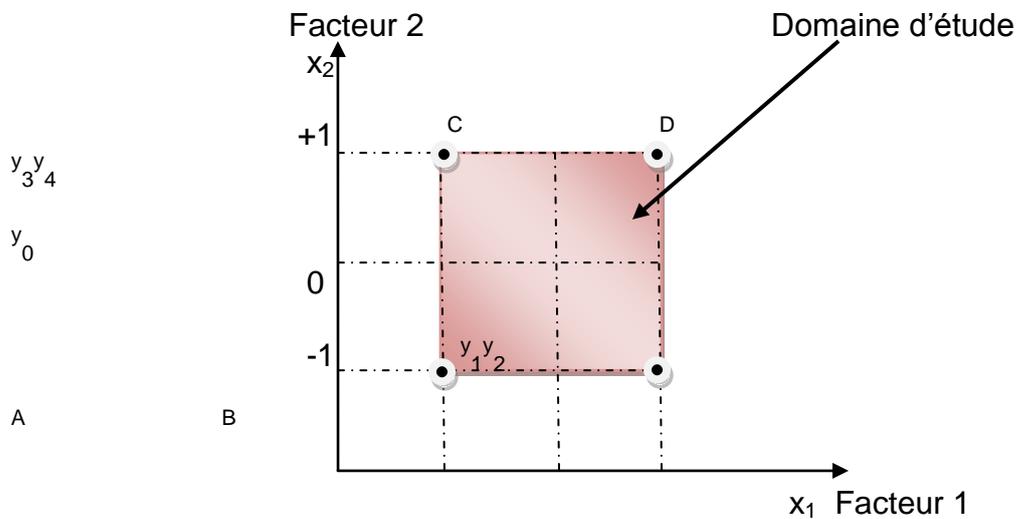
Une expérience donnée est alors représentée dans ce système d'axes par un point : Ce point est appelé point expérimental ou point d'expérience.

Un plan d'expériences représente un ensemble de plusieurs points expérimentaux. Ces derniers sont illustrés dans la figure (3.17).



**Figure 3.17 :** Points expérimentaux dans l'espace expérimental.

La figure (3.18) schématise plusieurs expériences bien définies représentées par des points répartis dans le domaine d'étude :



**Figure 3.18 :** Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de plan d'expériences.

### **3.7.2.2. B. La réponse :**

Les grandeurs intéressant l'expérimentateur et mesurées à chaque expérience sont appelées réponses.

Le choix des réponses est un problème difficile qui ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir la ou les bonnes réponses.

### **3.7.2.2. C. Surface de réponse :**

En l'absence de toute indication sur la fonction liant la réponse aux facteurs, on se guide, à priori, par une loi d'évolution.

Cela définit le modèle mathématique à priori ou modèle postulé.

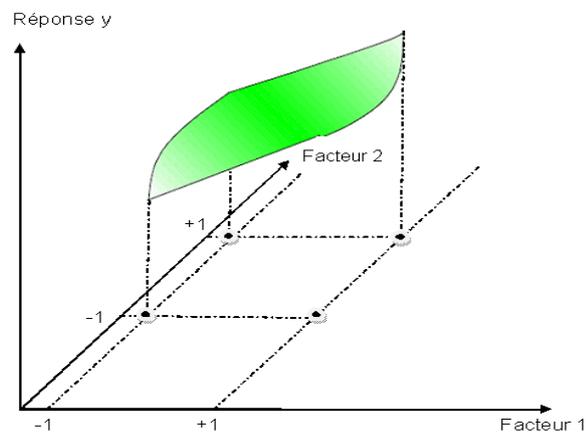
Quand on recherche le lien existant entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$ , on se référera aux plans d'expériences si l'on étudie une fonction de type :

$$Y = f(x_i) \quad (3.22)$$

On attribue un axe à une réponse et cet axe est orthogonal à l'espace expérimental.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent une surface appelée la surface de réponse.

La figure (3.19) représente une surface de réponse :



**Figure 3.19 :** Représentation d'une surface de réponse

### **3.7.2.3 . Notion de modélisation mathématique et application :**

Quand on veut connaître la dépendance d'une variable de sortie  $F$  d'un cas précis, plusieurs interrogations sont posées:

- Quels sont les facteurs les plus influents ?
- Existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ?
- Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
- Comment minimiser le nombre de points de mesure du processus pour obtenir le maximum d'informations ?

- Existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?

La méthode du plan d'expérience répond à ces questions et sera ainsi appliquée à notre cas.

Le principe consistera à planifier nos essais en utilisant des tables ayant la propriété d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester [96] .

La modélisation par plans d'expériences, dans le cas de l'essai de résilience, se fait par modèle mathématique sous la forme polynomiale suivante :

$$y_i = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_{i,j,k=1}^n a_{ijk} \dots \quad (3.23)$$

La forme développée pour notre cas s'écrit :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3.24)$$

Avec :

$y$ : Représente la valeur de la réponse qui est la rugosité ;

$x_1$  : Représente la valeur du facteur 1 qui est la vitesse de coupe;

$x_2$  : Représente la valeur du facteur 2 qui est la profondeur de passe ;

$x_3$  : Représente la valeur du facteur 3 qui est l'avance ;

$a_0$ : La valeur moyenne de l'effet des trois facteurs,

$a_1$  : Coefficient de la vitesse de coupe,

$a_2$  : Coefficient de la profondeur de passe,

$a_3$  : Coefficient de l'avance ,

$a_{12}$  :L'interaction entre  $a_1$  et  $a_2$ ,

$a_{13}$  :L'interaction entre  $a_1$  et  $a_3$ ,

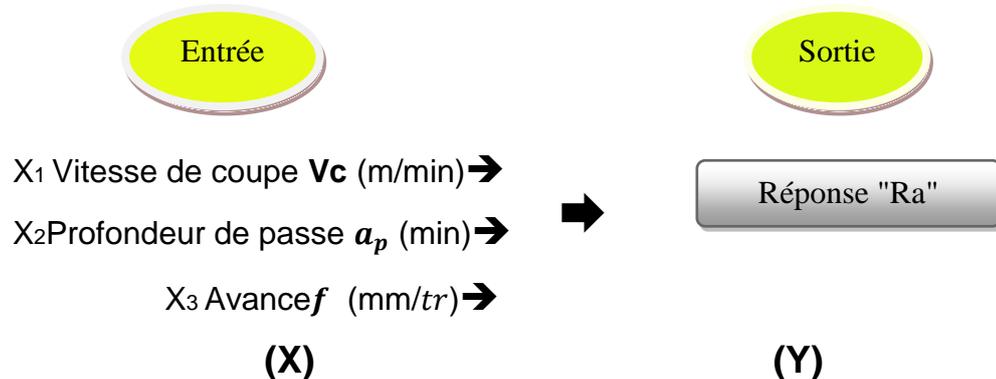
$a_{23}$  :L'interaction entre  $a_2$  et  $a_3$ ,

$a_{123}$  :L'interaction entre les trois facteurs.

Nous sommes intéressés à minimiser les conditions de coupe pour trouver la rugosité optimale à partir du graphique des lobes de stabilité.

Sous sa forme générale, la rugosité peut être exprimée comme suit:

$$R_a = \text{fonction}(V_c, a_p, f) \quad (3.25)$$



**Figure 3.20:** Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai

Afin de mettre en œuvre notre objectif d'optimisation et de choisir les conditions de coupe optimales, nous avons mesuré la rugosité de surface  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) à l'aide d'un testeur de rugosité de surface type TR100.

Les valeurs moyennes de la rugosité  $R_a$  mesurées pour chaque pièce correspondant à chaque opération de coupe sont présentées dans le tableau suivant:

Pièces	Vitesse de coupe $V_c$ [m/min]	Profondeur de passe $a_p$ [mm]	Avance $f$ [mm/tr]	Rugosité $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	150	0.3	0.05	2.85
2	150	0.8	0.2	3.18
3	1000	0.3	0.2	1.48
4	150	0.8	0.05	3.01
5	1000	0.8	0.2	1.39
6	1000	0.8	0.05	1.25
7	1000	0.3	0.05	1.05
8	150	0.3	0.2	2.37

**Tableau 3.2:** Les mesures de la rugosité arithmétique de surface  $R_a$

La matrice des essais est présentée dans le tableau suivant :

Facteur	Unité	Minimum	Maximum
Vitesse de coupe (X1)	m/min	150	1000
Profondeur de passe (X2)	mm	0.3	0.8
Avance (X3)	mm/tr	0.05	0.2

**Tableau3.3** : Les 3 facteurs ; leurs unités, leurs maximums et leurs minimums

Notre équation devient :

Ra =

$$3.45259 - (2.72395e^{-003}V_c) - (0.23804 \cdot a_p) - (7.53412 \cdot f) + (8.31373e^{-004} \cdot V_c \cdot a_p) + (0.011561 \cdot V_c \cdot f) + (10.87843 \cdot a_p \cdot f) - (0.014745 \cdot V_c \cdot a_p \cdot f)$$

(3.26)

Après la détermination de l'équation mathématique de la rugosité arithmétique, nous pouvons maintenant appliquer l'optimisation globale qui est basée sur la méthode "Essaims particulaires"(PSO) pour la résolution de ce problème.

### **3.8. Méthodes et algorithmes d'optimisation**

L'optimisation des structures est l'un des progrès indispensables dans la conception des systèmes mécaniques.

L'optimisation appelée aussi la conception optimale est un processus essentiel dans la plupart des domaines industriels notamment en mécanique.

La méthode d'optimisation par essaim particulaire (OEP) est une technique basée sur la notion de coopération entre des particules.

L'échange d'information entre eux fait que, globalement, ils arrivent néanmoins à résoudre des problèmes difficiles comme les problèmes d'optimisation non linéaire, linéaire, à variables continues, entières ou mixtes.

La naissance de l'OEP sous le nom « ParticleSwarm,Optimization » (PSO), date de 1995 grâce à la collaboration de deux personnes, Russ Eberhart (ingénieur en électricité) et Jim Kennedy (socio-psychologue)[97] .

Dans l'algorithme d'essaim particulaire, la recherche s'effectue par une population d'individus appelés particules. Chaque particule survolant l'espace de recherche en quête de l'optimum global est considérée comme solution potentielle du problème. Afin de définir sa direction de vol, une particule se base sur deux types d'informations : une information tirée de sa propre expérience et une information tirée de l'expérience de l'essaim. Le mouvement des particules est régi par les équations :

$$V^{(k+1)} = w.V^{(k)} + c_1.rand_1.(Pbest^{(k)} - X^{(k)}) + c_2.rand_2.(Gbest^{(k)} - X^{(k)}) \quad (3.27)$$

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + V^{(k+1)} \quad (3.28)$$

Où :

$X$  : la position des particules,

$V$  : la vitesse des particules,

$w$  : le paramètre d'inertie,

$Pbest$  : la meilleure position personnelle,

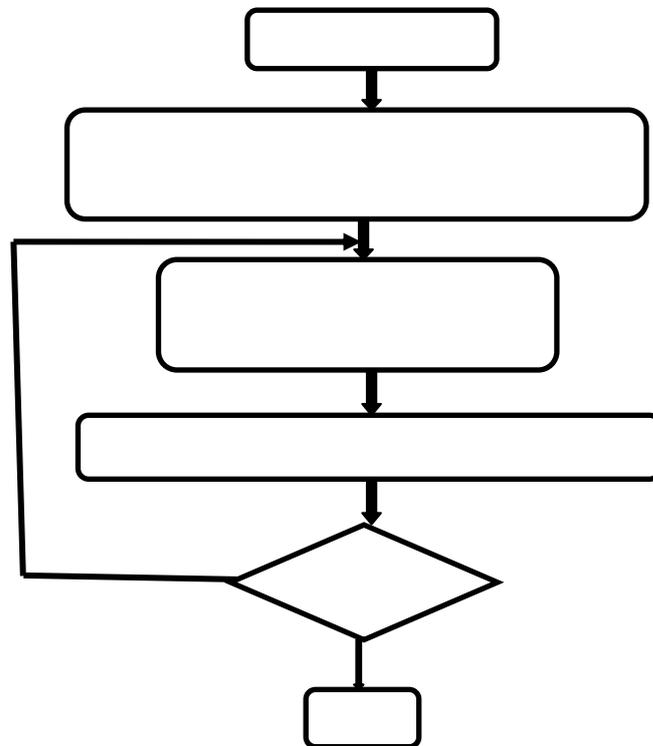
$Gbest$  : la meilleure solution de l'essaim ,

$rand_1, rand_2$  : les variables aléatoires entre 0 et 1 ,

$c_1, c_2$  : les constantes positives,

$k$  : la variable d'itération.

L'organigramme utilisé est le suivant :



**Figure 3.21** : Organigramme utilisé

L'équation d'optimisation devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } Ra \\ Ra = 3.45259 - (2.72395e^{-003} V_c) - (0.23804 \cdot a_p) - (7.53412 \cdot f) + (8.31373e^{-004} \cdot V_c \cdot a_p) \\ \quad + (0.011561 \cdot V_c \cdot f) + (10.87843 \cdot a_p \cdot f) - (0.014745 \cdot V_c \cdot a_p \cdot f) \\ \text{Avec} \\ 0.05 \leq f \leq 0.2 \\ 0.3 \leq a_p \leq 0.8 \\ 150 \leq V_c \leq 1000 \end{array} \right.$$

L'utilisation de la méthode d'optimisation par essaim particulaire (OEP), nous a permis de trouver le résultat optimal qui est le suivant :

$$f = 0,1 \text{ mm/tr}, a_p = 0,3 \text{ mm}, V_c = 1000 \text{ m/min}, Ra = 1 \mu\text{m}$$

Les résultats trouvés par programmation Matlab, montrent que la méthode utilisée est favorablement comparée avec les résultats expérimentaux,

Dans cette étude, les caractéristiques dynamiques de l'outil de coupe et de la pièce ont été prises en compte afin d'obtenir une meilleure approche des phénomènes physiques pendant la vibration. Nous nous sommes intéressés à la prédiction des lobes de stabilité en ce qui concerne l'instabilité vibratoire à travers un modèle dynamique tout en cernant les aspects mécaniques.

Notre modèle fournit une approche du système dynamique en résolvant la limite de stabilité.

L'étude réalisée met en évidence la relation complexe entre l'instabilité en usinage et les conditions de coupe appliquées. L'effet des paramètres du procédé sur la stabilité est démontré. Ce processus est vérifié par une méthode de simulation et globalement, les résultats sont les mêmes. Plusieurs pistes ont été suivies pour la vérification de notre méthode. Les résultats obtenus expérimentalement montrent un accord parfait avec la théorie du lobe de stabilité puisque la largeur des lobes augmente en fonction des vitesses de rotation.

La fiabilité du modèle mathématique proposée a été testée par la méthode d'optimisation PSO. Les résultats ont montré que le modèle est très significatif et s'adapte parfaitement avec la théorie des lobes de stabilité et également avec les résultats expérimentaux.

## CHAPITRE 4

### LA SIMULATION NUMERIQUE DU PROFIL DE LA TEMPERATURE AL'INTERFACE OUTIL-COPEAU PAR LES ELEMENTS FINIS

#### **4.1. Introduction:**

Le but de toute simulation est de reproduire le processus réel le plus fidèlement possible. 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 [64].

Elle propose une résolution numérique approchée des systèmes d'équations aux dérivés partielles. A cet effet, un certain nombre d'études numériques ont pu décrire le comportement thermique, thermomécanique de l'outil et même du système outil/pièce/copeau avec des codes commerciaux comme NASTRAN, ABAQUS, COSMOS ,DEFORM3 ou encore ANSYS.

Nous allons à travers ce chapitre modéliser et simuler la formation du copeau en 3D d'une opération de chariotage de procédé de tournage à sec de l'acier XC48. 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. Pour mener à bien cette étude, il est nécessaire d'effectuer un

certain nombre de mesures expérimentales afin de quantifier les sources thermomécaniques à appliquer sur la surface de la pièce en cours d'usinage et de comparer les résultats obtenus avec la simulation.

