

**Université ABBES LAGHROUR Khenchela**



جامعة عباس لغرور خنشلة  
Faculté de Sciences et Technologie  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Département de Génie Mécanique  
قسم الهندسة الميكانيكية



# Mémoire

De fin d'études Pour l'obtention du diplôme  
**MASTER (LMD)**

**Spécialité : Génie Mécanique**  
**Option : Génie des Matériaux**

## Thème

**L'USURE DE L'OUTIL DE COUPE LORS  
DU TOURNAGE LONGITUDINALE  
CHARIOTAGE (Conception, simulation)**

Réalisé par :

- BAALOU DJ Rania
- AIB Nassira

Dirigé par : Dr. CHITOUR Mourad

Membres de jury :

- Mr. MANSOURI.K      Président
- Mr. BARKIA.A        Examineur

**Année universitaire : 2018-2019**

# dédicace

*À mes parents  
À mon Cher frère  
À mes chères sœurs  
À la famille BAALOU DJ et la  
Famille AIB*

*A nos enseignants de l'école  
Primaire jusqu'à l'université  
À toutes nos cher(e)s ami(e)s  
À toute la promotion Master  
Mécanique*

*2018-2019*

*À tous ceux qui nous sont chers.*

*BAALOU DJ RANIA*

*AIB NASSIRA*

*MERCE A TOUTE*

## **REMERCIEMENTS**

*En premier lieu je remercie notre Dieu **Allah** le Tout Puissant, de m'avoir donné le savoir, et le courage pour réaliser ce travail.*

*Ce travail a été réalisé à l'université d'ABBAS LAGHROUR KHENCHELA. En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur de mémoire, Docteur **CHITOUR MOURAD** pour ces précieuses remarques et conseils et de sa disponibilité.*

*Que mes amis et mes camarades de promotion trouvent ici, l'expression de mes remerciements pour leur soutien moral.*

*Enfin, j'adresse mes plus chaleureux sentiments à mes parents, et à toute ma famille pour leur soutien constant. Et je remercie toute personne ayant participé de près ou loin à la réalisation de ce travail.*

**NASSIRA-RANIA**

**TABLE DES MATIERES**

TABLE DES MATIEES	
LISTE DES TABLEAUS	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES	
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>01</b>
<b>CHAPITRE I. NOTIONS GENERALES SUR LE TOURNAGE</b>	
<b>I.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>05</b>
<b>I.2 DEFINITIONS.....</b>	<b>05</b>
<b>I.3PRINCIPE E TOURNAGE.....</b>	<b>06</b>
<b>I.4 LES TOURS.....</b>	<b>06</b>
<b>I.5CLASSIFICATION DES MACHINES DE TOURNAGES.....</b>	<b>07</b>
I.5.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter.....	07
I.5.2 Les tours à copier.....	08
I.5.3 Les tours semi-automatiques.....	08
I.5.4 Les tours automatiques.....	09
I.5.5 Les tours automatiques multibroches.....	09
I.5.6 Les tours à commande numérique.....	10
<b>I.6 LES OPERATIONS DE TOURNAGE.....</b>	<b>10</b>
<b>I.7LES CHOIX DES PARAMETRES DE COUPE.....</b>	<b>13</b>
<b>I.8 LES PARAMETRES DE COUPE EN TOURNAGE.....</b>	<b>13</b>
I.8.1 Vitesse de coupe.....	14
I.8.2 Vitesse d'avance Vf.....	15
I.8.2.1 Les types d'avances.....	15
I.8.3 Profondeur de passe « a ».....	16
I.8.4 Influence des paramètres de coupe sur l'usure.....	17
<b>I.9 SUPPORT ET ENTRAINEMENT DES PIECES SUR UN TOUR.....</b>	<b>17</b>
<b>I.10 L'OUTIL DE COUPE.....</b>	<b>18</b>
I.10.1 Géométrie de l'outil.....	19
I.10.2 Outils de coupe et leurs nuances.....	20
I.10.3 Classification des outils de coupe.....	21
I.10.4 type des outils selon le type d'opération.....	22
I.10.5 Formation du copeau.....	23
I.10.5.1 Zone de cisaillement primaire ZCP.....	24

I.10.5.2 Zone de cisaillement secondaire ZCS.....	24
I.10.5.3 Zone de cisaillement tertiaire ZCT.....	26
I.10.6 Les matériaux des outils.....	26
I.10.7 Durée de vie d'un outil de coupe.....	30
<b>I.11 PARAMETRES TECHNO-ECONOMIQUES D'USINAGE.....</b>	<b>31</b>
I.11.1 Temps d'usinage.....	31
I.11.2 Coût d'usinage.....	32
<b>I.12 EFFORTS DE COUPE EN TOURNAGE.....</b>	<b>33</b>
<b>I.13 CONCLUSION.....</b>	<b>34</b>
<b>I.14 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>35</b>
<b>CHAPITRE II L'USURE DES OUTILS DES COUPES</b>	
<b>II.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>39</b>
<b>II.2 USURE DES OUTILS DE COUPE.....</b>	<b>39</b>
<b>II.3 MANIFESTATION DE L'USURE.....</b>	<b>40</b>
II.3.1 Usure en cratère.....	40
II.3.2 Usure en dépouille.....	41
II.3.3 La cratérisation.....	41
II.3.4 Déformation plastique.....	42
II.3.5 Entaille.....	42
II.3.6 Fissuration thermique.....	42
II.3.7 Ecaillage et fracturation.....	42
II.3.8 Formation d'arête rapportée.....	42
<b>II.4 MODES D'USURE.....</b>	<b>44</b>
II.4.1 Usure par abrasion.....	45
II.4.2 Usure par adhésion.....	46
II.4.3 Usure par diffusion.....	47
<b>II.5 DESCRIPTION DES PARTICULES ABRASIVES.....</b>	<b>48</b>
<b>II.6 LOIS D'USURE.....</b>	<b>50</b>
<b>II.7 CONCLUSION.....</b>	<b>52</b>
<b>II.8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>53</b>
<b>CHAPITRE III CONCEPTION ET SIMULTION</b>	
<b>III.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>56</b>
<b>III.2 GENERALITE SUR LE CODE DE CALCUL ABAQUS.....</b>	<b>56</b>
<b>III.3 PRODUITS ABAQUS.....</b>	<b>58</b>

<b>III.4 LES DIFFERENTS FICHIERS POUR LA SIMULATION SOUS ABAQUS.....</b>	<b>59</b>
<b>III.5 ORGANISATION DE L'INTERFACE ABAQUS CAE (COMPLETE ABAQUS ENVIRONNEMENT).....</b>	<b>59</b>
<b>III.6 L'ARBRE DU MODELE.....</b>	<b>64</b>
<b>III.7 LES ELEMENTS DANS ABAQUS.....</b>	<b>64</b>
<b>III.8 HYPOTHESES GENERALES DE LA MODELISATION.....</b>	<b>65</b>
III.8.1 Représentation géométrique.....	66
III.8.2 Caractéristique de matériau.....	67
<b>III.9 ÉTUDE NUMÉRIQUE.....</b>	<b>68</b>
III.9.1 Conditions aux limites.....	68
III.9.2 Discrétisation.....	70
<b>III.10 RESULTATS E DISCUSSION.....</b>	<b>71</b>
<b>III.11 CONCLUSION.....</b>	<b>82</b>
<b>III.12 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>83</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>84</b>
<b>RESUME</b>	

---

**LISTE DES TABLEAUX****CHAPITRE I**

<b>Tableau I-1</b> : les différents outils et leurs utilisations.....	<b>23</b>
---	-----------

**CHAPITRE II**

<b>Tableau II-1</b> : Principales usures observées dans un outil de coupe.....	<b>43</b>
--	-----------

<b>Tableau II-2</b> : Valeurs moyennes de l'exposant $n$ de la loi de Taylor.....	<b>51</b>
---	-----------

**CHAPITRE III**

<b>Tableau III-1</b> : montre les différentes caractéristiques géométriques des outils coudés à charioter.....	<b>66</b>
---	-----------