Une étude mathématique est ensuite mise en œuvre pour modéliser la température par la méthode des plans d'expériences. Cette étude a pour but d'optimiser les paramètres de coupe et de montrer l'influence de telles conditions sur le processus de coupe et de déduire laquelle des valeurs de température permettent de se rapprocher d'une usure nulle permettant d'augmenter la durée de vie de l'outil de coupe.

#### **4.2. Application au modèle numérique :**

Des modèles numériques simulant l'usinage ont déjà été réalisés avec le logiciel d'éléments finis ANSYS intégrant la loi de Johnson-Cook[67].

Il y a plusieurs paramètres importants à prendre en compte pour la modélisation de l'usinage. Nous cherchons donc à simuler en élément finis la formation du copeau en trois dimensions et son détachement du bloc de matière. Nous avons ensuite affiné notre modèle en modifiant la dimension des composants pour avoir un résultat précis.

On donne dans ce qui suit la démarche à effectuer pour simuler la coupe orthogonale 3D de l'acier XC48 avec le logiciel ANSYS.

##### **4.2.1. ANSYS explicite :**

Nous utiliserons pour notre démarche de simulation, la version explicite du logiciel ANSYS : un produit d'analyse d'élément fini qui adopte un schéma d'intégration explicite pour résoudre les problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.

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.

### **4.3 .Lois de comportement :**

Le choix de la loi de comportement adaptée est primordial dans l'établissement d'un modèle numérique.

Pour décrire le comportement mécanique et thermomécanique de la pièce en Acier XC48 afin la coupe orthogonale 3D, la loi de type Johnson Cook [67] a été choisi.

#### **4.3.1/ Comportement mécanique de la pièce :**

Un modèle 3D de coupe orthogonale basé sur une approche lagrangienne a été employé pour mener à bien une analyse couplée thermomécanique dans le code de calcul ANSYS /Explicit, Le modèle se compose ici d'une pièce déformable et d'un outil rigide.

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 [67].(Eq.4.1)

$$\sigma = (A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right)^m \right] \quad (4.1)$$

Avec :

$\sigma$  est la contrainte équivalente qui représente la limite d'écoulement plastique,

$\bar{\varepsilon}^p$  est la déformation plastique équivalente,

$\dot{\varepsilon}$  est la vitesse de déformation plastique,

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

$T_{amb}$  est la température ambiante ou de référence,

$T_0$  est la température de fusion.

$(A , B \text{ et } n)$  sont les paramètres représentant l'écrouissage,

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

m est le paramètre définissant la dépendance à la température.

#### **4.3.2/Critère d'endommagement de Johnson-Cook :**

La loi d'endommagement de Johnson et Cook [98] est utilisée comme critère de rupture ductile. Ce critère fait apparaître les trois mêmes termes :

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

$$\varepsilon_f = \left( D_1 + D_2 \exp D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \left( 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left( 1 + D_5 \left( \frac{T - T_0}{T_{amb} - T_0} \right) \right) \quad (4.2)$$

Où :

$\varepsilon_f$ : La déformation équivalente à rupture du matériau ,

$\sigma_m$ : La contrainte moyenne ,

$\sigma_{eq}$  : La contrainte équivalente de Von Mises,

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

#### **4.4. Simulation du problème en ANSYS :**

##### **4.4.1. Les étapes à suivre pour la modélisation :**

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 chariotage de procédé de tournage. Ce code possède des algorithmes de gestion du contact avec frottement basés sur la méthode des multiplicateurs de Lagrange, ou bien une méthode de Lagrangien augmentée.

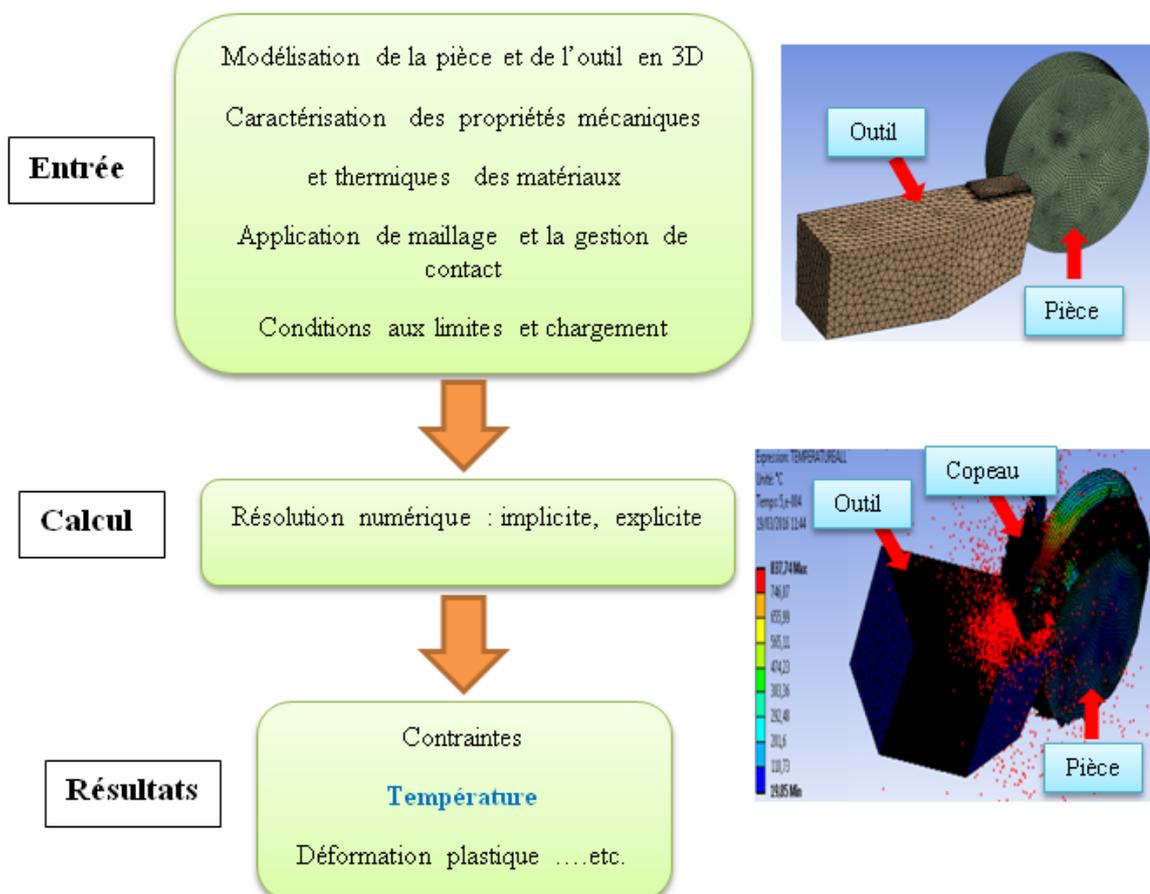
Pour commencer l'étude, la création du modèle sur ANSYS Workbench est une étape très importante. Il faut sélectionner l'analyse explicite dynamique pour spécifier le type de résolution. Cette dernière représente la modélisation de la pièce et de l'outil.

La deuxième étape consiste à définir le matériau. Les matériaux vont être sélectionnés dans la bibliothèque de logiciel en caractérisant pour chaque pièce les propriétés mécaniques et physiques.

Dans la troisième étape, on choisit le type de maillage. Plus les mailles sont petites, plus la précision est grande. La prochaine étape est de définir les conditions aux limites et chargement.

La dernière étape de cette analyse est l'obtention des résultats, le logiciel nous donne des solutions schématiques selon le type de résolution.

La figure suivante montre les procédures à suivre pour la modélisation de la température sur ANSYS Workbench explicite dynamique.



**Figure 4.1:** Procédure de la modélisation numérique de la formation des copeaux lors de l'utilisation de logiciel ANSYS Workbench explicite dynamique

#### **4.5. Modélisation de l'outil de coupe :**

Durant l'analyse, l'outil de coupe 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  $\gamma = -10^\circ$  et l'angle de dépouille  $\alpha = 6^\circ$  [17] .

#### **4.6. Modélisation de la pièce à usiner :**

L'étude s'est focalisée sur un acier XC48 du fait de sa forte utilisation dans l'industrie. Il est fourni en barre cylindrique de dimensions (diamètre 30 x 50 mm).

Cet acier est très utilisé dans les domaines du secteur automobile et machinerie pour confectionner de nombreux produits.

Le logiciel ANSYS met à la portée des utilisateurs des données sur le comportement de quelques matériaux, sous forme de tableaux contenant des valeurs de contrainte et de déformation en fonction de différentes températures et vitesses de déformation .En outre, il est possible de déterminer les paramètres de certaines lois de comportement notamment celle de Johnson – Cook[67].

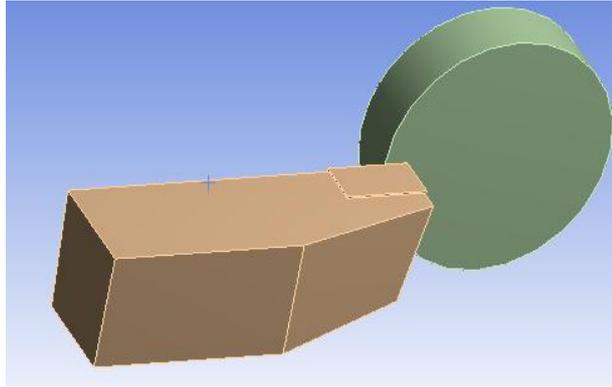
Les tableaux (4.1) et (4.2) donnent respectivement les critères et les paramètres de la loi de Johnson Cook du matériau XC48 [99].

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

**Tableau 4.1:** Paramètres de la loi de comportement de l'acier XC48

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

**Tableau 4.2 :** Critère d'endommagement Johnson-Cook de l'acier XC48



**Figure 4.2:**Création du modèle sur ANSYS Workbench

#### **4.7. Les propriétés physiques et mécaniques de la pièce et de l'outil :**

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

<b>Propriétés</b>	<b>XC48</b>	<b>Outil en carbure métallique</b>
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	7800	12800
Module de Young (GPa)	210	800
Coefficient de Poisson	0.3	0.22
Conductivité (W/mk)	47	82
Chaleur spécifique (J/kg k)	432	226
Coefficient de dilatation thermique (m/m°C)	<b>11.9x10<sup>-6</sup></b>	4.9x10 <sup>-6</sup>

**Tableau 4.3:**les propriétés thermomécaniques de matériau et de l'outil [100]

#### **4.8. Conditions aux limites et chargement :**

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

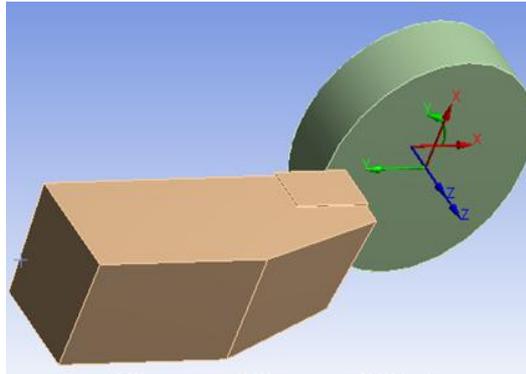
Le modèle ci-dessous représente une opération de chariotage du procédé de tournage. Les essais de coupe à sec ont été conduits selon plusieurs vitesses de coupe et avances.

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

✚ Le 1<sup>er</sup> cas :  $f = 0,4mm/tr$  et  $Vc = 300m/min$

✚ Le 2<sup>ème</sup> cas :  $f = 0,2mm/tr$  et  $Vc = 120m/min$

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



**Figure 4.3:** modélisation de la coupe orthogonale 3D par Ansys

#### **4.8.1. Le modèle thermique 3-D du dispositif de coupe :**

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

Les coordonnées cartésiennes de diffusion peuvent être écrites :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

Avec :

$T$  : Température(°C),

$k$  : Conductivité thermique( $W/mk$ ) ,

$c$  : Chaleur spécifique( $J/kgk$ ),

$\rho$ : Densité ( $\frac{kg}{m^3}$ ).

#### **4.8.2. Les conditions initiales aux limites :**

Les conditions initiales aux limites thermiques sont définies comme suit:

$$T(x, y, z, 0) = T_{\infty} \quad (4.4)$$

$$-k \frac{\delta T}{\delta \eta} = h(T - T_{\infty}) \quad (4.5)$$

La condition de contact outil/ pièce

$$-k \frac{\delta T}{\delta \eta} = \begin{cases} W_n & 0 < t < t_c \\ 0 & t > t_c \end{cases} \quad (4.6)$$

Avec :

$T$ : Température (°C),

$k$  : Conductivité thermique (W/m k),

$c$  : Chaleur spécifique (J/kg K).

#### **4.9. Le maillage et la gestion de contact**

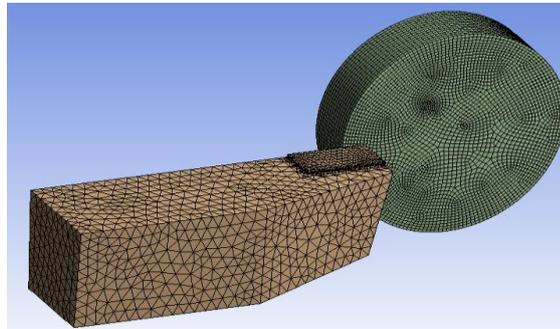
Une fois la structure créée, on procède au maillage. Le modèle pièce/outil a été maillé par des éléments volumiques tétraédriques et quadratiques.

L'outil de coupe est modélisé en générant 79301 éléments, et 56971 nœuds. 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 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.

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



**Figure 4.4:** Méthode appliquée pour le contact outil / pièce

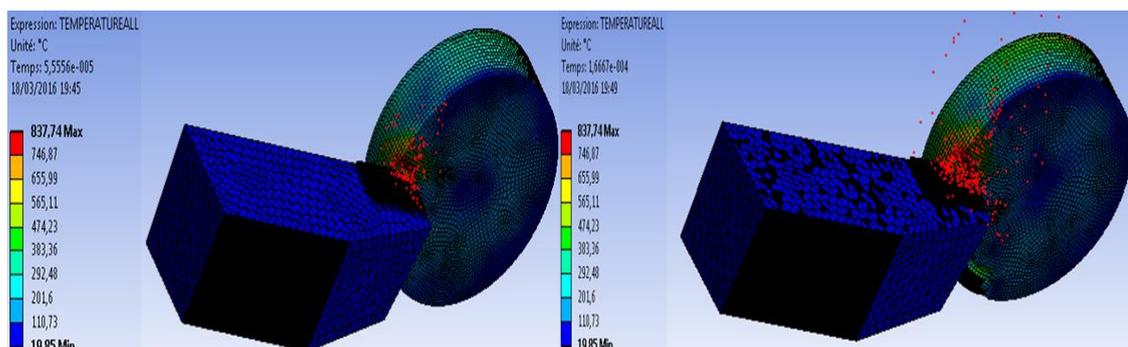
#### 4.10. RESULTATS DE LA SIMULATION :

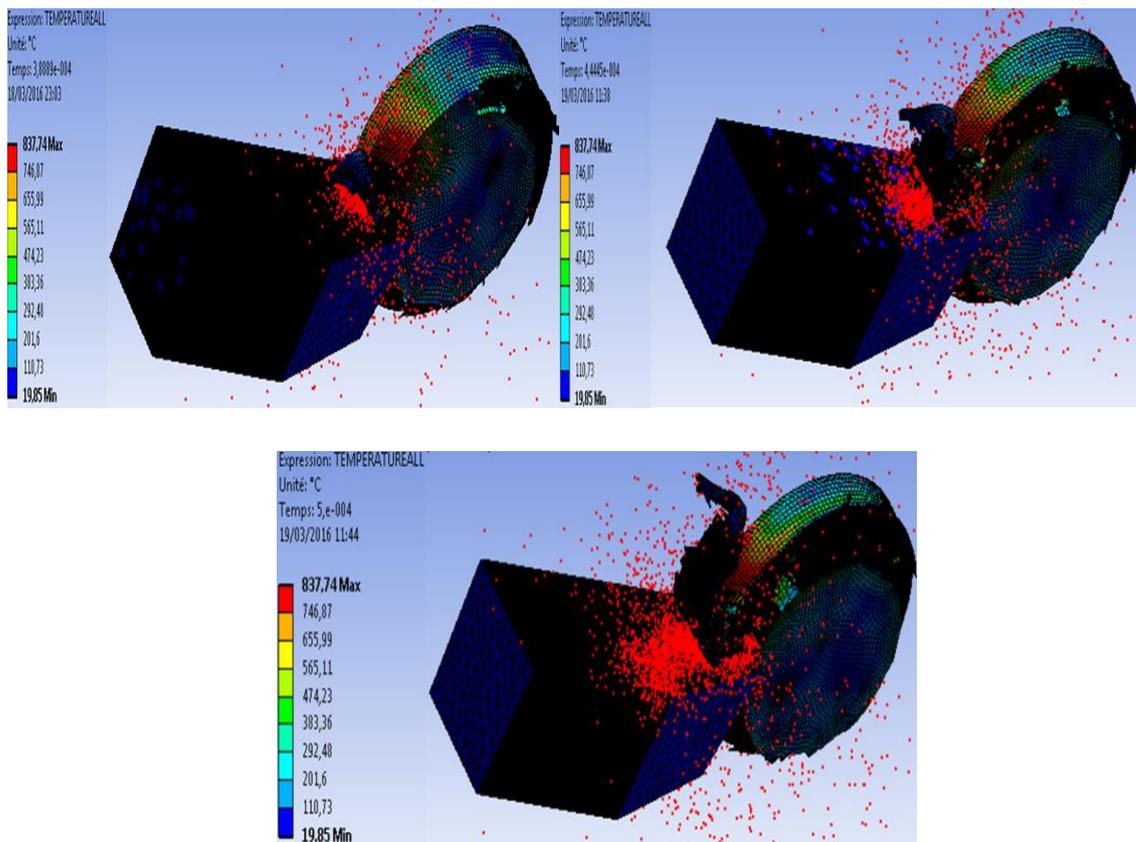
Dans notre modèle numérique d'usinage en 3D, nous arrivons à obtenir la formation d'un copeau et à définir l'influence de la vitesse de coupe sur le profil de la température à l'interface outil/copeau. On observe convenablement le déchirement de la matière formant un copeau. Les résultats sont illustrés sur les figures (4.5),(4.6) et (4.7).

##### 4.10.1. Distribution de la température à l'interface outil/pièce/copeau

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

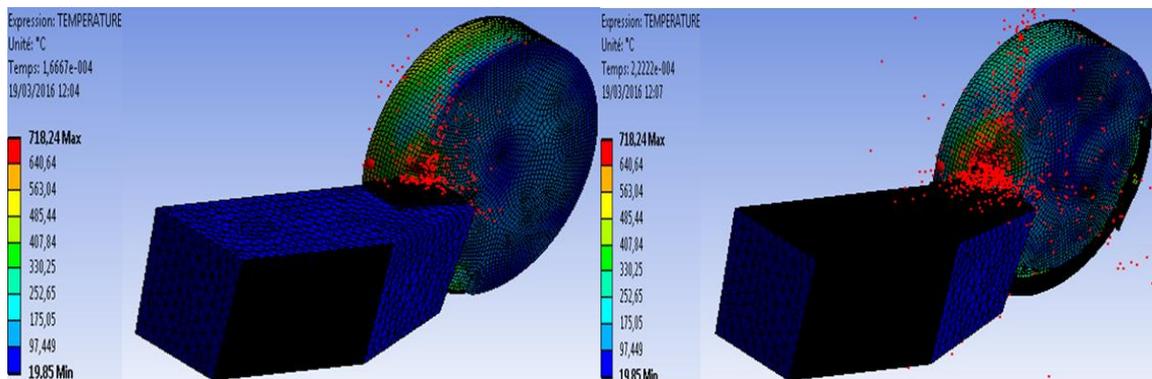
- 1<sup>er</sup> cas :  $V_c=300\text{m/min}$  ,  $f=0,4\text{mm/tr}$  :

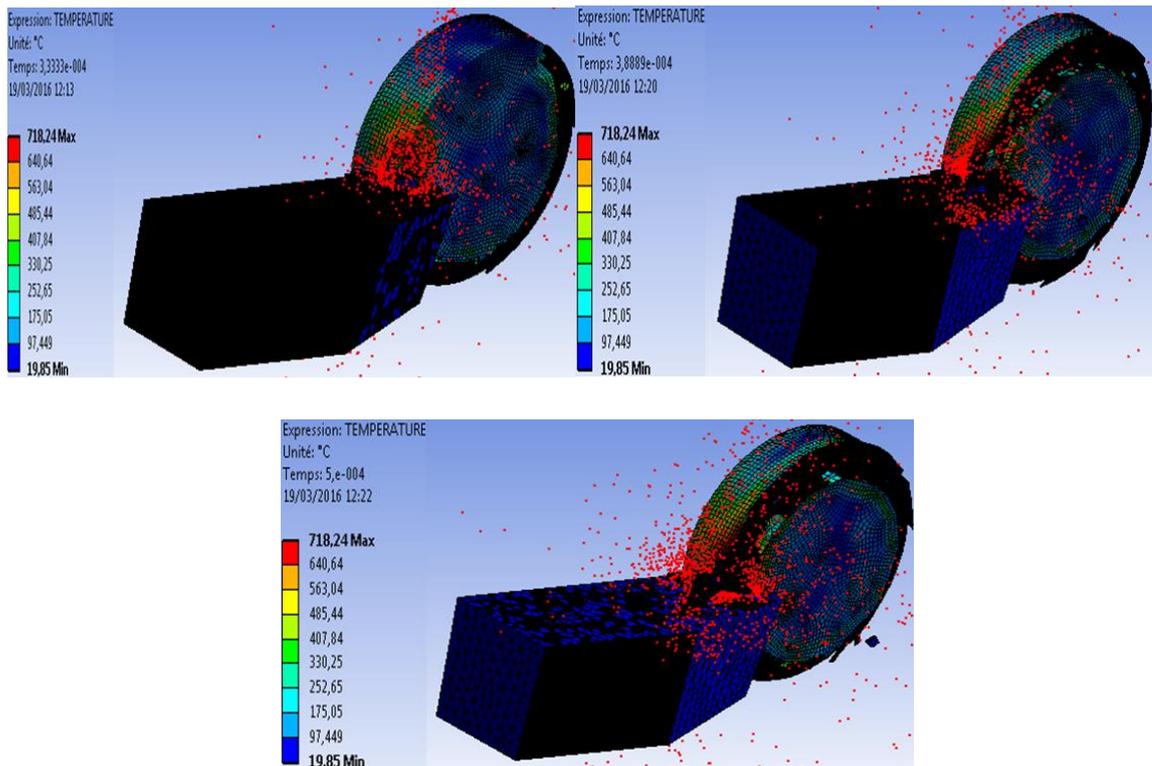




**Figure 4.5:** la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ( $V_c=300\text{m/min}$  and  $f=0,4\text{mm/tr}$ )

- 2<sup>ème</sup> cas :  $V_c=120\text{m/min}$  et  $f=0,2\text{mm/tr}$  :

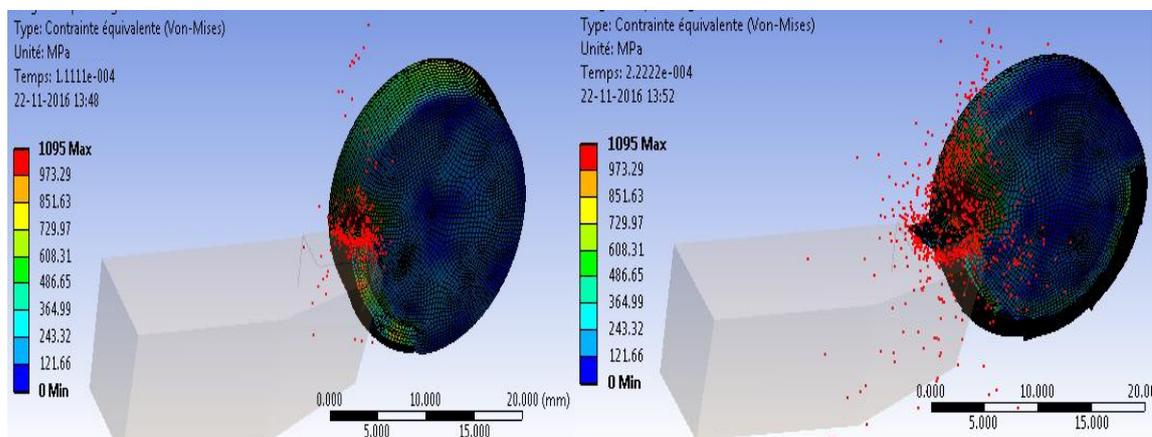


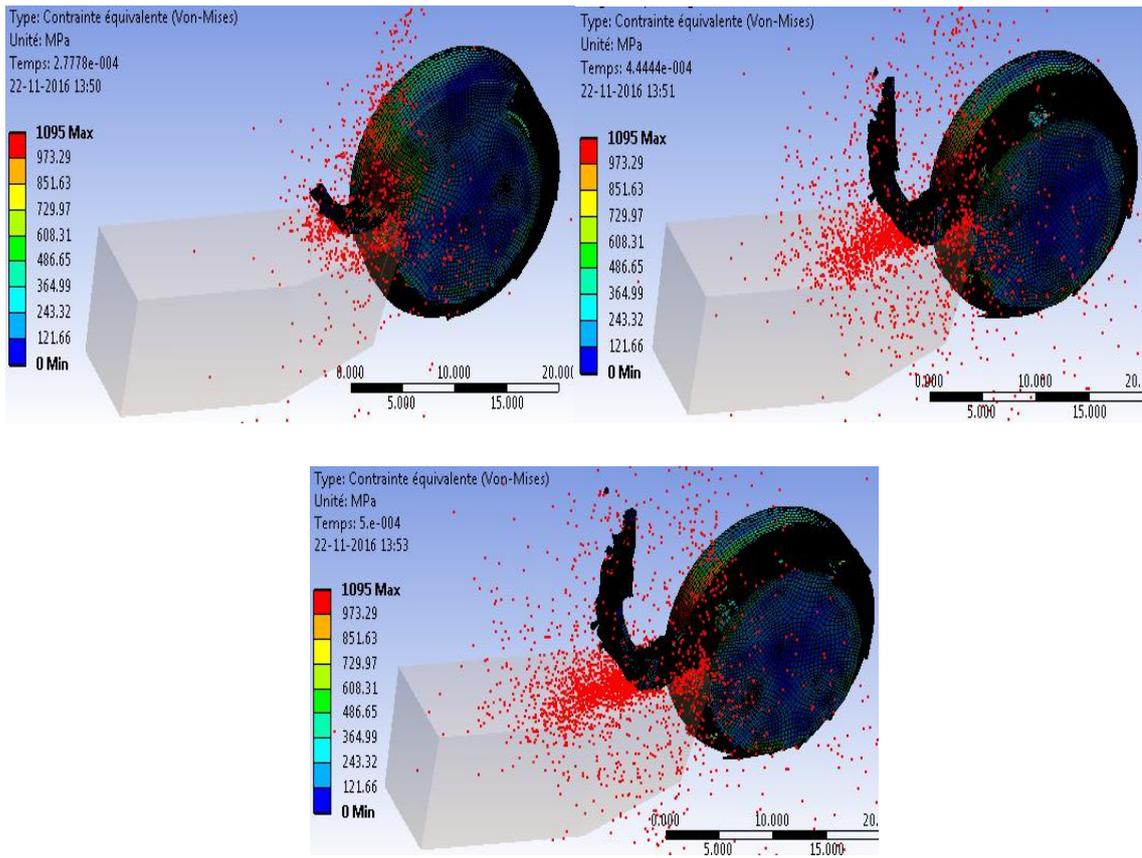


**Figure 4.6:** la distribution de la température à l'interface outil/copeau de l'acier XC48 ( $V_c=120\text{m/min}$  et  $f=0,2\text{mm/tr}$ )

#### **4.10.2. Distribution des contraintes à l'interface outil/pièce/copeau :**

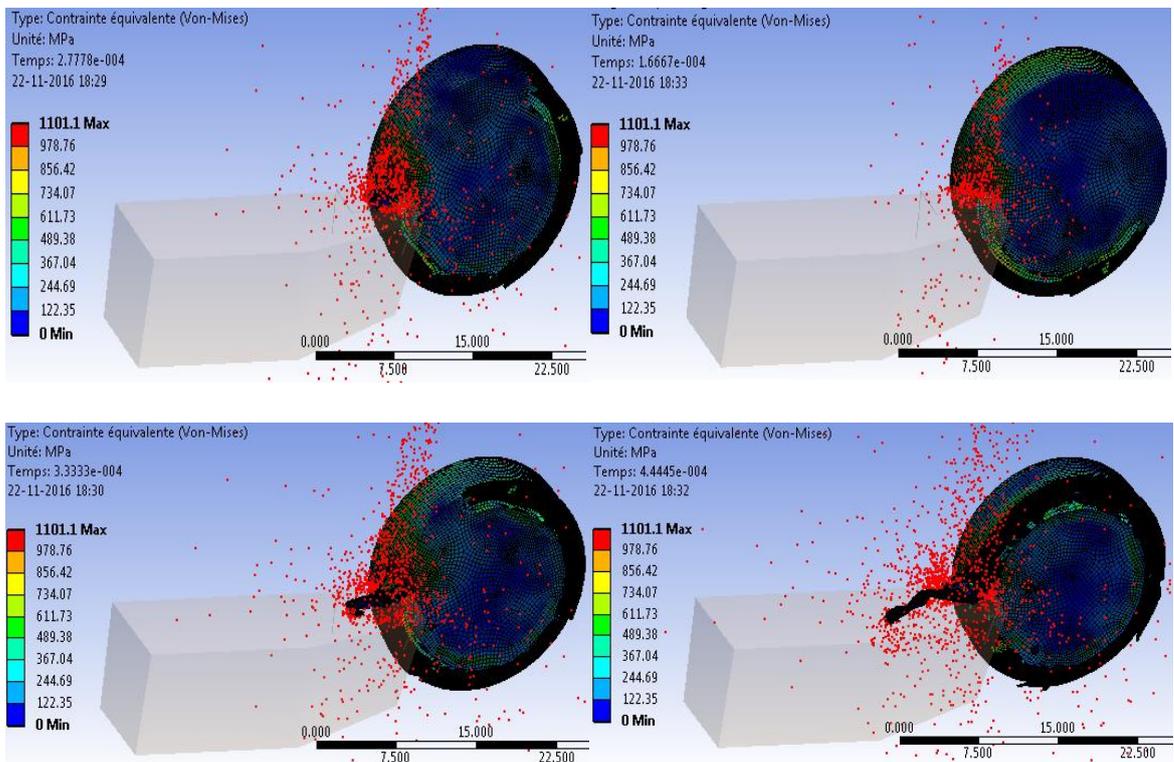
Les distributions du champ de la contrainte équivalente de Von Mises sont présentées dans notre simulation pour les deux cas étudiés.