<b>Tableau III-2</b> : Caractéristique de matériau.....	<b>67</b>
---	-----------

<b>Tableau III-3</b> : Composition chimique du matériau.....	<b>67</b>
--	-----------

<b>Tableau III-4</b> : Valeurs maximales et minimales des contraintes sur l'arête de l'outil.....	<b>69</b>
--	-----------

<b>Tableau III-5</b> : Valeurs maximales et minimales des contraintes sur la surface interne de l'outil.....	<b>77</b>
---	-----------

## LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

<b>Figure I-1:</b> Description du tournage.....	<b>05</b>
<b>Figure I-2 :</b> Principe de tournage.....	<b>06</b>
<b>Figure I-3:</b> Schéma descriptif du dispositif de tournage.....	<b>07</b>
<b>Figure I-4:</b> Tour conventionnel.....	<b>07</b>
<b>Figure I-5 :</b> Tour à copier.....	<b>08</b>
<b>Figure I-6 :</b> Tour semi-automatique.....	<b>08</b>
<b>Figure I-7 :</b> Tour automatiques multibroches.....	<b>09</b>
<b>Figure I-8 :</b> Tour à commande numérique.....	<b>10</b>
<b>Figure I-9 :</b> Chariotage.....	<b>10</b>
<b>Figure I-10:</b> Alésage.....	<b>11</b>
<b>Figure I-11:</b> Dressage.....	<b>11</b>
<b>Figure I-12:</b> Perçage.....	<b>11</b>
<b>Figure I-13:</b> Gorgeage.....	<b>11</b>
<b>Figure I-14:</b> Chanfreinage.....	<b>12</b>
<b>Figure I-15:</b> Tronçonnage.....	<b>12</b>
<b>Figure I-16:</b> Filetage.....	<b>12</b>
<b>Figure I-17:</b> Les choix des paramètres de coupe.....	<b>13</b>
<b>Figure I-18 :</b> Conditions de coupe.....	<b>13</b>
<b>Figure I-19:</b> Vitesse de coupe.....	<b>14</b>
<b>Figure I-20 :</b> Différents types d'avance.....	<b>16</b>
<b>Figure I-21:</b> Les profondeurs de passe.....	<b>16</b>
<b>Figure I-22:</b> Montage en l'air.....	<b>17</b>
<b>Figure I-23:</b> Montage mixte.....	<b>18</b>
<b>Figure I-24:</b> Montage entre-pointe.....	<b>18</b>
<b>Figure I-25:</b> Géométrie d'un outil simple.....	<b>19</b>
<b>Figure I-26 :</b> Angles de coupe d'un outil simple.....	<b>20</b>
<b>Figure I-27:</b> Présentation des différents types d'outils : a) Fraises monobloc en acier rapide, b) Outils à charioter plaquettes brasées c) Outils à charioter à plaquettes amovibles.....	<b>20</b>
<b>Figure I-28 :</b> Faciès limitant la partie active de l'outil.....	<b>21</b>
<b>Figure I-29 :</b> Outil de coupe à plaquette rapportée.....	<b>22</b>
<b>Figure I-30:</b> Opérations d'usinages en tournage.....	<b>22</b>

<b>Figure I-31</b> : Principales zones de cisaillement en usinage : Zone de Cisaillement Primaire ZCP, Zone de Cisaillement Secondaire ZCS et la Zone de Cisaillement Tertiaire ZCT.....	<b>23</b>
<b>Figure I-32</b> : (a) Section de copeau obtenue par « Quick stop » montrant la ZCS d'un acier avec 0.1% de carbone et usiné avec une vitesse de coupe élevée, Trent et al. (b) Cinématique simplifiée de la formation du copeau montrant la variation de la vitesse dans l'épaisseur du copeau, Gilormini. (c) Représentation du champ de vitesse dans le copeau en fonction de la position sur la face de coupe Marinov.....	<b>25</b>
<b>Figure I-33</b> : Disposition des matériaux d'outils selon la ténacité et la dureté.....	<b>27</b>
<b>Figure I-34</b> : Matériaux à outil de coupe en fonction de paramètres de coupe.....	<b>27</b>
<b>Figure I-35</b> : Critère d'usure VB.....	<b>30</b>
<b>Figure I-36</b> : Paramètres du temps technologique.....	<b>32</b>
<b>Figure I-37</b> : efforts de coupe en tournage.....	<b>33</b>
 <b>CHAPITRE II</b>	
<b>Figure II-1</b> : Paramètres d'usure selon la norme ISO 3685.....	<b>40</b>
<b>Figure II-2</b> : Zone d'usure en dépouille.....	<b>41</b>
<b>Figure II-3</b> : Classification des modes d'usure en fonction des paramètres d'usinage.....	<b>45</b>
<b>Figure II-4</b> : (a) Illustration de l'usure par abrasion, (b) Particules abrasives (Grains de WC) Piégés à l'interface de contact outil/pièce.....	<b>46</b>
<b>Figure II-5</b> : Mode d'usure par adhésion.....	<b>46</b>
<b>Figure II-6</b> : Schématisation de la diffusion (outil en carbure de tungstène, copeau en acier).....	<b>47</b>
<b>Figure II-7</b> : Schématisation du mode d'usure par abrasion. La présence des impuretés non-métalliques est responsable de ce phénomène d'usure.....	<b>48</b>
<b>Figure II-8</b> : Mise en évidence de la fragmentation des grains de WC constitutifs d'un outil de coupe Kagnaya et susceptibles de se piéger dans les interfaces de contact et d'agir alors comme des particules abrasives.....	<b>50</b>
 <b>CHAPITRE III</b>	
<b>Figure III-1</b> : Structure d'une analyse sous Abaqus.....	<b>58</b>
<b>Figure III-2</b> : Organisation d'abaqus.....	<b>60</b>
<b>Figure III-3</b> : Réalisation de la mise en données d'un problème.....	<b>60</b>

<b>Figure III-4</b> :Module part.....	<b>61</b>
<b>Figure III-5</b> :Module Property.....	<b>62</b>
<b>Figure III-6</b> :Module Assembly.....	<b>62</b>
<b>Figure III-7</b> : Module Step.....	<b>63</b>
<b>Figure III-8</b> : Module Interaction.....	<b>63</b>
<b>Figure III-9</b> :Module Load.....	<b>64</b>
<b>Figure III-10</b> : Quelques éléments dans Abaqus.....	<b>65</b>
<b>Figure III-51</b> : Représentation géométrique du tube.....	<b>66</b>
<b>Figure III-12</b> : Le blocage en rotation et en translation.....	<b>68</b>
<b>Figure III-13</b> : Type de maillage.....	<b>70</b>
<b>Figure III-14</b> : Modèle discrétisé.....	<b>70</b>
<b>Figure III-15</b> : Distribution des contraintes von-mises le long de la distance de l'arrête coupante.....	<b>71</b>
<b>Figure III-16</b> :Distribution des contraintes normale S11 le long de la distance de l'arrête coupante.....	<b>72</b>
<b>Figure III-17</b> :Distribution des contraintes normale S22 le long de la distance de l'arrête coupante.....	<b>72</b>
<b>Figure III-18</b> : Distribution des contraintes normale S33 le long de la distance de l'arrête coupante.....	<b>74</b>
<b>Figure III-19</b> :Distribution des contraintes tangentielle S12 le long de la distance de l'arrête coupante.....	<b>75</b>
<b>Figure III-20</b> :Distribution des contraintes tangentielle S13 le long de la distance de l'arrête coupante.....	<b>76</b>
<b>Figure III-21</b> : Distribution des contraintes tangentielle S23 le long de la distance de l'arrête coupante.....	<b>77</b>
<b>Figure III-22</b> :Les déformations suivant les trois axes x ,y, z ,a) Les déformations suivant xx, b) Les déformations suivant xy, c) Les déformations suivant yy, d) Les déformations suivant xz, e) Les déformations suivant zz,f) Les déformations suivant yz.....	<b>78</b>
<b>Figure III-23</b> :Les réactions des forces appliquées sur l'axe x.....	<b>79</b>
<b>Figure III-24</b> :Les réactions des forces appliquées sur l'axe y.....	<b>79</b>
<b>Figure III-25</b> :Les réactions des forces appliquées sur l'axe z.....	<b>80</b>
<b>Figure III-26</b> : La résultante des réactions des forces appliquées.....	<b>80</b>
<b>Figure III-27</b> :Les déplacements suivant trois axes a) Déplacements suivant l'axe x b) Déplacements suivant l'axe y c) Déplacements suivant l'axe z.....	<b>81</b>