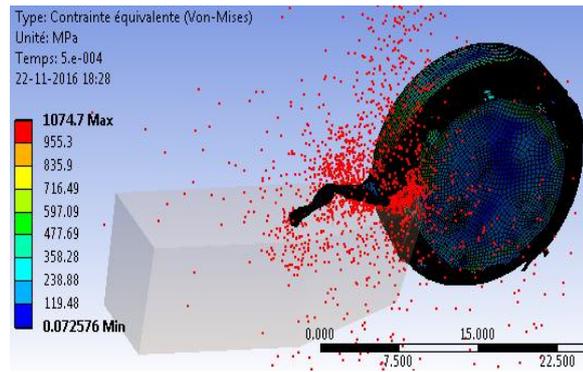




**Figure 4.7:** Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises

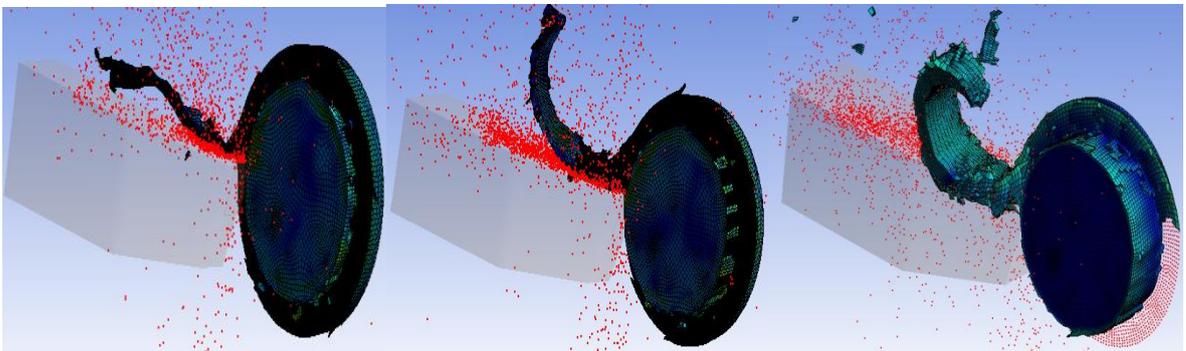
( $V_c=300\text{m/min}$  and  $f=0,4\text{mm/tr}$ )



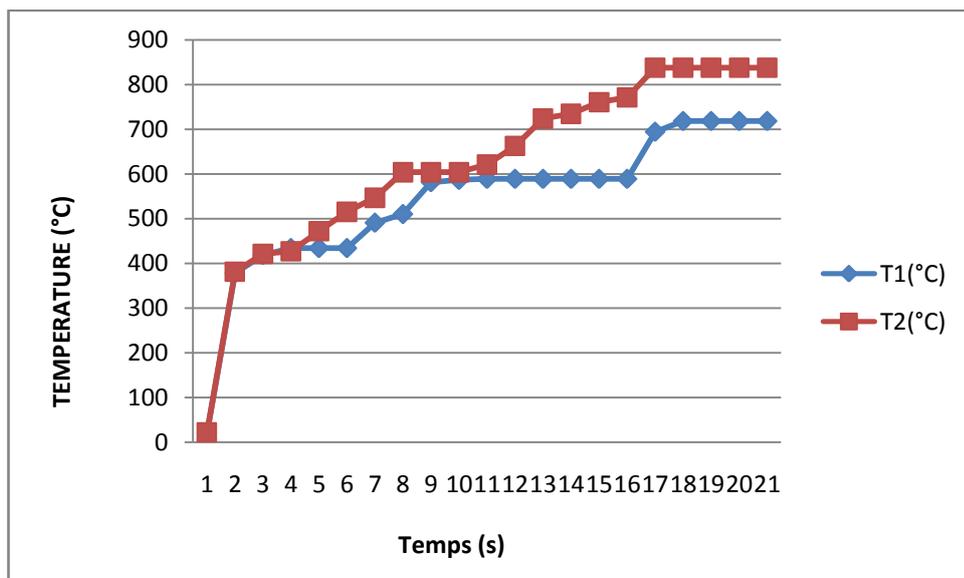


**Figure 4.8:** Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises

( $V_c = 120\text{ m / min}$ ,  $f = 0,2\text{ mm / tr}$ )



**Figure 4.9:** Détermination des copeaux



**Figure 4.10:** Variation de la température à l'interface de contact outil-copeau (T1:

$V_c = 300\text{ m / min}$ ,  $f = 0,4\text{ mm / tr}$ ; T2:  $V_c = 120\text{ m / min}$ ,  $f = 0,2\text{ mm / tr}$ )

#### 4.11. DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE :

Les résultats des simulations numériques de la coupe orthogonale en 3D sont illustrés sur les figures (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) et (4.9).

On voit sur les figures (4.5) et (4.6) que la température de la pièce varie au contact avec l'outil. Pour une vitesse de coupe de 300 m/min, la température atteint une valeur maximale de  $T_{max} = 837,74^{\circ}\text{C}$ . Par contre,  $T_{max} = 718,24^{\circ}\text{C}$  pour une vitesse de coupe de 120m/min (flamme rouge). Cette différence est essentiellement due à la zone de contact entre la pièce et l'outil. Plus elle est importante, plus la température est élevée. Ces résultats montrent que la température dans la zone de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

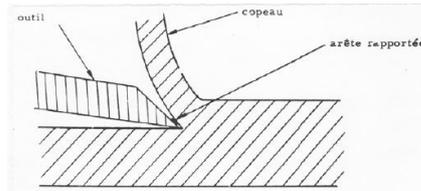
En adoptant la méthode Lagrangienne, la température est uniformément distribuée sur les surfaces et la morphologie du copeau est meilleure dans la figure (4.5).

Le phénomène de conduction est représenté en rouge ; par contre les dégradations des couleurs correspondent au phénomène de convection. La partie éloignée de la surface de contact qui est complètement refroidie est colorée en bleue. Plus la conductivité thermique du matériau est faible, plus la température est élevée.

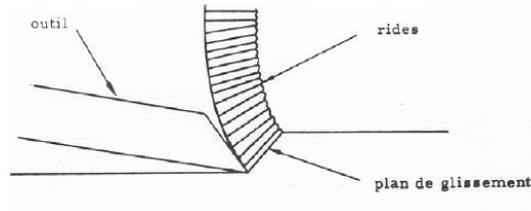
Les figures (4.7) et (4.8) présentent la répartition de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction du temps de simulation.

On remarque l'apparition de la zone de séparation du métal en pointe de l'outil. Dans cette région, l'outil exerce un effort de compression sur le matériau qui se sépare en deux parties : le copeau et la pièce usinée. On remarque aussi l'apparition de la zone de cisaillement primaire (en rouge) et secondaire (en orange)

La figure (4.9) illustre la forme et le type de copeau lors de l'usinage de notre matériau avec des vitesses différentes. A une vitesse moyenne, le type de copeau est cisailé. Ainsi, la face du copeau en regard de l'outil est lisse, alors que sa face opposée porte des entailles qui définissent la direction bien marquée des éléments isolés fortement liés les uns aux autres.



En augmentant la vitesse de coupe, la forme du copeau devient continue. A cette vitesse, le copeau s'écoule alors en forme d'une bande longue.



#### **4.12. Etude de transfert de chaleur par Ansys thermique transitoire :**

Dans le cadre de notre étude et pour mieux comprendre le phénomène de la formation des copeaux et la distribution de la chaleur à l'interface pièce/outil, une autre étape a été faite, cette dernière consiste à définir la thermo élasticité dans le cas où les problèmes thermique et mécanique sont découplés.

Le code d'éléments finis ANSYS 15 (3D) est utilisé dans cette partie pour simuler le contact outil/pièce ; le type d'analyse choisi est thermique transitoire.

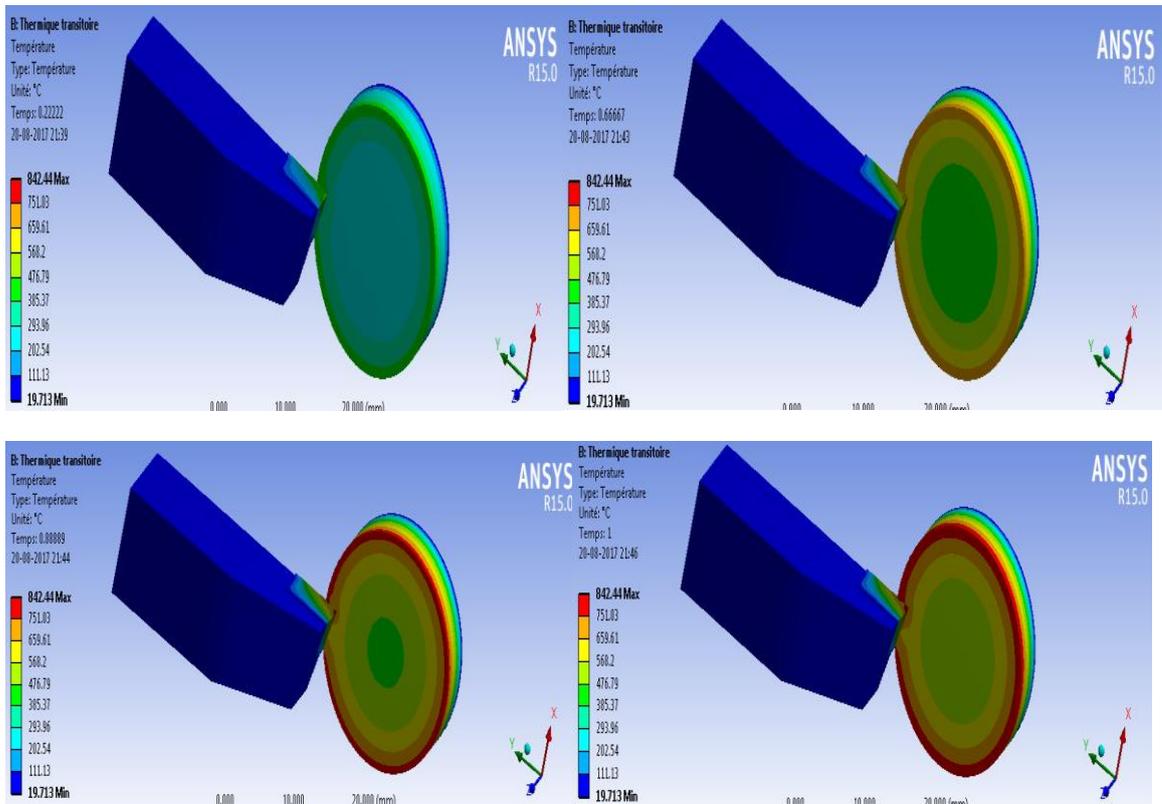
##### **4.12.1.Méthode de la résolution :**

Le contact entre l'outil et le copeau est thermiquement imparfait ce qui provoque un grand coefficient de transfert de chaleur par convection ( $h_{int} = 1000W/m^2K$ )(Ceretti, Filice et al. 2007)[48].

L'échange de chaleur par rayonnement est négligeable.

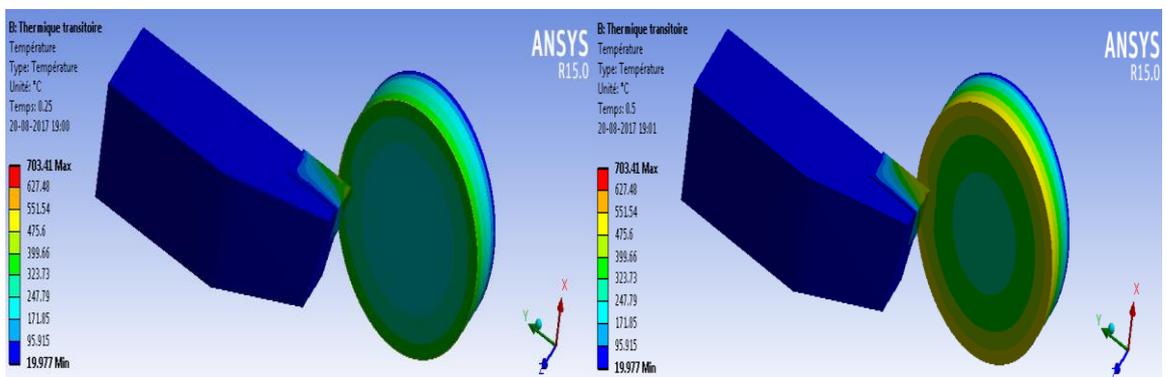
Les figures suivantes montrent les phénomènes de transfert de chaleur à l'interface Outil/Pièce pour les deux cas étudiés.

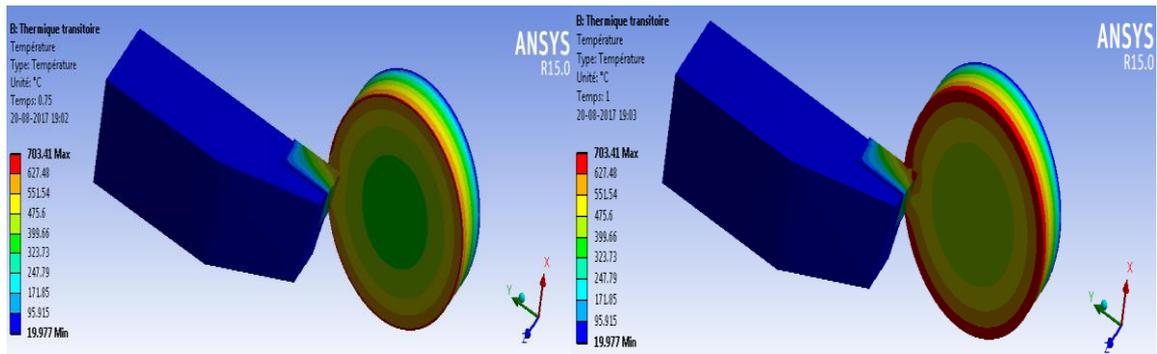
- 1<sup>er</sup> cas :  $V_c=300\text{m/min}$  ,  $f=0,4\text{mm/tr}$  :



**Figure 4.11:** Phénomène de transfert de chaleur à l'interface Outil-pièce lors de la découpe de l'acier XC48 pour  $V_c = 300\text{m / min}$ ,  $f = 0,4\text{mm / tr}$

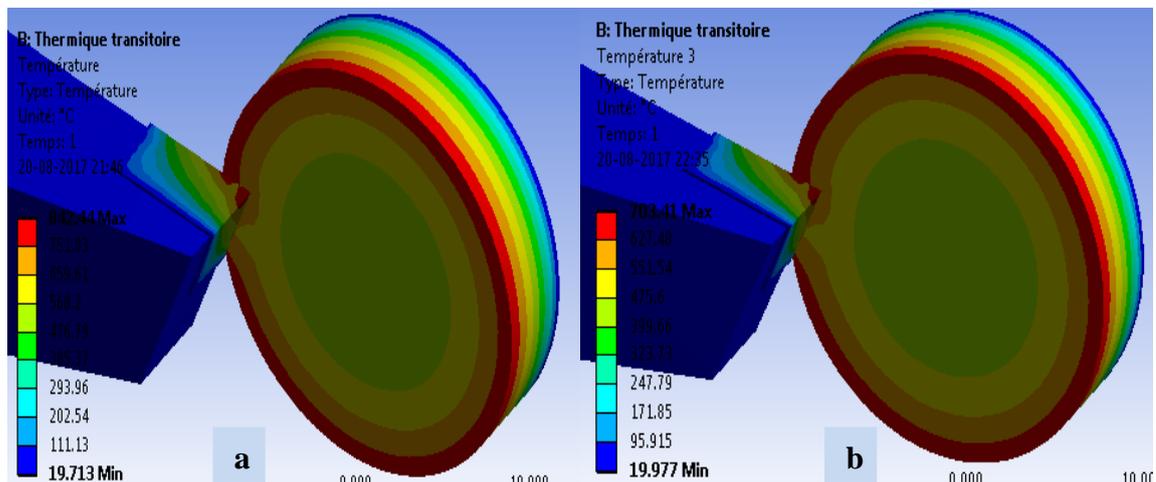
- 2<sup>ème</sup> cas :  $V_c=120\text{m/min}$  et  $f=0,2\text{mm/tr}$  :





**Figure 4.12:** Phénomène de transfert de chaleur à l'interface Outil-pièce lors de la découpe de l'acier XC48 pour  $V_c = 120\text{m / min}$ ,  $f = 0,2\text{mm / tr}$ .

**Comparaison entre les deux cas étudiés :**



**Figure 4.13 :** transfert de chaleur avec couplage thermomécanique

a)  $V_c = 300\text{m / min}$ ,  $f = 0,4\text{mm / tr}$  et b)  $V_c = 120\text{m / min}$ ,  $f = 0,2\text{mm / tr}$ .

De la figure (4.11),(4.12) et( 4.13) on constate que :

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.

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 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.