<b>Figure III-28</b> :Les résultantes des déplacements.....	<b>82</b>
---	-----------

## LISTE DES ABRIVIATIONS ET SIGLES

$V_c$	vitesse de coupe ( $m/min$ )
$D$	Diamètre de la pièce ( $mm$ )
$N$	Fréquence de rotation ( $tr/min$ )
$V_f$	Vitesse d'avance ( $mm/min$ )
$f$	l'avance ( $mm$ )
$a$	profondeur de passe( $mm$ )
$M_f$	Mouvement d'avance
$M_e$	Mouvement de coupe
$\alpha_o$	Angle de dépouille
$\beta_o$	Angle de taillant
$\gamma_o$	Angle de coupe
$\varphi$	Angle de cisaillement primaire
$\lambda$	L'angle de frottement entre l'outil et le copeau et l'angle de coupe
<b>HRC</b>	Dureté Rockwell conique
<b>HV</b>	Dureté Vickers
<b>Tu</b>	Le temps d'usinage unitaire(min)
<b>T<sub>CS</sub></b>	(Temps outil) : temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire
<b>T</b>	Durée de vie de l'outil de coupe
<b>T<sub>r</sub></b>	Temps de retour
<b>T<sub>m</sub></b>	(Temps technologique) temps de machine (temps de coupe avec une avance)
<b>T<sub>h</sub></b>	Le temps de montage et démontage de la pièce(min)
<b>Lu</b>	Longueur usinée
<b>e</b>	Distance de sécurité
<b>Cu</b>	Coût d'usinage unitaire
<b>C<sub>o</sub></b>	Coût de machine en $\$/min$
<b>C<sub>t</sub></b>	Coût d'une arrête de coupe en $\$/arrête$
<b>F<sub>c</sub></b>	L'effort de coupe
<b>R<sub>r</sub></b>	La Résistance spécifique à la rupture par compression
<b>S</b>	Section du copeau
<b>K</b>	Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière, de l'épaisseur du Copeau, et de la géométrie de l'outil de coupe

$F_s$	Effort d'avance
$F_p$	Effort de répulsion (négligeable dans le cas d'une coupe orthogonale)
<b>P</b>	Puissance de coupe
$F$	Vecteur d'effort
$KT_{lim}$	Profondeur maximale du cratère (mm)
$KM$	Position du centre du cratère par rapport à la pointe de l'outil
$KT$	Profondeur du cratère(mm)
$KB$	Largeur du cratère
$SV$	Déplacement de l'arrête de coupe
$VB$	Usure moyenne en dépouille(m)
$VB_{MAX}$	Usure maximum en dépouille
$VB_N$	Hauteur de l'entaille
$V_s$	La vitesse de glissement
$T$	La température de l'interface de l'outil
$E$	L'énergie d'activation des atomes qui diffusent.
$A$ et $B$	Sont les constantes du modèle
$R$	La constante des gaz parfaits
$\sigma_n$	La pression de contact
$W$	la longueur de la zone usée
$ZCP$	Zone de cisaillement primaire
$ZCS$	Zone de cisaillement secondaire
$ZCT$	Zone de cisaillement tertiaire

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Le développement des techniques de mise en forme par enlèvement de matière suscitent un intérêt croissant de la part des industriels dans différents secteurs d'activité tels que l'automobile, le ferroviaire, la construction navale ou l'aéronautique. En France, l'usinage représente 3% du PNB et l'on estime à 15% la production mondiale de pièces mécaniques fabriquées par ce procédé [1].

D'un point de vue scientifique, les efforts déployés ces dernières années par les chercheurs ont permis d'effectuer de remarquables avancées dans la compréhension de la coupe et son application à l'étude de l'usinage de différents matériaux. Les travaux menés dans ce domaine ont vu l'élaboration de nouveaux matériaux d'outils et de revêtements de coupe et ont conduit les industriels à accroître considérablement leur productivité tout en améliorant la qualité de leurs pièces usinées.

L'usure des outils de coupe est l'une des principales problématiques actuelles particulièrement lorsqu'il s'agit de nouveaux matériaux dits 'difficiles à usiner' ou à haute valeur ajoutée. L'usure des outils est due aux chargements thermomécaniques extrêmes appliqués aux niveaux des zones de contact outil-copeau et outil-pièce. Pendant l'opération de fraisage, tournage, ou perçage par exemple, de grandes déformations, grandes vitesses de déformation et hautes températures sont observables près de la surface de l'outil coupant.

Ce dernier doit alors faire face à des conditions de chargement intenses concentrées aux niveaux des interfaces de contact avec le matériau usiné. La dégradation de son état affecte ipso facto la qualité des surfaces fraîchement usinées et les tolérances géométriques du produit obtenu. Parmi les conséquences de l'usure, on trouve aussi la génération d'efforts élevés, des hautes températures de coupe provoquant éventuellement un effondrement d'arête et la mise hors service de l'outil. A cet effet, l'usure constitue un enjeu économique important pour les entreprises manufacturières.

Généralement, les trois principaux modes d'usure identifiés au niveau du contact outil/copeau sont l'abrasion, l'adhésion et la diffusion. Sous certaines conditions, un ou plusieurs modes peut être prédominant. La compréhension des mécanismes qui gouvernent la dégradation d'un outil reste encore incomplète, en raison du fait que ces trois modes d'usure opèrent de manière concomitante [2].

Il faut ajouter à cela la grande sensibilité à des paramètres locaux et la difficulté de quantifier expérimentalement certains paramètres clés au niveau des interfaces outil-copeau et outil-pièce (nature du contact, frottement, température, pressions, ...).

En réalité, le problème d'usinage est souvent présenté à l'aide d'un critère multiple. Les paramètres inclus dans ce critère sont dans la plupart des cas contradictoire ce qui nous conduit à un recours à l'optimisation multi-objectif.

L'avenir est à l'outil numérique et à la réalité virtuelle ; la simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeurs automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs [3].

La solution d'analyse par éléments finis optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise en utilisant les hypothèses de la mécanique de la rupture en élasticité et de la dynamique. Ainsi elle simule et améliore les performances.

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...). Et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit. Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O.

Dans ce travail, nous allons tenter à modéliser et résoudre un problème d'usinage. Cette tâche nécessite un premier lieu de choisir un modèle de la simulation Numérique qui présente en juste valeur le problème. En deuxième lieu, l'utilisation d'une méthode d'optimisation qui présente des performances acceptables. Dans ce but, notre document est articulé sur trois chapitres :

**Le premier chapitre** porte sur une recherche bibliographique sur le procédé de tournage dans un premier temps permet de rappeler les principales notions de base de tournage, ensuite les différents phénomènes liés au procédé, ainsi que les paramètres technico-économiques.

**Le second chapitre** dresse un bilan des connaissances acquises dans le domaine de l'usinage et celui de l'usure. En premier lieu, après une brève introduction sur les généralités de la coupe des métaux, une présentation des mécanismes physiques régissant la formation de

copeaux est faite. La problématique du contact outil/copeau et de son effet sur l'usure est ensuite évoquée et détaillée. En second lieu, l'usure des outils est étudiée avec une description des modes principaux d'usure rencontrés en usinage. Un recensement des différentes approches permet d'établir ensuite une liste non exhaustive des modèles d'usure existant dans la littérature pour la prédiction de l'usure en général et celle par abrasion en particulier. Ce premier chapitre propose également d'aborder le point de vue tribologique pour la compréhension et la modélisation de l'abrasion.