#### **4.13. Vérification expérimentale (Mesure de la température de contact) :**

La vérification du code a pour objectif de détecter les erreurs d'exécution et de vérifier si le code arrive à résoudre le système d'équation physique pour le problème étudié. Il s'agit alors d'une validation et d'une comparaison de la simulation avec les résultats de mesures expérimentales.

Pour cela, nous avons intégré une caméra infrarouge au dispositif expérimental afin de mesurer la température à l'interface outil -pièce .

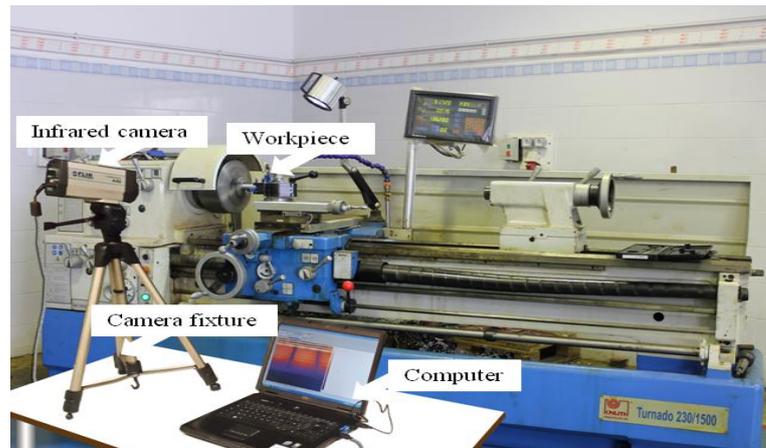
L'usinage des pièces s'est déroulé sur un **Tour parallèle de** Marque Knuth, de modèle Turnado 230/1500 et de puissance 7.5 KW. La tension du moteur est égale à 400 V. Les essais ont été effectués au niveau de l'atelier du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) d'Annaba(Algérie).

La Figure **4.14** présente le principe et la chaîne de mesure de la température de contact lors d'une opération de chariotage de l'acier XC48 à l'aide d'une caméra infrarouge de marque « **FLIR Thermo Vision™ A40**».

**Les caractéristiques de la caméra sont les suivantes :**

- ✓ Champ de vision / la distance de focus min 24 ° x 18 ° / 0,3 m
- ✓ La résolution spatiale (IFOV) 1,3 mrad
- ✓ Sensibilité thermique @ 50/60Hz 0,08 ° C à 30 ° C
- ✓ Type de détecteur Matrice à plan focal (FPA), micro bolomètre non refroidi
- ✓ Gamme spectrale de 7,5 à 13 μm
- ✓ Plage de température : - 40 ° à + 2000°C (3632 ° F)
- ✓ Précision (% de la lecture) ± 2 ° C ou ± 2%

✓ LOGICIEL : Therma-CAM Researcher Professional 2.9

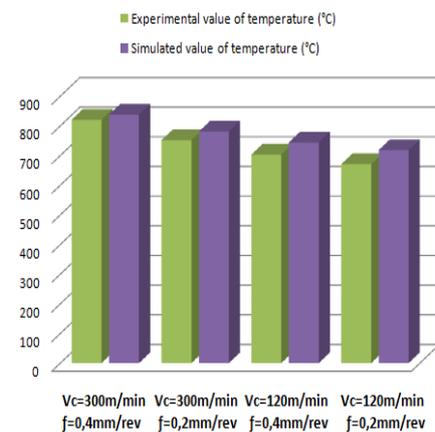


**Figure 4.14:** Prédiction et validation expérimentale

A partir des résultats obtenus expérimentalement et par la simulation des éléments finis, la différence de la température n'est pas supérieure à 4,485% comme mentionné au niveau du tableau 4.4.

On constate que la validation de l'étude réalisée est obtenue avec une conformité et une concordance acceptables entre les résultats numériques et expérimentaux.

Vitesse de coupe (m/min)	Avance (mm/tr)	Valeurs Expérimentales de la température (°C)	Valeurs de la température obtenues par simulation (°C)	Erreur %
300	0,4	820,42	837,74	2,067
300	0,2	751,53	780,68	3,734
120	0,4	703	744,04	5,516
120	0,2	670,67	718,24	6,623



**Tableau 4.4:** Comparaison de la distribution de la température expérimentalement et par simulation pour différentes vitesses de coupe et différentes avances.

Ce chapitre s'est focalisé sur les conditions de contact thermique à l'interface outil/pièce /copeau en usinage à sec de l'acier XC48. L'objectif principal de cette partie est l'étude du phénomène d'enlèvement de matière et plus exactement pour le cas de la coupe orthogonale 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 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.

L'étude mathématique qui sera effectuée par la suite nous permet d'optimiser les conditions de coupe afin d'évaluer l'impact de ces conditions sur la température.

#### **4.14. Modélisation de la température par la méthode des plans d'expériences**

Après avoir pris connaissance du principe de la méthode des plans d'expériences au chapitre précédent ; nous savons maintenant que cette technique va nous permettre de répondre à nos exigences, dans le but de prévoir l'effet des conditions de coupe sur la température et modéliser la réponse étudiée, afin de réduire le nombre d'expériences et de décrire l'influence des conditions de coupe sous l'effet des facteurs : c'est la méthode des plans d'expériences.

On s'intéresse dans cette partie à l'influence des paramètres de coupe sur la température du matériau XC48. Dans ce cadre, il est judicieux d'appliquer une modélisation du comportement par la méthode des plans d'expériences.

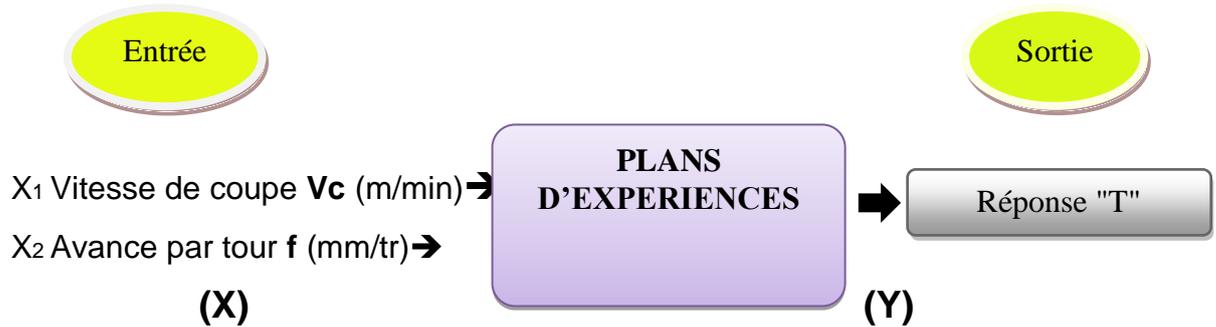
Cette technique va nous permettre de répondre à nos exigences, et de voir essentiellement la réaction du matériau XC48 au cours des essais.

Le modèle qui sera obtenu par la suite va nous faciliter la prévision de la température en n'importe quel point du domaine expérimentale.

Dans notre cas, nous avons tenu compte de deux paramètres de coupe (deux facteurs) les plus influents qui sont, la vitesse de coupe avec deux niveaux (deux valeurs expérimentales) ainsi que l'avance pour connaître l'effet de chaque facteur sur la température ainsi que leur combinaison afin de déduire laquelle des valeurs de ces facteurs permet de s'approcher d'une usure nulle.

On n'a pas pris en considération la profondeur de passe du fait qu'elle n'a aucun effet significatif sur la mesure de la température de coupe.

Le but de cette méthode est de voir la variation de la température en fonction de deux paramètres de régime de coupe ( $V_c, f$ ). Ces derniers représentent les paramètres d'entrée selon la figure (4.15). Au moyen d'un modèle mathématique qui sera établi, la réponse du système en l'occurrence la température est représentée par "T".



**Figure 4.15:** Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai

#### 4.14.1. Proposition d'un modèle :

La température à l'interface outil/pièce/copeau peut être exprimée en termes de paramètres de coupe, à savoir la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, sous sa forme générale :

$$Y = \text{fonction}(V_c, a_p, f) \quad (4.7)$$

Dans notre cas:  $a_p$  n'est pas pris en considération du fait qu'il n'a aucun effet significatif.

L'optimisation de la température a été effectuée à l'aide de logiciels de plans d'expériences, ce dernier a été créé en 2004 par l'éditeur Dr El-Mossaoui Hichem de l'université Saad Dahlab de Blida 1[101.103].

Le logiciel Hide génère trois types de versions :

- ✚ **Hide 1** pour les variables centrées réduites,
- ✚ **Hide 2** concerne les variables réelles,
- ✚ **Hide 3** s'applique aux plans non conventionnels.

Dans notre cas on s'intéresse à la première version Hide 1.

Ce programme permet d'effectuer les tâches suivantes :

- ✓ Calcul des effets et des interactions entre les facteurs (donc le modèle mathématique),
- ✓ Analyse statistique et coefficients du modèle,

- ✓ Les iso-réponses et les surfaces de réponses,
- ✓ Courbes de niveau de la fonction d'erreur de prédiction.....etc.

#### **4.14.2. Obtention et mesure des réponses :**

En tenant compte des objectifs à atteindre, il est impératif d'établir la liste des réponses expérimentales à étudier et ensuite de faire une proposition d'un modèle mathématique. Pour cela, on doit d'abord obtenir des réponses réelles par un test expérimental réalisé dans les laboratoires spécialisés.

Le test expérimental sur le comportement du matériau XC 48 a été réalisé avec des données d'essais bien définies dont les valeurs sont données par le tableau(4.5) Ces essais ont été effectués au niveau de l'atelier du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) d'Annaba.

<b>N° essai</b>	<b>Facteur 1 Vc (m/min)</b>	<b>Facteur 2 f (mm/tr)</b>	<b>Réponse Température (°C)</b>
1	120	0.2	670.67
2	300	0.2	751.53
3	120	0.4	703
4	300	0.4	820.42

**Tableau 4.5:** Les 2 facteurs ; leurs unités, leurs maximums et leurs minimums

#### **4.14.3. Analyse des résultats d'essai**

$$x_i = \frac{u_i - \left( \frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left( \frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (4.8)$$

Telle que :

$u_{min}$  : Représente la borne inférieure des niveaux;

$u_{max}$  : Représente la borne supérieure des niveaux;

$u_i$  : Représente la valeur sur laquelle on effectue le codage;

$x_i$  : Représente la valeur codée.

En utilisant la formule (4.8), pour tous les facteurs, on obtient le codage suivant :

#### **4.14.4.Codage associé aux modèles :**

##### **4.14.4.a. Codage du facteur $x_1$ (vitesse de coupe) :**

Ce facteur prend deux niveaux, la valeur minimale étant 120 elle prend le code (-1), la valeur maximale étant 300, elle prend le code (+1), on effectue un codage suivant la formule (4.8) on aura :

$$x_1 = \frac{230 - \left(\frac{300+120}{2}\right)}{\left(\frac{300-120}{2}\right)} \Leftrightarrow x_1 = 0,22 \quad (4.9)$$

##### **4.14.4.b. Codage du facteur $x_2$ (l'avance) :**

Ce facteur prend deux niveaux, la valeur minimale étant 0,2 elle prend le code (-1), la valeur maximale étant 0,4 elle prend le code (+1), on aura :

$$x_2 = \frac{0,25 - \left(\frac{0,2+0,4}{2}\right)}{\left(\frac{0,4-0,2}{2}\right)} \Leftrightarrow x_2 = -0.5 \quad (4.10)$$

#### **4.14.5. Estimation des coefficients du modèle :**

Une fois le codage des différents facteurs obtenu, nous formons la matrice du modèle, elle est présentée dans le tableau suivant :

N° essai	Facteur 1 Vc (m/min)	Facteur 2 f (mm/tr)	Réponse Température (°C)
1	-1	-1	670.67
2	1	-1	751.53
3	-1	1	703
4	1	1	820.42
<b>Niveau -1</b>	120	0.2	
<b>Niveau +1</b>	300	0.4	

**Tableau 4.6:** Les valeurs codées des facteurs combinées avec les résultats obtenus.

Ce tableau comprend quatre colonnes, la première identifie les essais, la seconde ainsi que la troisième nous indique les valeurs des deux effets aux différents tests et enfin la quatrième nous montre les résultats obtenus appelés aussi réponses. L'essai n°1 est celui pour lequel les deux facteurs étudiés sont aux niveaux bas, 120m/min (ou - 1 en unités codées), 0.2mm/tr (ou - 1 en en unités codées). La ligne 4 comporte les valeurs des deux facteurs avec les niveaux hauts, 300m/min (+1 en unités codées), 0.4mm/tr (+1 en unités codées). Les lignes intermédiaires 2 et 3 représentent les combinaisons de valeurs des deux effets. Ce tableau est intitulé tableau d'expérimentations dans le cas d'utilisation des unités physiques habituelles (Tableau 4.5), par contre s'il emploie les unités codées comme le montre le (Tableau 4.6), ce tableau est appelé un plan d'expériences. Ce type de représentations est adéquat lorsque les effets ne possèdent pas les mêmes unités et les mêmes échelles.

#### **4.14.6. Modélisation mathématique :**

Après avoir estimé les coefficients du modèle, On peut maintenant établir le modèle mathématique : c'est un polynôme du premier degré, qui relie la réponse aux facteurs. Le modèle développé peut être utilisé efficacement pour prédire la température de coupe lors de l'opération de chariotage, il prend la forme suivante :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (4.11)$$

Avec :

$y$ : Représente la valeur de la réponse ;

$x_1$  : Représente la valeur lue dans la matrice d'expérience (valeur du facteur 1) ;

$x_2$  : Représente la valeur lue dans la matrice d'expérience (valeur du facteur 2) ;

$a_0$ : La valeur moyenne de l'effet des deux facteurs,

$a_1$  : L'effet de la vitesse de coupe,

$a_2$  : L'effet de l'avance,

$a_{12}$  : L'interaction entre  $a_1$  et  $a_2$ .

Une fois les coefficients calculés on établit le modèle mathématique suivant :

$$T = 736.4050 + 49.54a_1 + 25.3050a_2 + 9.14a_1 * a_2 \quad (4.12)$$

Ce modèle mathématique représente convenablement le phénomène étudié dans le domaine expérimental. L'intérêt de modéliser la réponse est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

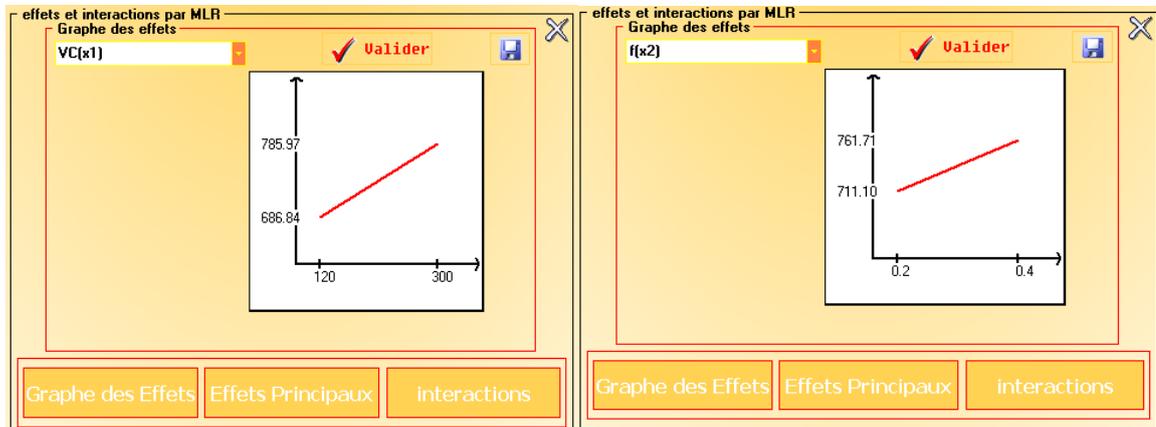
A partir de ce modèle, on peut obtenir des courbes de réponses et d'iso-réponses illustrant la variation de la température de coupe en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ).



**Figure 4.16:** Influences des coefficients du modèle mathématique sous forme d'histogramme et sectorielle

#### 4.14.7. Effet des paramètres de coupe sur la température :

La figure (4.17) montre l'interaction et l'effet des paramètres de coupe sur la température : on remarque que la valeur de la température augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance.

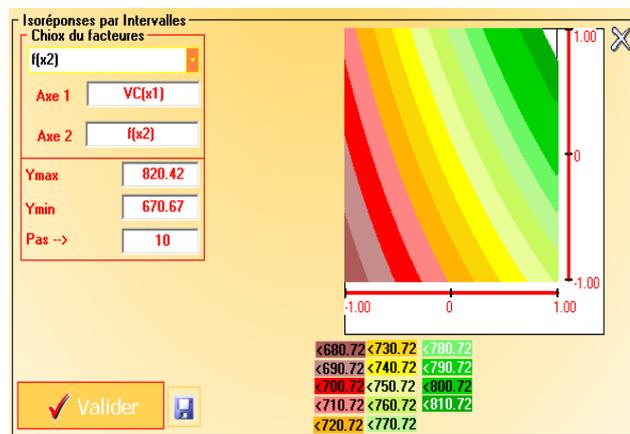


**Figure 4.17:** l'effet et interaction de la vitesse de coupe et de l'avance sur la température

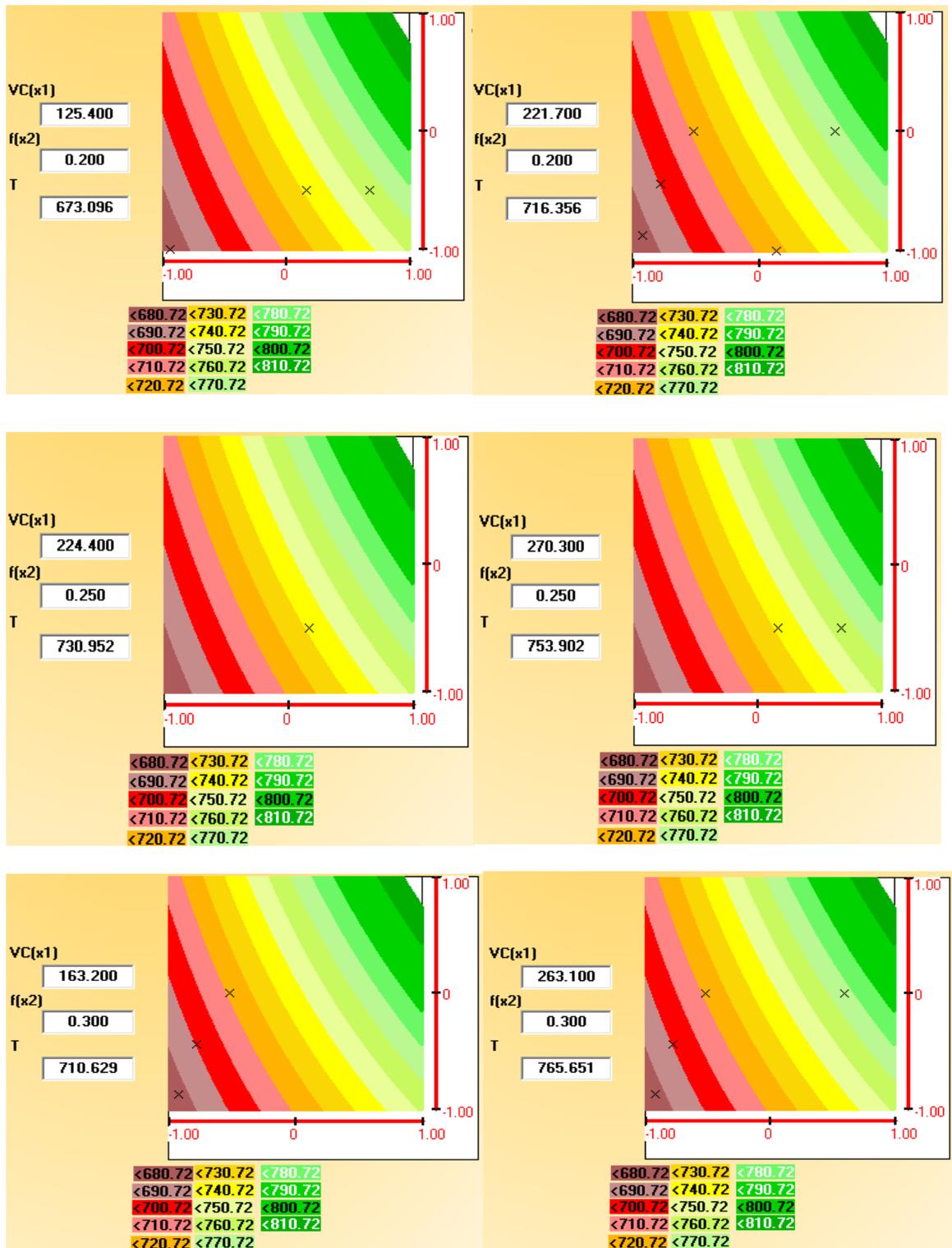
#### 4.14.8. Les courbes d'iso-réponses :

Les iso-réponses montrent clairement que quel que soit l'avance enregistrée, l'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la température. A titre d'exemple (Figure 4.19): Pour une avance de 0.3 mm/tr, on a varié la vitesse de coupe de 163,20m/min à 263.10 m/min.

La figure ci-dessus illustre le résultat de notre modèle mathématique, à partir de ces résultats obtenus, on peut constater que la vitesse de coupe est le facteur le plus influant sur l'augmentation de la température.



**Figure 4.18 :** courbes d'iso-réponses par intervalles



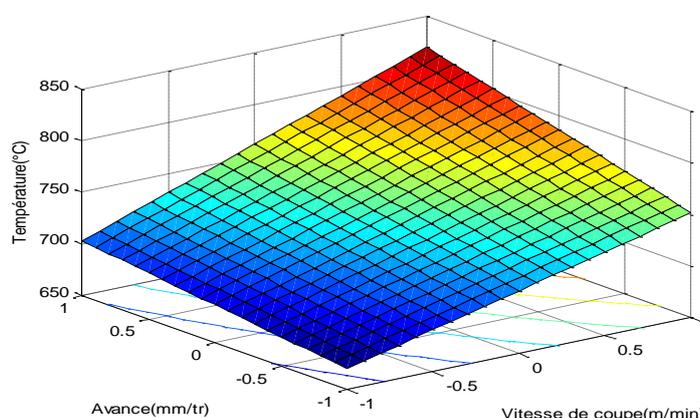
**Figure 4.19:** courbes d'iso-réponses exprimant la variation de la température en fonction des paramètres de coupe

#### **4.14.9.Surface de réponse de la variation de la réponse :**

L'équation du modèle mathématique nous permet de visualiser la variation de la réponse sous forme de surface dans l'espace tracée dans un repère à trois axes. Il est possible aussi de projeter cette surface sur un plan afin d'obtenir des courbes qu'on appelle les iso-réponses, cela nous donne une autre vision d'analyse sous un autre angle qui permet de compléter les surfaces de réponse.

La figure (4.20) illustre la variation de la température en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance. Elle permet de voir le comportement des deux facteurs utilisés sur la réponse qui est la température.

Cette représentation est obtenue par le logiciel Matlab.



**Figure 4.20:** Courbe de réponse exprimant la variation de la température en fonction des paramètres de coupe

Nous avons présenté dans cette partie l'application de la méthode des plans d'expériences dans le but d'optimiser les conditions de coupe en usinage de l'acier XC48 . Après avoir estimé les coefficients, le modèle mathématique pourra prédire d'une façon fiable la température moyenne à l'interface outil/pièce/copeau lors d'une opération de chariotage développé sur la base d'observations expérimentales.

L'expression analytique ainsi élaborée reliant chaque réponse étudiée aux facteurs et interactions influents a été établie pour mettre en évidence les corrélations qui les lient avec les différentes représentations graphiques.

A travers des résultats obtenus on a pu constater que :

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

## CONCLUSION GENERALE

Le poids économique des paramètres intervenant lors de l'usinage, comme la lubrification, l'usure, les contacts thermiques interracial, et autres, justifie l'intérêt croissant accordé au phénomène de la coupe des métaux.

En effet, la connaissance de cet état permet de comprendre le comportement statique ou dynamique des pièces à usiner.

La caractérisation morphologique des surfaces procède d'une analyse statique des différents profils des surfaces usinées. Elle s'appuie sur les expériences, la modélisation et la simulation numérique des surfaces usinées ou à usiner. Ces dernières citées s'avèrent particulièrement intéressantes pour identifier l'état de la surface usinée.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux simulations numériques de la coupe des pièces mécaniques. Celle-ci occupe une place importante dans l'industrie mécanique.

La simulation numérique des efforts de coupe a déjà fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques. Ces derniers ont été cités dans les différents chapitres de notre travail. Pour notre cas, il a été constaté que parmi les paramètres étudiés lors notre travail, les problèmes vibratoires ont été à l'origine de plusieurs problèmes lors des opérations d'usinage.

Lors de notre étude, les travaux réalisés ont porté sur :

- L'étude expérimentale,
- La modélisation et la simulation numérique du procédé d'usinage.

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution des travaux scientifiques sur l'usinage.

Lors de notre travail, on a opté pour le procédé de tournage. Cet état de l'art a mis en évidence les méthodologies les plus pertinentes de la coupe des

métaux, et plus particulièrement sur le comportement du système POM (Pièce/Outil de coupe/Machine-outil). Grâce à système, une introduction de tous les paramètres ayant trait aux modèles d'efforts lors de l'usinage a été étudiée.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré que lors de l'usinage, les essais thermiques et les modèles numériques associés à la coupe des métaux sont indispensables lors du contact de l'outil de coupe avec la pièce à usiner. En effet et lors de ce contact, une température de coupe est générée à l'interface de l'outil et du copeau. L'estimation de cette température dans ces zones peut conduire à une fragilisation et à une usure rapide des outils de coupe.

La chapitre III a été consacré à l'apparition des vibrations lors de l'usinage. A partir des expériences, un modèle géométrique a été proposé pour les opérations du procédé de tournage. Les différents paramètres ayant trait à ce procédé ont été identifiés et étudiés. Les résultats ont été d'une part profitables pour la compréhension de la coupe des métaux et d'autre part bénéfiques sur la résolution de la réponse de la machine-outil à des conditions de coupe bien définies.

Notre modèle s'est basé sur une approche du système dynamique en résolvant la limite de stabilité.

Dans le chapitre IV, il a été procédé à réaliser des opérations d'usinage et à l'utilisation par la suite une modélisation et une simulation numérique. Celles-ci ont concerné la formation du copeau d'une opération de chariotage et de prévoir la distribution de la température à l'interface outil/copeau.

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé celle des plans d'expérience pour simuler ces résultats expérimentaux.

On sait que dans les différentes recherches, les essais sont obligatoires. Or, ces essais sont trop souvent conduits sans méthodologie et les résultats obtenus sont le plus souvent mal exploités. Ainsi, la méthode des plans d'expériences permet une meilleure organisation des essais accompagnant des résultats expérimentaux et ces essais seront applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries.

Finalement, nous nous sommes intéressés à étudier un des procédés d'usinage à savoir le tournage. Notre étude nous a permis de distinguer tous les paramètres ayant trait à ce procédé. Nous avons déterminé les efforts de coupe, la vibration, la température de contact et autres.

Plusieurs méthodes d'optimisation et de simulation ont été développées dans l'optique de bien maîtriser le procédé de la coupe des métaux et l'impact des paramètres de coupe.

Nous avons constaté qu'il était nécessaire de multiplier les sources d'information. Celles-ci peuvent être différentes l'une par rapport à l'autre. Elles peuvent décrire la rugosité de la pièce, les efforts de coupe et les vibrations générées lors de l'usinage.

De ce travail, on peut conclure que :

- Les différentes approches de simulation de la coupe des métaux sont complémentaires,
- L'étude réalisée a mis en évidence la relation complexe entre l'instabilité en usinage et les conditions de coupe appliquées,
- Une nouvelle approche a été développée pour déterminer l'effet des paramètres du procédé d'usinage sur la stabilité du système,
- Les résultats obtenus expérimentalement et vérifiés par la suite montrent un accord parfait avec l'étude de la théorie du lobe de stabilité,
- Une nouvelle méthode de fiabilité utilisant un modèle mathématique a été développée et a été testée par une méthode d'optimisation. Les résultats ont montré que le modèle est très significatif et s'adapte parfaitement avec la théorie des lobes de stabilité et également avec les résultats expérimentaux,
- L'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la température,
- L'interaction des deux paramètres c'est-à-dire l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance résulte une augmentation de la réponse qui est la température,
- La vitesse de coupe est le facteur le plus influant lors de l'usinage,
- L'état de surface de la qualité de la pièce usinée et l'optimisation du procédé d'usinage sont conditionnées par un bon choix des paramètres de

coupe à savoir la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et autres. Un mauvais choix ou une mauvaise sélection d'un de ces paramètres peut facilement générer des vibrations pouvant intervenir sur l'état de la surface à usiner ou usinée. Aussi, l'une de ces conséquences est l'usure prématurée de l'outil de coupe,

- L'utilisation des expériences continues dans l'industrie peut se révéler couteux et parfois difficilement exploitable. Pour cela, le développement des outils de simulation numérique peut s'avérer nécessaire et économique. Ce dernier peut être développé grâce à des modèles prédictifs pour bien maîtriser et bien comprendre par exemple les phénomènes thermiques lors du contact de la pièce à usiner avec l'outil de coupe.

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

Au cours de ces dernières années, et grâce à ce travail, il nous été permis de découvrir l'état de l'art de l'usinage.

Nous envisageons dans le futur d'exploiter les résultats obtenus pour augmenter la durée des outils de coupe, et l'installation d'une détection directe de la température lors du contact de la pièce avec l'outil de coupe. Aussi, nous envisageons d'être proches en pratique avec l'industrie pour bien maîtriser l'analyse vibratoire et bien appliquer les paramètres de coupe comme dans le cas de l'usinage à grande vitesse (UGV).