*Le troisième chapitre* Une simulation numérique par le code de calcul abaqus d'un outil à charioter conde dans les conditions d'usinage. Se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...).

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Merchant. M.E, « *An interpretive look at 20th century research on modeling of machining*», *Machining Science and Technology*, 2 (1998) 157-163.
- [2] Halila. F, « *Modélisation analytique et caractérisation expérimentale de l'usure par abrasion des outils de coupe* », L'université de lorraine (8 septembre 2015).
- [3] Denis. A, « *Présentation général d'Abaqus. Formation des masters* », école central de Paris. (2008).

**CHAPITRE I**

**NOTIONS GENERALES SUR LE**

**TOURNAGE**

## I.1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière reste le procédé de fabrication le plus important dans l'industrie mécanique. Cependant, l'influence de l'usure des outils coupants sur la qualité de l'état de surface et la durée de vie de l'outil coupant demeure le problème principal auquel sont confrontés les professionnels de l'usinage. En principe, ce sont les frottements à haute température générés entre l'outil, le copeau et la pièce lors de l'usinage qui provoquent l'usure de l'outil de coupe pouvant aller dans des cas extrêmes jusqu'à la rupture [1].

Les principaux modes d'enlèvement de matière par usinage sont : le tournage, le fraisage, le perçage, le taillage, le brochage et la rectification. Ces procédés diffèrent au niveau de la géométrie des outils utilisés, de la géométrie des arêtes de coupe mais font tous intervenir les mêmes mécanismes de coupe. Dans ce chapitre seront développées les notions relatives aux opérations de tournage [2].

## I.2 Définitions

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique (Fig I-1). La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [3].

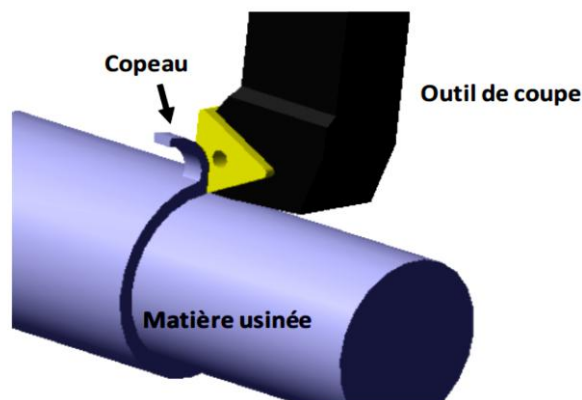


Figure I-1. Description du tournage [4].

### I.3 Principe de tournage

Dans la (Fig I-2) la pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe  $M_c$ . L'outil est animé d'un mouvement de translation parallèle ou oblique par rapport à l'axe de rotation c'est le mouvement d'avance  $M_f$ .

Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil (mouvement radial) il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution tels que cylindre, cône, sphère, etc. Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [5].



**Figure I- 2.** Principe de tournage [6].

### I.4 Les tours

Les tours (Fig I-3) permettent de réaliser des surfaces hélicoïdales (filetage) et des surfaces de révolution : cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche.

L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle.

Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche. Bien que très répandues dans l'industrie, nous ne donnerons pas davantage d'explications sur ces machines car elles ne

font pas, pour l'instant, partie des machines pour lesquelles nous avons cherché à améliorer les performances à l'aide de structures parallèles [7].

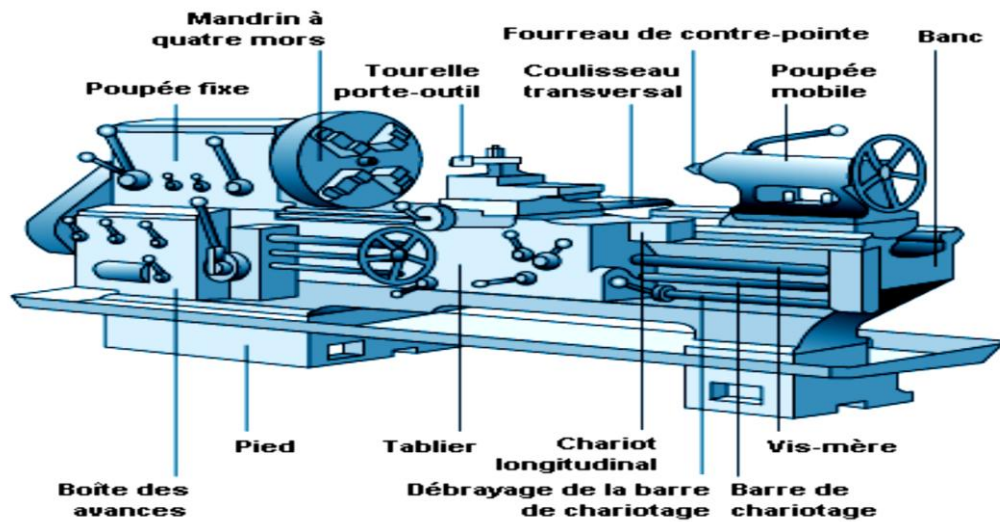


Figure I-3. Schéma descriptif du dispositif de tournage [8].

## I.5 Classification des machines de tournages

Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont :

### I.5.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples (Fig I-4). Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe [9].

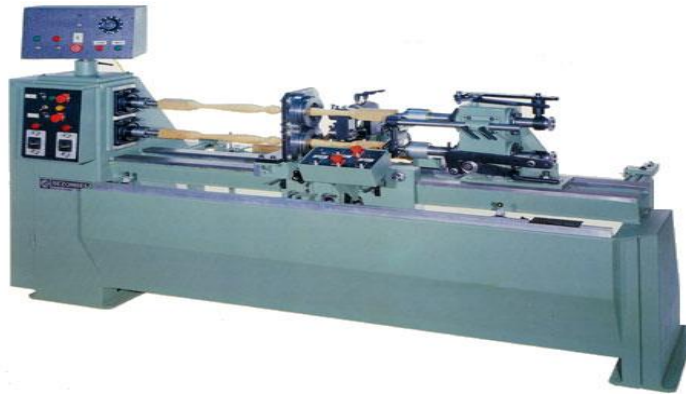


Figure I-4. Tour conventionnel [10].

### I.5.2 Les tours à copier

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de Copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal.

C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque [9].



**Figure I-5.** Tour à copier [10].

### I.5.3 Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises.

La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série [9].



**Figure I-6.** Tour semi-automatique [10].

### I.5.4 Les tours automatiques

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce.

Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries [9].

### I.5.5 Les tours automatiques multibroches

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant.

Lorsque les broches ont effectué un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine.

Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches [9].



**Figure I-7.** Tour automatiques multibroches [10].

### I.5.6 Les tours à commande numérique

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce.

Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives [9].



Figure I-8. Tour à commande numérique [10].

### I.6 Les opérations de tournage

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe. Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, les opérations suivant :

➤ **Chariotage** : Le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne Parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce [9].

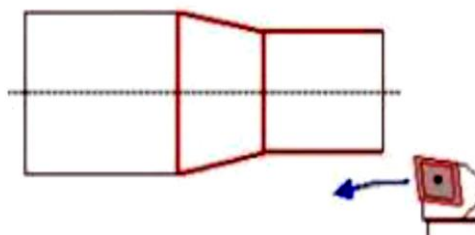
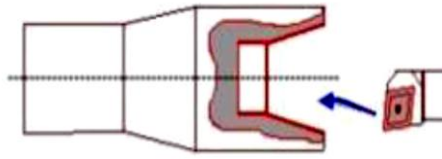


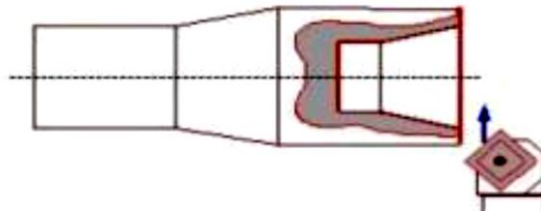
Figure I- 9. Chariotage [9].

➤ **Alésage** : Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure. Le mouvement d'avance est similaire à celui en chariotage [9].



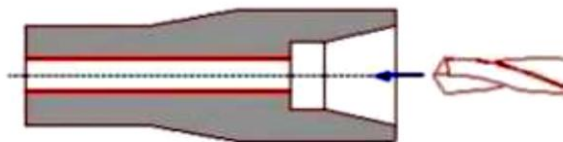
**Figure I-10.** Alésage [9].

➤ **Dressage** : Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure, ce qui diminue la longueur [9].



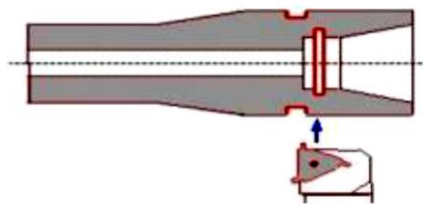
**Figure I-11.** Dressage [9].

➤ **Perçage** : En donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque, on peut obtenir une forme de révolution quelconque [9].



**Figure I-12.** Perçage [9].

➤ **Gorgeage** : Opération qui consiste à usiner une gorge intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple [9].



**Figure I-13.** Gorgeage [9].

➤ **Chanfreinage** : Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif [9].

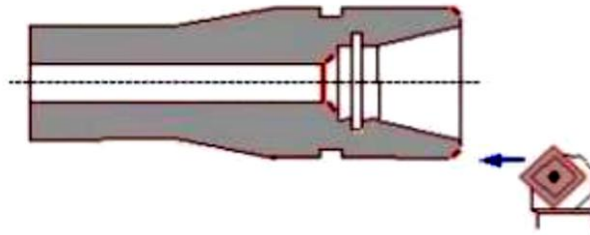


Figure I-14. Chanfreinage [9].

➤ **Tronçonnage** : Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon [9].

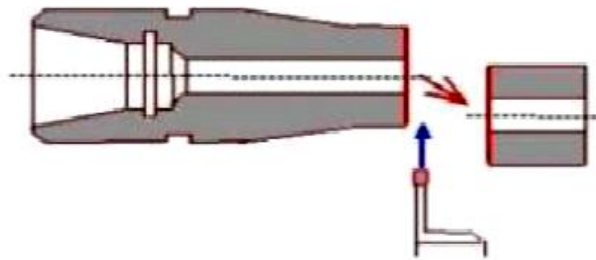


Figure I-15. Tronçonnage [9].

➤ **Filetage** : Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieure ou intérieure, le mouvement d'avance est combiné avec le mouvement de coupe [9].

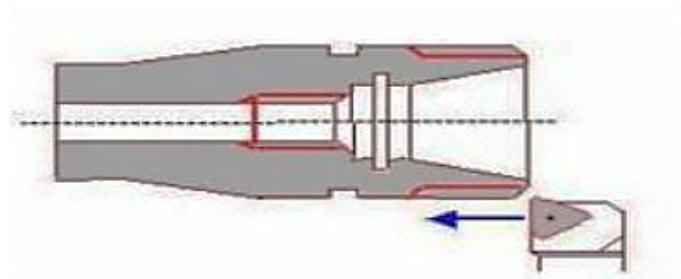


Figure I-16. Filetage [9].

### I.7 Les choix des paramètres de coupe

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...) : Il ya plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment [11] :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses...);
- La puissance de la machine ;
- La matière de l'outil (ARS, carbure...);
- La matière usinée (acier, aluminium...);
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage...);
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement).

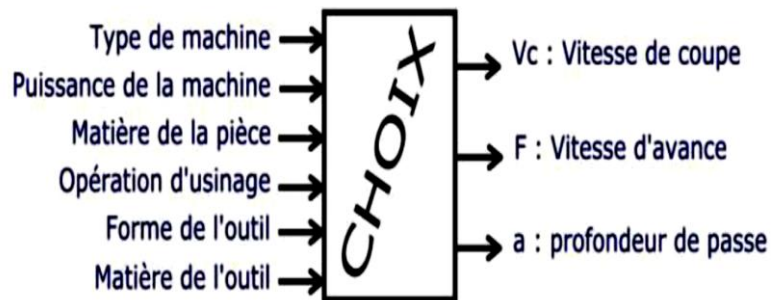


Figure I-17. Les choix des paramètres de coupe [12].

### I.8 Les paramètres de coupe en tournage

Les paramètres de coupe sont choisis suivant la matière à usiner et de l'outil. Ils sont indépendants de la machine utilisée et des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil (Fig I-18) [13].

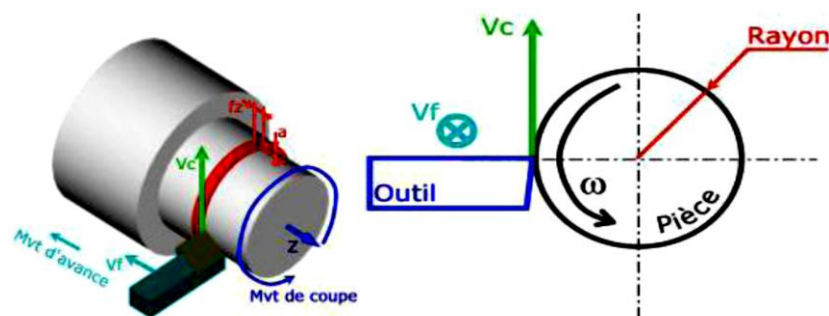


Figure I-18. Conditions de coupe [7].

### I.8.1 Vitesse de coupe

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse ( $rad/s$ ),  $N$  (soit  $N \text{ tr/min}$ ), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre  $D$  la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut [3] :

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad (\text{I-1})$$

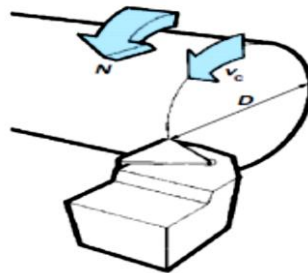


Figure I-19. Vitesse de coupe [3].

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe soit, avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique :

$V_c$  : vitesse de coupe ( $m/min$ ) ;

$D$  : diamètre de la pièce ( $mm$ ) ;

$N$  : Fréquence de rotation ( $tr/min$ ).

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés.

D'après la littérature [3] en dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe, continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante.

Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante.

Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre.

Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines.

De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante. Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment [3] :

- Des matériaux de la pièce et de l'outil ;
- De la lubrification ;
- De la durée de vie souhaitée pour l'outil.

### I.8.2 Vitesse d'avance $V_f$

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 s'ébraisent [3].

$$V_f = f * N \quad (I-2)$$

$V_f$  : vitesse d'avance ( $mm/min$ ) ;

$f$  : l'avance ( $mm$ ) ;

$N$  : fréquence de rotation ( $tr/min$ ).

#### I.8.2.1 Les types d'avances

On distingue trois sortes d'avance (Fig I-20) :

- **Avance longitudinal** : On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche ;
- **Avance transversale** : On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche ;

➤ **Avance oblique** : On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche.

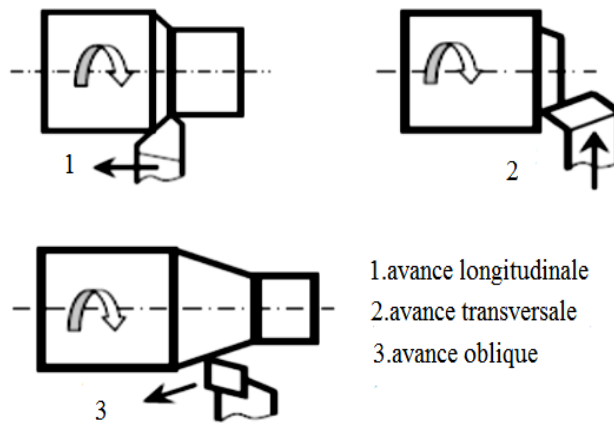


Figure I-20. Différents types d'avance [13].

### I.8.3 Profondeur de passe « a »

La profondeur de passe notée « **a** » en (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale (Fig I-21), 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 [9].