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

$V_c$  : Vitesse de coupe

$a_p$  : Profondeur de passe

$V_f$  : Vitesse d'avance

$f$  : Avance par tour

(UGV) : Usinage Grande Vitesse

$\vec{q}$  : Vecteur des degrés de liberté du système POM

[ M ] : Matrice de masse

[ C ] : Matrice d'amortissement

[ K ] : Matrice de rigidité

(Z1) : Zone de cisaillement primaire

(Z2) : Zone de cisaillement secondaire

(Z3) : Zone de cisaillement tertiaire (zone morte)

$t_u$  : Epaisseur du copeau non déformé (avance)

$D_{av}$  : Direction d'avance

$r_\epsilon$  : Rayon de l'arête

$\sigma$  : Contrainte équivalente qui représente la limite d'écoulement plastique

$\bar{\epsilon}^p$  : Déformation plastique

$\dot{\bar{\epsilon}}$  : Vitesse de déformation

$T$  : Température

$A, B, \beta, n$  : Coefficients liés au comportement élasto-plastique du matériau

$C$  : Sensibilité à la vitesse de déformation

$m$  : Sensibilité du matériau à la température

$T_{amb}$  : Température de référence (ambiante)

$T_0$  : Température de fusion

$\dot{\bar{\epsilon}}_t$  : Limite du domaine de déformation

$C_0$  : Composante de contrainte qui correspond à la densité de dislocation sur les contraintes d'écoulement

$C_0, C_1 \dots \dots C_5$  et  $n$  : Constantes du matériau

$T$  : Température absolue

$F_f(t)$  : Effort d'avance [ $N$ ]

$K_f$  : Coefficient spécifique de coupe [ $MPa$ ]

$b$  : Largeur de copeau [ $mm$ ]

$F_f(t)$  : Effort de coupe linéaire [ $N$ ]

$h(t)$  : Epaisseur instantanée du copeau [ $mm$ ]

$h_0$  : Épaisseur de copeau nominale [ $mm$ ]

$T$  : Période de révolution de la pièce en tournage ou la période de passage de dents en fraisage [ $s$ ]

$[y(t - T) - y(t)]$  : Variation de l'épaisseur du copeau [ $mm$ ]

$m$  : Masse

$k$  : Raideur

$C$  : Amortissement

$\omega_n$  : Pulsation propre du système

$\omega_c$  : Pulsation critique (pulsation de broutement)

$\xi$  : Coefficient d'amortissement

$\Psi(s)$  : Fonction de transfert

$h(0)$  : Transformées de Laplace de l'épaisseur du copeau non déformée

$h(s)$  : Epaisseur instantanée du copeau dans le domaine de Laplace

$blim$  : Profondeur de passe limite

$G$  : Partie réelle de la fonction de transfert

$H$  : Partie imaginaire de la fonction de transfert

$\varphi$  : Déphasage

$N$  : Vitesse de rotation de la broche

$\omega_c$  : Pulsation de broutement (pulsation de vibration du système)

$f_c$  : Fréquence de broutement

$\varepsilon$  : Déphasage entre l'onde actuelle et l'onde précédente,

$\xi$  : Taux d'amortissement

$f_n$  : Fréquence naturelle

$R_a$  : Rugosité arithmétique  
(OEP) : Méthode d'optimisation par essaim particulaire  
(PSO) : ParticleSwarm, Optimization  
 $X$  : Position des particules  
 $V$  : Vitesse des particules  
 $w$  : Paramètre d'inertie  
 $Pbest$  : Meilleure position personnelle  
 $Gbest$  : Meilleure solution de l'essaim  
 $rand_1, rand_2$  : Variables aléatoires entre 0 et 1  
 $c_1, c_2$  : Constantes positives  
 $k$  : Variable d'itération  
 $\bar{\epsilon}^p$  : Déformation plastique équivalente  
 $\dot{\bar{\epsilon}}$  : Vitesse de déformation plastique  
 $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  : Seuil à partir duquel la vitesse de déformation est prise en compte  
 $T_{amb}$  : Température ambiante ou de référence  
 $T_0$  : Température de fusion  
 $(A, B \text{ et } n)$  : Paramètres représentant l'écrouissage  
 $C$  : Constante définissant la dépendance à la vitesse de déformation  
 $m$  : Paramètre définissant la dépendance à la température  
 $D1, D2, D3, D4 \text{ et } D5$  : Constantes de rupture de Johnson-Cook  
 $k$  : Conductivité thermique ( $W/mk$ )  
 $c$  : Chaleur spécifique ( $J/kgk$ )  
 $\rho$  : Densité ( $\frac{kg}{m^3}$ )  
 $h_{int}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection  
(MEF) : Méthode des éléments finis  
 $u_{min}$  : Représente la borne inférieure des niveaux  
 $u_{max}$  : Représente la borne supérieure des niveaux  
 $u_i$  : Représente la valeur sur laquelle on effectue le codage  
 $x_i$  : Représente la valeur codée  
 $y$  : Représente la valeur de la réponse

## REFERENCES

- [1] :S. Bissey. Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement. PhD thesis, ENSAM Cluny, 2005.
- [2] :TarekBrahamBouchnak ; étude du comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique : le ti555-3, thèse doctorat , l'école nationale supérieure d'arts et métiers spécialité " mécanique ",2010.
- [3] :DAVIES, Matthew A., PRATT, Jon R., DUTTERER, Brian S., et al.The stability of low radial immersion milling. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2000, vol. 49, no 1, p. 37-40.
- [4] :INSPERGER, Tamás et STÉPÁN, Gábor. Semi-discretization method for delayed systems. International Journal for numerical methods in engineering, 2002, vol. 55, no 5, p. 503-518.
- [5] :INSPERGER, Tamás, MANN, Brian P., STÉPÁN, Gábor, et al.Stability of up-milling and down-milling, part 1: alternative analytical methods. International journal of Machine tools and manufacture, 2003, vol. 43, no 1, p. 25-34.
- [6] :INSPERGER, Tamas et STEPAN, Gabor. Stability analysis of turning with periodic spindle speed modulation via semidiscretization. Modal Analysis, 2004, vol. 10, no 12, p. 1835-1855.
- [7] : WAHI, Pankaj et CHATTERJEE, Anindya. Self-interrupted regenerative metal cutting in turning. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2008, vol. 43, no 2, p. 111-123.
- [8] :MERCHANT, M. Eugene. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. Journal of applied physics, 1945, vol. 16, no 5, p. 267-275.
- [9] :OXLEY, Peter Louis Brennan. The mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability. Chichester, England : E. Horwood, 1989.
- [10]:MOLINARI, A. et DUDZINSKI, D. Stationary shear band in high-speed machining. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique,

Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre, 1992, vol. 315, no 4, p. 399-405.

[11] :MOUFKI, A., MOLINARI, A., et DUDZINSKI, D. Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998, vol. 46, no 10, p. 2103-2138.

[12] :AVEVOR, Yao et MOUFKI, Abdelhadi. Influence de la vitesse de coupe sur les conditions thermomécaniques à l'interface outil-copeau. *S09d Procédés d'usinage*, 2015.

[13] :RODRÍGUEZ, J. M., JONSEN, Pär, et SVOBODA, Ales. Simulation of metal cutting using the particle finite-element method and a physically based plasticity model. *Computational Particle Mechanics*, 2017, vol. 4, no 1, p. 35-51.

[14]: SHI, Zhenyu, LI, Yuchao, LIU, Zhanqiang, et al. Determination of minimum uncut chip thickness during micro-end milling Inconel 718 with acoustic emission signals and FEM simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, p. 1-9.

[15] :SHUANG, Fei, CHEN, Xiangyu, et MA, Wei. Numerical analysis of chip formation mechanisms in orthogonal cutting of Ti6Al4V alloy based on a CEL model. *International Journal of Material Forming*, 2017, p. 1-14.

[16] :WANG, Qingqing, LIU, Zhanqiang, YANG, Dong, et al. Metallurgical-based prediction of stress-temperature induced rapid heating and cooling phase transformations for high speed machining Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*, 2017, vol. 119, p. 208-218.

[17] :MELZI, N., TEMMAR, M., et OUALI, M. Applying a Numerical Model to Obtain the Temperature Distribution while Machining. *Acta Physica Polonica A*, 2017, vol. 131, no 3, p. 504-506.

[18] Bissey, Stéphanie. Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils: cas du fraisage des aciers traités thermiquement. *Diss. Paris, ENSAM*, 2005.

[19] :MAUREL-PANTEL, Aurelien. Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage: Applications à l'identification paramétrique des lois de comportement. *Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté*, 2009.

[20] : Germain, Guenaël. Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser. *Diss. Arts et Métiers ParisTech*, 2006.

- [21] :Alain PASSERON, « Tournage » Article BM 7086, Technique de l'ingénieur1998
- [22]:RaynaldLaheurte, « Application de la théorie de seconde gradient à la coupe des matériaux », thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2004
- [23] :D. Gelin, M. Vincent, « Eléments de fabrication », Les Editions Foucher,1995
- [24] : A. L. DEFRETIN, G. LEVAILLANT, Usinage à grande vitesse, Techniques de l'Ingénieur, BM 7180, 1999.
- [25] :DELALONDRE, Fabien. Modélisation et étude 3D des phénomènes de cisaillement adiabatiques dans les procédés de mise en forme à grande vitesse. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris,2008.
- [26] :B. BENMOHAMMED, rapport d'un projet de recherche CNEPRU, Modélisation et Simulation de l'Usinage à Grande Vitesse, Université de BATNA, 2008.
- [27] :B. BENMOHAMMED, Identification des lois d'effort de coupe de tournage en régime dynamique, Thèse de Doctorat de Mécanique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - France, 1996.
- [28] :K. BEKELBAB, Modélisation et simulation du comportement dynamique de l'ensemble pièce-outil-machine en usinage à l'outil coupant. Thèse de Doctorat, ENSAM - France, 1995.
- [29] Kamel MEHDI ,Etude du comportement dynamique des pieces a parois minces au cours d'une opération d'usinage en tournage et en fraisage de profil & systèmes experts et langages a objets : outils pour la conception mécanique assistée par ordinateur, Université de Sfax École Nationale d'Ingénieurs de Sfax ;2008.
- [30] : YOUNES, Rafic. Approches et Démarches pour l'Optimisation en Mécanique non linéaire. Thèse de doctorat. Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines (UVSQ), France,2007.
- [31] : L. Pimbaud, G. Layes, J. Moulin, Guide pratique de l'usinage, tome 1, Edition Hachette, France, 2003
- [32] :G. PEIGNE. Etude et simulation des effets dynamiques de la coupe sur la stabilité de la coupe et la qualité géométrique de la surface usinée : application au fraisage de profil. Doctorat de l'INPG, 2003.
- [33] :A. ALBRECHT, S. S. Park, Y. Altintas et G. Pritschow. High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement

sensors. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005, Vol. 45/9, p:993-1008.

[34] :T. L. SCHMITZ, J. Couey, E. Marsh, N. Mauntler et D. Hughes. Runout effects in milling: Surface finish, surface location error, and stability. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007, Vol. 47/5, p:841-851

[35] :GERASIMENKO, Artem. Etude analytique et expérimentale de l'usinage d'un tube mince. 2016. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.

[36] :TLUSTY, J. et POLACEK, M. Beispiele der behandlung der selbsterregten Schwingung der Werkzeugmaschinen FoKoMa. 1957

[37]: S. A. et FISHWICK, W. Theory of regenerative machine tool chatter. The engineer, 1958, vol. 205, no 7, p. 199-203.

[38] :TLUSTY, J. Analysis of the state of research in cutting dynamics. Annals of the CIRP, 1978, vol. 27, no 2, p. 583-589.

[39] :FELDER, Eric. Procédés D'usinage. Ed. Techniques Ingénieur, 1997.

[40] :T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane, Metal machining, theory and applications, Arnold Publishers, 2000

[41] : Shaw M.C. Metal cutting principles. Oxford Science Publications, Oxford, 1984

[42] : KAGNAYA, Tchadja. Contribution à l'identification des mécanismes d'usure d'un WC-6% Co en usinage et par une approche tribologique et thermique. MINES Paris Tech, 2009.

[43] : KAGNAYA, Tchadja. Contribution à l'identification des mécanismes d'usure d'un WC-6% Co en usinage et par une approche tribologique et thermique. MINES Paris Tech, 2009.

[44] : Sadek BRAHMI, mémoire Magister, Etude de l'influence de l'intégrité de surface sur la résistance à la fatigue des pièces usinées, Université de Boumerdès 2009.

[45] : M REMADNA. Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des palquettes CBN (nitride de bore cubique), Thèse doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001, p241.

[46] : F. Lorey. Endommagement des outils de coupe. Les techniques d'ingénieur, traité mécanique et chaleur B7042 2, 1993.

- [47] :E.M. Trent. MetalCutting.ISBN 0-7506-1068-9.1991.
- [48] :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 – ManufacturingTechnology, 56(1):69–72, 2007.
- [49] : Cutting temperature – causes, effects, assessment and control , Version 2 ME IIT, Kharagpur.
- [50] : C. Rochas Caractérisation des phénomènes tribologiques entre les populations inclusionnaires des aciers à usinabilité améliorée et les revêtements pour outils coupant, mémoire de master, ENISE, (2005), 77 pages.
- [51] : AMAR, Sebhi. Etude tribologique des outils de coupe et aciers. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas de Sétif 1 , 2013.
- [52] : E.M. Trent, P.K. Wright, MetalCutting, Butterworth-Heinemann, 4th Edition, 2000.
- [53] : K.M. Vernaza-Peña, J.J. Mason, M. Li, Experimental Study of the Temperature Field Generated During Orthogonal Machining of an Aluminum Alloy, Experimental Mechanics Vol. 42 (2004), 221-229.
- [54] : G. Sutter, L. Faure, A. Molinari, N. Ranc, V. Pina, An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 43 (2003), 671-678.
- [55] :Y.K. Potdar, A.T. Zehnder, Temperature and Deformation Measurements in Transient Metal Cutting, Experimental Mechanics Vol. 44 (2004), 1-9.
- [56] : R. M'Saoubi and H. Chandrasekaran. Investigation of the effects of tool micro-geometry and coating on tool temperature during orthogonal turning of quenched and tempered steel.International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44 :213–224., 2004.
- [57] : M.B. da Silva, J. Wallbank, Cutting temperature: prediction and measurement methods - a review, Journal of Materials methods - a review, Journal of Materials Processing Technology Vol. 88 (1999), 195-202.
- [58]: T.D. Marusich, M. Ortiz, Modeling and simulation of high-speed machining,International Journal for NumericalMethods in Engineering 38 (1995) 3675-3694.
- [59] : E. Ceretti, M. Lucchi, T. Altan, FEM simulation orthogonal cutting: serrated chip formation, Journal of Materials Processing Technology 95 (1999) 17-26.

- [60] : T. Ozel, 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* 128 (2006) 119-129.
- [61] : M. Baker, Finite element simulation of high-speed cutting forces, *Journal of Materials Processing Technology* 176 (2006) 117-126.
- [62] : 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.
- [63] : 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.
- [64] : 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.
- [65] :HalilBilin, Simulation of orthogonal metal cutting by finite element analysis. Thèse de Master en Science naturelle et science appliquée, 2003.
- [66] Kiliçaslan, C., Modelling and simulation of metal cutting by finite element method. Thèse de Master. Institut de Technologie. Ysmir. Turkey, 2009.
- [67]:JOHNSON, Gordon R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In : *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, Netherlands, 1983.
- [68] :SOLDANI, Xavier. Modélisation analytique de l'usinage à grande vitesse et étude de l'usure en cratère—application au tournage. *LPMM, UMR, CNRS*, 2008, no 17554.
- [69]:MARUSICH, T. D. et ORTIZ, Modeling. Modelling and simulation of high-speed machining. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1995, vol. 38, no 21, p. 3675-3694.
- [70] :ZERILLI, Frank J. et ARMSTRONG, Ronald W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations. *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 61, no 5, p. 1816-1825.
- [71]: KOVAC, Pavel, SAVKOVIC, Borislav, SERDAR, Branislav, et al. MODELING MECHANICAL AND THERMAL LOAD OF CUTTING TOOL. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 2011, vol. 4, no 4, p. 77.

- [72] : CHIAPPINI, Elio, TIRELLI, Stefano, ALBERTELLI, Paolo, et al. On the mechanics of chip formation in Ti-6Al-4V turning with spindle speed variation. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 77, p. 16-26,2014]
- [73] : NIESŁONY, P., GRZESIK, W., LASKOWSKI, P., et al. Numerical 3D FEM simulation and experimental analysis of tribological aspects in turning Inconel 718 Alloy. Journal of Machine Engineering , vol. 15, no 1,2015.
- [74] : GUEMMOUR, M. B., SAHLI, A., KEBDANI, S., et al. Simulation of the Chip Formation and Temperature Distribution by the Fem. Journal of Applied Sciences, vol. 15, no 9, p. 1138,2015.
- [75] :Bapat, P. S., Dhikale, P. D., Shinde, S. M., Kulkarni, et al. A Numerical Model to Obtain Temperature Distribution During Hard Turning of AISI 52100 Steel. Materials Today: Proceedings, vol. 2, no 4-5, p. 1907-1914,2015.
- [76]: THEPSONTHI, Thanongsaket ÖZEL, Tuğrul. 3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: experimental validations on chip flow and tool wear. Journal of Materials Processing Technology, 2015, vol. 221, p. 128-145.
- [77] : BUCHKREMER, S., KLOCKE, F., et VESELOVAC, D. 3D FEM simulation of chip breakage in metalcutting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 82, no 1-4, p. 645-661.,2016.
- [78] :BOURDIM, A., RAHMANI, O., et SAHLI, A. Cutting vibration stability of a rotating workpiece of irregular section. Mécanique industrielle et matériaux, 1999, vol. 52, no 4, p. 154-157.
- [79] :DE LARMINAT, Philippe. Automatique: commande des systèmes linéaires. Paris : Hermes, 1996] .
- [80] :BORNE, Pierre, et al. Analyse et régulation des processus industriels: régulation continue. Editions Technip, 1993.
- [81] : Nolwenn Corduan, «Etude des phénomènes vibratoires en fraisage de finition de plaques minces : application aux aubages de turbines aéronautiques», Thèse de Doctorat, ENSAM, CER de Paris, 2006.
- [82] : Grégoire Piègne, « Etude et simulation des effets dynamiques de la coupe sur la stabilité de la coupe et la qualité géométrique de la surface usinée : application au fraisage de profil», Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2003.