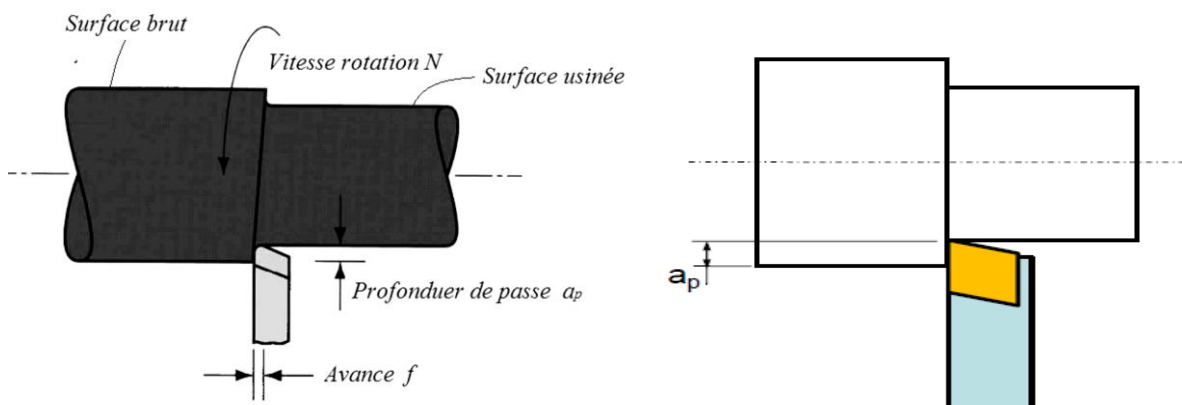


Figure I-21. Les profondeurs de passe [14].

### I.8.4 Influence des paramètres de coupe sur l'usure

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

- **Vitesse de coupe :** La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure ;
- **Avance :** Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil ;
- **Profondeur de passe :** La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure ;
- **Matériau usiné :** Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition) ;
- **Lubrification :** Son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil [11].

### I.9 Support et entraînement des pièces sur un tour

Il existe trois principaux montages de la pièce à usiner sur le tour :

- **Montage en l'air :** C'est un montage sur mandrin effectué pour les pièces courtes ( $L < 4D$ ). Une des extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre reste libre [15].

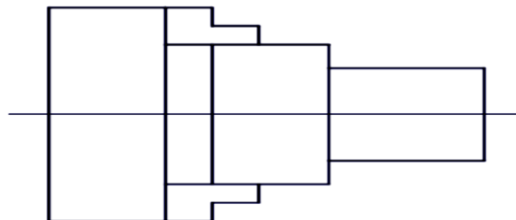


Figure I-22. Montage en l'air [15].

➤ **Montage mixte :** Il est utilisé pour des pièces relativement longues ( $4D < L < 8D$ ). Une des deux extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre extrémité est soutenue par de la poupée mobiles [15].

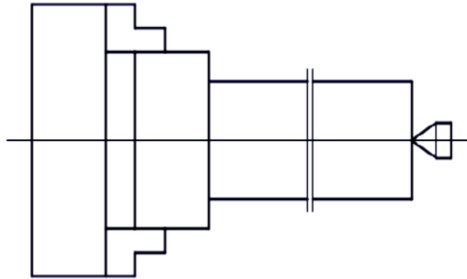


Figure I-23. Montage mixte [15].

➤ **Montage entre-pointes :** Pour l'usinage des pièces longues ( $L > 8D$ ), on utilise le montage entre pointes. La pièce est soutenue par ses deux extrémités par deux pointes plus lunette [15].

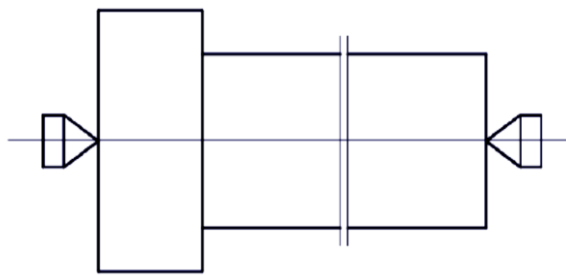


Figure I-24. Montage entre-pointe [15].

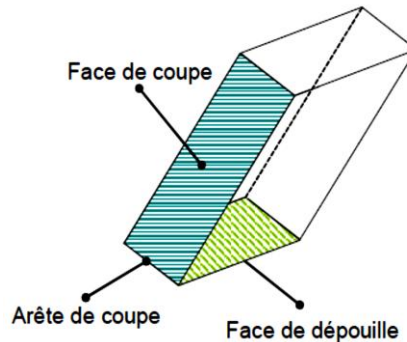
### I.10 L'outil de coupe

L'outil de coupe peut être défini comme l'élément directement responsable de l'enlèvement de la matière lors de l'usinage. Quatre paramètres principaux déterminent le domaine d'utilisation des outils [16] :

- La géométrie ;
- Le matériau du substrat ;
- Le type de revêtement ;
- Les conditions de lubrification.

### I.10.1 Géométrie de l'outil

Un outil de coupe est défini par deux plans : la face de coupe et la face de dépouille. L'intersection de ces deux plans constitue l'arête de coupe (Fig I-25) [16].



**Figure I-25.** Géométrie d'un outil simple [16].

En réalité ces deux plans sont reliés par le rayon de bec  $R$  de l'arête de coupe, mais il est généralement négligé dans l'étude de la coupe orthogonale, tel que le montre là (Fig I-25) Trois angles, dont la somme est égale à  $90^\circ$ , sont nécessaires pour définir les caractéristiques géométriques d'un outil comme il est présenté sur la (Fig I-26) :

➤ **Angle de coupe ( $\gamma_o$ )** : c'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence P (perpendiculaire à la direction d'usinage).

L'angle de coupe affecte la capacité de l'outil à cisailer le matériau à usiner. Il peut être positif, négatif ou nul.

Les angles de coupe positifs réduisent les efforts de coupe, tandis que des angles de coupe négatifs apportent de la robustesse à l'arête de coupe de l'outil [17].

Sa valeur se trouve généralement entre  $-5^\circ$  et  $+5^\circ$ , quelque fois entre  $-10^\circ$  et  $+10^\circ$  et plus rarement entre  $-20^\circ$  et  $+20^\circ$ .

➤ **Angle de dépouille ( $\alpha_o$ )** : c'est l'angle entre la face de dépouille et la surface usinée. Sa valeur, nécessairement positive, oscille généralement entre  $2^\circ$  et  $10^\circ$  [16].

➤ **Angle de taillant ( $\beta_0$ )** : c'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille

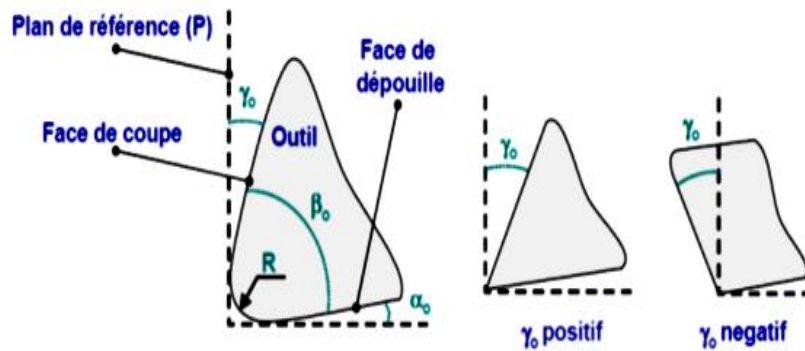


Figure I-26. Angles de coupe d'un outil simple [16].

### I.10.2 Outils de coupe et leurs nuances

Les fabricants d'outils de coupe fournissent aux artisans et manufactures des outils avec des géométries différentes et des prix différents selon les opérations d'usinage voulues (tournage, fraisage, perçage, ...etc.) et sous différents aspects : outils en bloc en acier rapide, outils à plaquettes brasées et en plaquettes amovibles (Fig I-27) [18].

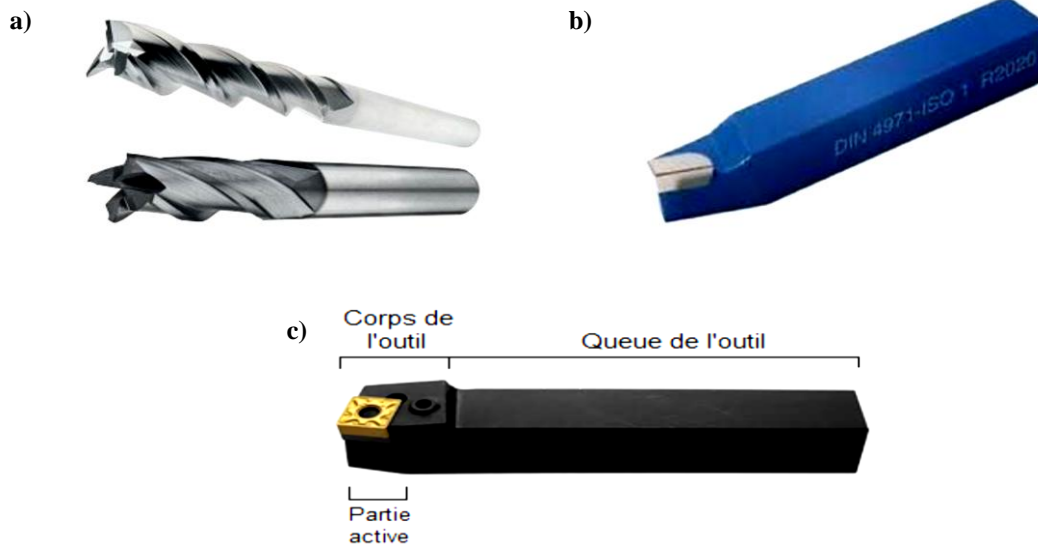
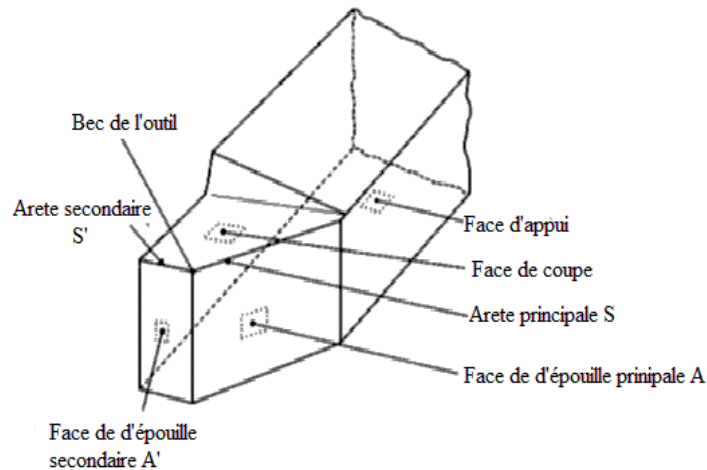


Figure I-27. Présentation des différents types d'outils : a) Fraises monobloc en acier rapide, b) Outils à charioter plaquette brasée c) Outils à charioter à plaquettes amovibles [18].

En général un outil de coupe est constitué d'un corps et d'une queue (Fig I-28), cette dernière est de section circulaire ou carrée et a pour rôle le maintien de l'outil au porte-outil (la tourelle en tournage, la broche en fraise et perçage), la première partie est destinée à recevoir les éléments tranchant ou les plaquettes.

L'élément coupant est limité par des faces dont l'intersection forme les arêtes (Fig I-28). Seules les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille qui interviennent dans le processus de la coupe du métal, c'est ces derniers qui forment la partie active [18].



**Figure I-28.** Faciès limitant la partie active de l'outil [19].

### I.10.3 Classification des outils de coupe

Les machines-outils utilisent une grande gamme d'outils d'usinage et cela selon le type d'opération et la forme de la pièce à réaliser. On distingue trois classes :

**a) Outils à arrête unique :** Ce type d'outils a la particularité d'avoir une seule arête tranchante, ils sont uniquement utilisés en tournage et en rabotage (Étau limeur), leur pointe est généralement arrondie pour former un rayon de bec d'outil.

**b) Outils à arrête multiples :** Ces outils comme leur nom l'indique possèdent plusieurs arêtes tranchantes et sont de forme cylindrique. On les utilise dans les opérations de parage, d'alésage et de fraisage où le mouvement de coupe est leur attribué [18].

**c) Outil de coupe à plaquette rapportée :** 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 [3] :

- 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 prise de pièce et de la pièce.



Figure I-29. Outil de coupe à plaquette rapportée [20].

#### I.10.4 type des outils selon le type d'opération

La (Fig I-30) représente les différents outils d'usinage pouvant être exécutés sur les tours [21].

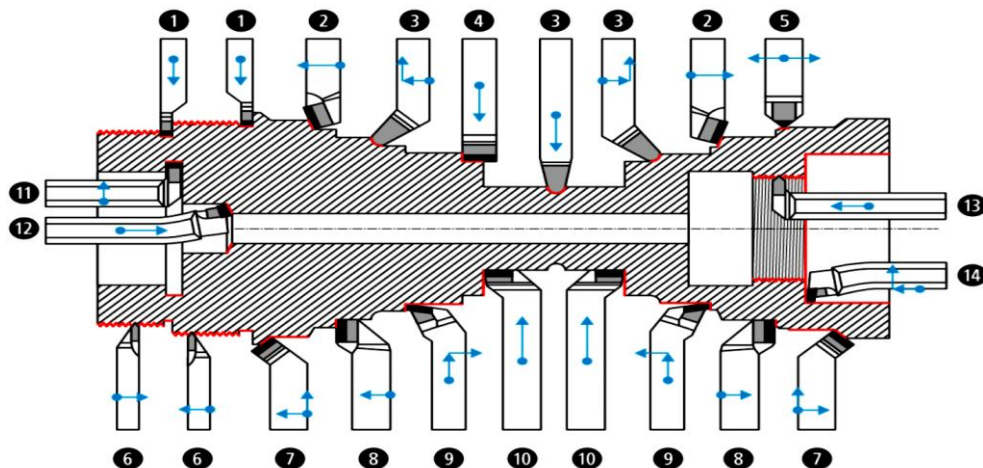


Figure I-30. Opérations d'usinages en tournage [21].

En tournage Sur un tour on dispose de deux classes d'outils :

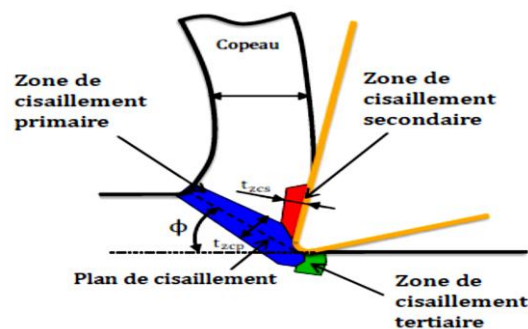
- Outils intérieurs ;
- Outils extérieurs.

**Tableau I-1.** Les différents outils et leurs utilisations [21].

Numérotation	Nom d'outils
1	Outil à saigner
2	Outil à charioter droit
3	Outil à retoucher
4	Outil pelle
5	Outil à retoucher
6	Outil à fileter (extérieur)
7	Outil à charioter coudé
8	Outil couteau
9	Outil à dresser d'angle
10	Outil à dresser les faces
11	Outil à chambrer
12	Outil à aléser
13	Outil à fileter (intérieur)
14	Outil à aléser et dresser

### I.10.5 Formation du copeau

Dans l'usinage des métaux, l'outil exerce des forces mécaniques sur la pièce, ce qui entraîne la formation de copeau qui est caractérisé par l'apparition des trois zones (Fig I-31) :



**Figure I-31.** Principales zones de cisaillement en usinage : Zone de Cisaillement Primaire ZCP, Zone de Cisaillement Secondaire ZCS et la Zone de Cisaillement Tertiaire ZCT.