- [83] : MORARU, George-Florin. Etude du comportement du système" Pièce-Outil-Machine" en régime de coupe vibratoire, Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech.2002.
- [84] :SHAW, M. C. Metal cutting principles–Oxford series on advanced manufacturing. Publ. Oxford University Press, New York (USA), 2005.
- [85] : J. Tlustý, M. Poláček, The stability of machine tools against self excited vibrations in machining, Int. Res. Production Eng., ASME, pages 465–474, 1963.
- [86] : H.E. Merritt, Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter, ASME J. Eng. Industry 87, pages 447–454, 1965.
- [87] : Arnold.R.N, The mechanism of tool vibration in the cutting of steel, proceedings of Institution of Mechanical Engineers, pp. 154, 1946.
- [88] : Y. Altintas. Manufacturing Automation, Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibration and CNC Design. Cambridge University, ISBN-13: 978-0521659734, 2000.
- [89] : M. Segreti, Vibrations en coupe orthogonale, Modélisation, étude de stabilité et validation expérimentale, Thèse, Université de Metz, 2002.
- [90] :MELZI Nesrine, TEMMAR Mustapha, OUALI Mohamed, et al. The prediction of the surface quality based on the stability lobes and the optimization of the cutting parameters in the vibration restraining. Mediterranean Journal of Modeling and Simulation, 2016, vol. 6, no 1, p. 045-058.
- [91] :K.F.Ehmann, S.G.Kapoor, R.E.Devor and I.Lazoglu, Machining process modeling, A review, Journal of manufacturing science and engineering, vol 119/4B, pages 655-663, 1997.
- [92] : E. Budak, Y. Altintas. Analytical prediction of chatter stability in milling-part i : General formulation. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 120 :22 – 30, 1998.
- [93] : RIVIÈRE-LORPHÈVRE, Edouard. Étude et simulation de procédés de fraisage grande vitesse: efforts de coupe, stabilité, états de surface. 2008.
- [94] M.G.Vigier, Pratique des plans d'expérience, les éditions d'organisation, pp 190, 1988.
- [95] Jacques Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Edition Dunod, 2001.
- [96]: American Supplier Institute, Inc, Orthogonal arrays and linear graphs, ASI, 1987.

- [97] :Eberhart R.C. Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory, Proc. 6-th symposium on micro-machine and human science, IEEE 1995.
- [98] : M. Barge, « Etude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion ». Thèse de doctorat de l'école Centrale de Lyon, Juillet 2005.
- [99] :J. Rech, C. Claudin, E. D'Eramo, —Identification of a friction model— Application to the context of dry cutting of an AISI 1045 annealed steel with a TiN-coated carbide tool, Tribol. Int., 42 (2009) 738-744.
- [100] :Y.B. Guo, C.R. Liu, Mechanical Properties of Hardened AISI 52100 Steel in Hard Machining Processes, ASME J. Manuf. Sci. Eng., 124(2002) 1–9.
- [101] :Elmossaoui H. Design of experiments software (Hide). Magister Thesis. Saad Dahlab University of Blida, Algeria, 2004.
- [102] : Charles, J. P., Hannane, F., El-Mossaoui, H., Zegaoui, A., Nguyen, T. V., Petit, P., & Aillerie, M. (2014). Faulty PV panel identification using the Design of Experiments (DoE) method. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 57, 31-38.
- [103] : Charles, J. P., Aillerie, M., Petit, P., Hannane, F., & El Mossaoui, H. (2015). Warning of accidental shadowing of a PV generator in operation analyzed with the DoE method. Solar Energy, 122, 455-463.

## ANNEXE

### Les programmes utilisés sous MATLAB:

#### Le tracé de la partie réelle de la fonction de transfert pour un système vibrant à un seul degré de liberté

```

clear all
m=0.55           % masse POM
k=23.82e6        % la raideur
c=361.95         % l'amortisseur
wn=sqrt(k/m)     % la pulsation propre du système
ksi=(c/sqrt(k*m))/2 % le taux d'amortissement
ksi=0.05
wn=6.58e3

n=wn^2;
d=k*[1 2*ksi*wn wn^2];
F=tf(n,d);      % la fonction de transfert
w=0:10:2*wn;

[r,im]=nyquist(F,w);
NW=1317;
NW=1317
for i=1:NW
G(i)=r(i);
end
for i=1:NW
H(i)=im(i);
end
%ki=1
%=====
wi=w
% for ki=1:1;
for j=1:NW;
w=wi(j);

kf=2400e6;
%D=wn^2-w^2+j*2*ksi*wn*w;
%D=k*D;
%n=wn^2;
%phi=n/D;
%G=real(phi);
%Rg(j)=G;

```

```

%H=imag(phi);

nn=2*kf*G(j);
bin(j)=-1/nn;
arg=atan(H(j)/G(j));
n=bin;
for ki=1
N(ki,j)=60*w/(2*ki*pi+2*arg+3*pi);
T(ki,j)=(2*ki*pi)/w;
f(ki,j)=1/T(ki,j);

end

end
%b(j)=bin
plot(f,H)
%hold on;
grid

```

## Le trace des lobes de stabilité :

```

clearall
%=====données du
problème=====
m=0.55 % masse POM
k=23.82e6 % la raideur
c=361.95 % l'amortisseur
wn=sqrt(k/m) % la pulsation propre du système
ksi=(c/sqrt(k*m))/2 % le taux d'amortissement
ksi=0.05
wn=6.58e3

n=wn^2;
d=k*[1 2*ksi*wn wn^2];
F=tf(n,d); % la fonction de transfert
w=0:10:2*wn;

[r,im]=nyquist(F,w)
NW=1317
ni=658;

%=====programme
principale=====

for i=ni:NW; % le calcul de la profondeur de passe
G(i)=r(i); % la partie réelle de l'équation caractéristique
end
for i=ni:NW;
H(i)=im(i); % la partie imaginaire de l'équation caractéristique
end
%ki=1
%=====
wi=w
% for ki=1:1;
for j=ni:NW;
w=wi(j);

```

```

kf=2400e6; % coefficient de coupe
%D=wn^2-w^2+j*2*ksi*wn*w;
%D=k*D;
%n=wn^2;
%phi=n/D;
%G=real(phi);
%Rg(j)=G;
%H=imag(phi);
nn=2*kf*G(j); % profondeur de passe limite
bin(j)=-1/nn;
arg=atan(H(j)/G(j));
n=bin;
for ki=1:10
N(ki,j)=60*w/(2*ki*pi+2*arg+3*pi); % la vitesse de rotation
end
%NN=N;
end
%b(j)=bin
plot(N,bin)
%hold on;
grid
%r(j,12)=[w bin N]
% end
%N(1,:)
axis ([0 60000 0 0.014])
%Y=find(bin>10);
%bin(Y)=[];
%N(:,Y)=[];
%plot(bin(1:300))
%I=find(bin==0);
%N(:,I)=[]; bin(I)=[];
%for i=1:10; area(N(i,:),bin,10,'facecolor','red'); hold on;end;
axis([1800.16000, 0e-4 ,5e-4]); shading flat
%hold off
xlabel('Vitesse de rotation (tr/min)')
ylabel('Profondeur de passe (m)')

```

### Programme utilisé pour optimiser les conditions de coupe par la méthode ("Essais particuliers"(PSO).

```

clc;
clear all;

n=200; % Population size

dim=3;
p(1:n,1)=0.05; q(1:n,1)=0.2; %bounds on variable f
p(1:n,2)=0.3; q(1:n,2)=0.8; %bounds on variable ap
p(1:n,3)=150; q(1:n,3)=1000 %bounds on variable Vc
r=(q-p);
u=p; v=q;
s=(v-u)/4; %initial velocities are 1/4 of parameter space size
%Random initialization of positions and velocities

pos=p+r.*rand(n,dim);
vel=s.*rand(n,dim);
%Evaluate objective for all particles

```

```

% popsize=10
% n=popsize
% dim=3
% low(1)=0.05 %f
% up(1)=0.2
% low(2)=0.3 %ap
% up(2)=1
% low(3)=150 %Vc
% up(3)=1000
% for i=1:popsize
% for j=1:dim
% X(i,j)=rand*(up(j)-low(j))+low(j);
% V(i,j)=rand*(up(j)-low(j))+low(j);
% Pbest(i,j)=X(i,j);
% end
% end

% pos=X
% vel=V
for x=1:n
obfun(x,1)=3.45259-(2.72395e-003*pos(x,3))-(0.23804*pos(x,2))-
(7.53412*pos(x,1))+(8.31373e-
004*pos(x,3)*pos(x,2))+(0.011561*pos(x,3)*pos(x,1))+(10.87843*pos(x,2)*po
s(x,1))-(0.014745*pos(x,3)*pos(x,2)*pos(x,1));

%obfun(x,1)=(1-pos(x,1))^2+100*(pos(x,2)-pos(x,1)^2)^2;
end
%obfun=obfun.^2
%disp(obfun);

%Find gbest and pbest
[fgbest,igbest]=min(obfun);

gbest=pos(igbest,:);
pbest=pos
fpbest=obfun

%iterate

itmax=100; % Maximum iterations; total evaluated function will be
401X100
c1=1.05; c2=1.05;
wmax=1; wmin=0.3; %set to same value for constant w
w=linspace(wmax,wmin,itmax); %linear variation of w
%inertia = (wmax - ((wmax - wmin)/iterations)*iter);

for it=1:itmax;
%Update velocities and positions
w= (wmax - ((wmax - wmin)/itmax)*it);
velP=vel
vel(1:n,1:dim)=w*vel(1:n,1:dim)+c1*rand*(pbest(1:n,1:dim)-
pos(1:n,1:dim))+c2*rand*( repmat(gbest,n,1)-pos(1:n,1:dim));
pos1(1:n,1:dim)=pos(1:n,1:dim)
pos(1:n,1:dim)=pos(1:n,1:dim)+vel(1:n,1:dim);
% delta=
% pos(1:n,1:dim)=pos(1:n,1:dim)+vel(1:n,1:dim);

```

```

% p(1:n,1)=0.05; q(1:n,1)=0.2; %bounds on variable f
% p(1:n,2)=0.3; q(1:n,2)=3; %bounds on variable ap
% p(1:n,3)=150; q(1:n,3)=1000 %bounds on variable Vc
% r=(q-p);
%
%
%

fori=1:n
ifpos(i,1)>q(i,1)
pos(i,1)=pos1(i,1)
end
end

fori=1:n
ifpos(i,2)>q(i,2)
pos(i,2)=pos1(i,2)
end
end
fori=1:n
ifpos(i,3)>q(i,3)
pos(i,3)=pos1(i,3)
end
end

fori=1:n
ifpos(i,1)<p(i,1)
pos(i,1)=pos1(i,1)
end
end

fori=1:n
ifpos(i,2)<p(i,2)
pos(i,2)=pos1(i,2)
end
end
fori=1:n
ifpos(i,3)<p(i,3)
pos(i,3)=pos1(i,3)
end
end

%Evaluate objectives

for x=1:n
obfun(x,1)=3.45259-(2.72395e-003*pos(x,3))-(0.23804*pos(x,2))-
(7.53412*pos(x,1))+(8.31373e-
004*pos(x,3)*pos(x,2))+(0.011561*pos(x,3)*pos(x,1))+(10.87843*pos(x,2)*po
s(x,1))-(0.014745*pos(x,3)*pos(x,2)*pos(x,1));
%3.45259-(2.72395e-003*Vc)-(0.23804*ap)-(7.53412*f)+(8.31373e-004*Vc*ap)+
(0.011561*Vc*f)+(10.87843*ap*f)-(0.014745*Vc*ap*f)

%
%
%
```

```

end
%obfun=obfun.^2

%Find gbest and pbest
[minf, iminf]=min(obfun);
ifminf<= fgbest
fgbest=minf; gbest=pos(iminf, :);
end
inewpb=find(obfun<=fpbest);
pbest(inewpb, :)=pos(inewpb, :); fpbest(inewpb)=obfun(inewpb);
end%end loop on iterations
[gbest,fgbest]% vecteur=[ f apVc Ra]

```

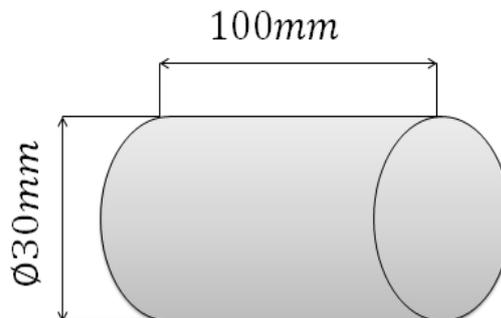
## Calcul des paramètres pour le tracé des lobes de stabilité de l'acier xc48

Les données :

- Masse volumique  $\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$
- Module de Young  $E = 200 \text{ GPa}$

### Calcul de la masse :

Le volume de l'acier XC48 :



**Figure :** Les dimensions de l'acier XC48

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$V = 0,1 \cdot (0,015)^2 \cdot \pi \Leftrightarrow V = 7,065 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\text{la masse volumique} = \frac{\text{masse}}{\text{volume}} ;$$

$$m = 7870 \cdot (7,065 \cdot 10^{-5})$$

$$m = 0,55 \text{ kg}$$

### Calcul de la raideur k :

$$k = \frac{3EI}{L^3}$$

Avec :

$I$ :moment d'inertie,

$E$ :module de Young,

$L$ :longueur de la pièce.

Le moment d'inertie dans le cas d'un cylindre plein est:

$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

Application numérique :

$$I = \frac{\pi \cdot (0.03)^4}{64}$$

$$I = 3.97 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\text{On a : } k = \frac{3EI}{L^3}$$

Donc :

$$k = \frac{3.2 \cdot 10^{11} \cdot 3.97 \cdot 10^{-8}}{(0.1)^3}$$

$$k = 23,82 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

**Calcul de la pulsation propre :**

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \Leftrightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{2,382 \cdot 10^6}{0,55}}$$

$$\omega_n = 6,58 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

**Calcul de coefficient d'amortissement critique :**

$$C_c = 2\sqrt{km}$$

$$C_c = 2\sqrt{0,55 \cdot 23,82 \cdot 10^6} \Leftrightarrow C_c = 7,239 \cdot 10^3 \text{ N.s/m}$$

**Calcul de coefficient d'amortissement :**

Le taux d'amortissement en usinage est  $\xi \leq 0.05$

On prend  $\xi = 0,05$ .

$$\xi = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}} \Leftrightarrow c = \xi \cdot (2 \cdot \sqrt{k \cdot m})$$

$$\Rightarrow c = 0.05 \cdot (2 \sqrt{0,55 \cdot 23,82 \cdot 10^6})$$

$$c = 361,95 \text{ N.s/m}$$

**Calcul des grandeurs  $b$  et  $h$  :****Les données :**

profondeur de passe $a_p$ (mm)	avance $f$ par tour (mm/tr)	Angle d'attaque $k_r$ (degré)
<b>5</b>	<b>0,2</b>	<b>91</b>

Calcul de la largeur du copeau ( $b$ ) :

$$b = \frac{a_p}{\sin k_r}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

- Calcul de l'épaisseur instantanée du copeau ( $h$ ) :

$$h = f \cdot \sin k_r$$

$$h = 0,19 \text{ mm}$$

avec :

$b$ : largeur de copeau,

$h$  : l'épaisseur du copeau,

$a_p$  : profondeur de passe (mm)

$f$  : avance par tour (mm/tr)

$k_r$  : angle de direction d'arête (angle d'attaque)