### I.10.5.1 Zone de cisaillement primaire ZCP

La ZCP est une zone caractérisée par des déformations intenses de l'ordre de 200% à 300% et des grandes vitesses de déformation de  $10^3 \text{ s}^{-1}$  à  $10^6 \text{ s}^{-1}$  [22]. Cette zone située entre la pointe de l'outil et la surface libre du copeau, (Fig I-31) est assimilée à une bande très fine appelée bande de cisaillement adiabatique et inclinée d'un angle  $\varphi$  dit 'angle de cisaillement primaire'. Ce dernier a été déterminé par Merchant [23,24] en minimisant l'énergie de coupe et en supposant un comportement parfaitement plastique pour le matériau usiné. L'angle est alors défini par :

$$\varphi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\lambda - \alpha) \quad (\text{I-3})$$

Où  $\lambda$  est l'angle de frottement entre l'outil et le copeau et l'angle de coupe. Dans ses travaux [26,27], Merchant suppose un changement brusque de la direction d'écoulement dans la ZCP, d'autres travaux [25,26] ont modélisé plutôt un changement progressif de la vitesse dans cette zone introduisant ainsi une bande de cisaillement avec une certaine épaisseur.

La ZCP est alors décrite par une bande d'épaisseur  $t_{zcp}$  dont les caractéristiques dépendent du matériau et de la vitesse de coupe, Oxley [25]. Par ailleurs, certains auteurs comme Thomsen et al. [27] considèrent que cette bande peut présenter une courbure qui modifie l'évolution de la contrainte normale. Cela étant, le très faible rapport entre l'épaisseur de la bande et son rayon de courbure permet de l'apparenter à une bande rectiligne.

De plus, pour le cas des vitesses de coupe élevées permettant d'atteindre le régime de cisaillement adiabatique, le copeau devient très segmenté et l'épaisseur de la bande ZCP devient très fine (quelques dizaines de microns à peine). Des observations faites par Liyao et al. [28] et Molinari et al. [29] ont confirmé ces tendances pour différents types de matériaux usinés.

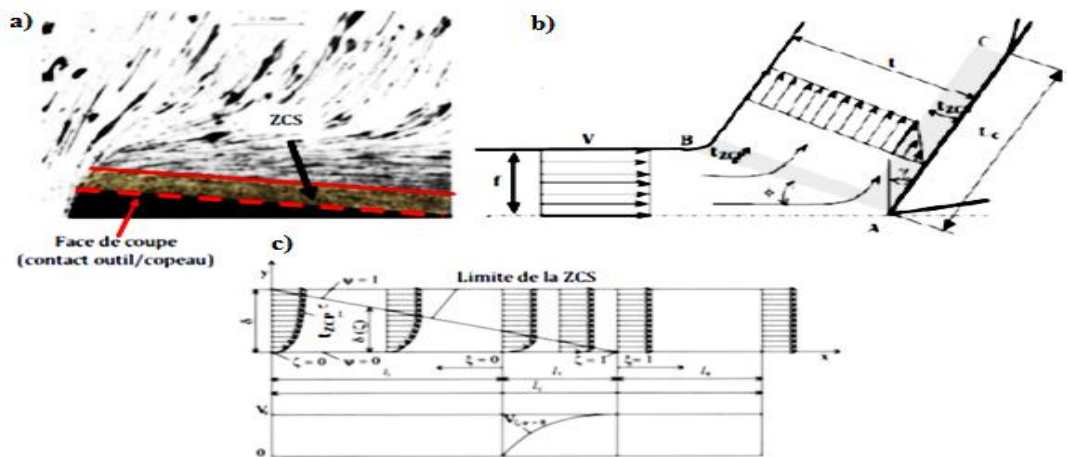
### I.10.5.2 Zone de cisaillement secondaire ZCS

Introduite pour la première fois par Mallock [30], cette seconde zone de cisaillement est située à l'interface outil/copeau. Elle est le siège des frottements intenses entre la face de coupe de l'outil et le copeau. Contrairement à la ZCP, cette seconde zone est souvent responsable de l'usure sur la face de coupe de l'outil. Elle est soumise à la fois à un fort taux

de cisaillement et à une augmentation importante de la température résultat de la source de chaleur générée par frottement, *M'Saoubi et al.* [31].

La ZCS est caractérisée par une épaisseur  $t_{zcs}$  variant de 1 à 10% de l'épaisseur totale du copeau, *Oxley et al* [32]. A titre d'exemple, *Bouzid* [33] l'évalue entre 3 et 4% de l'épaisseur du copeau dans le cas de l'acier 25CD4. *Bahi et al.* [34] déterminent une épaisseur de l'ordre de 10% dans le cas de deux nuances de titane aéronautique : le Ti6Al4V et le Ti55531.

(La Fig I-32(a)) illustre le contact intime entre l'outil et le copeau rendant très difficile le glissement à l'interface (formation d'une couche limite). L'écoulement de la matière se fait alors par cisaillement dans l'épaisseur  $t_{zcs}$ .



**Figure I-32.** (a) Section de copeau obtenue par « Quick stop » montrant la ZCS d'un acier avec 0.1% de carbone et usiné avec une vitesse de coupe élevée, *Trent et al.* [35]. (b) Cinématique simplifiée de la formation du copeau montrant la variation de la vitesse dans l'épaisseur du copeau, *Gilormini* [36]. (c) Représentation du champ de vitesse dans le copeau en fonction de la position sur la face de coupe *Marinov* [37].

Plusieurs auteurs ont développé des modèles tenant compte de la zone de cisaillement secondaire. *Oxley* [25] propose une approche thermomécanique qui tient compte à la fois de l'écroutissage, de l'écoulement visqueux du matériau et de son adoucissement thermique. *Gilormini* [36] a décrit quant à lui les conditions d'évacuation du copeau en proposant deux zones de champs de vitesses différentes dans le copeau voir (Fig I-32(b)).

Dans la première zone qui correspond à la ZCS, le champ de vitesses varie linéairement, passant d'une valeur nulle à l'interface outil/copeau à une valeur constante et égale à la

vitesse d'évacuation du copeau. Dans la seconde zone, la vitesse est constante de la fin de la ZCS jusqu'au bord libre du copeau. Cette description du champ de vitesses est cependant incomplète puisque l'auteur ne décrit pas ce qui se passe à mesure que l'on s'éloigne de la pointe de l'outil et n'explique pas comment la vitesse évolue le long de l'interface.

Cette description est proposée par *Marinov* [37] dans sa modélisation hybride qui suppose que la vitesse de glissement du copeau est nulle à l'interface au niveau de la pointe de l'outil, puis elle prend progressivement la valeur de la vitesse du copeau quand celui-ci quitte la face de coupe de l'outil donnant ainsi une forme triangulaire à la ZCS voir (Fig I-32(c)). Les phénomènes physiques régissant la ZCS et la totalité de l'interface outil/copeau sont détaillés dans la section suivante lorsque sera abordé l'aspect contact outil/copeau.

### **I.10.5.3 Zone de cisaillement tertiaire ZCT**

La ZCT est localisée au niveau de la face de dépouille de l'outil, lieu de contact entre celui-ci et la pièce fraîchement usinée. La largeur de cette zone est fortement influencée par les propriétés élastiques du matériau (retour élastique), *Germain* [38].

Dans cette zone, l'outil exerce un effort de compression et la vitesse de frottement de la matière est égale à la vitesse de coupe. Les sollicitations dans la zone ZCT sont souvent à l'origine de l'usure en dépouille de l'outil et conditionnent l'intégrité de la surface usinée (rugosité, contraintes résiduelles, etc.), [39,40].

### **I.10.6 Les matériaux des outils**

L'usinage des métaux ou des polymères nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés, une bonne dureté à haute température vue les frottements permanent outil / pièce et outil/copeau, de résistance à l'usure et de stabilité chimique.

Les premiers outils étaient en acier rapide où le corps et la partie active d'outil étaient en une seule barre, quand l'outil est usé, on l'affûtait. Les venues de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux, le barreau en acier rapide ne remplit pas les exigences technologies voulues.

C'est l'apparition des outils en carbures métalliques, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de ces techniques.

Les principales matières utilisées pour les outils de coupes modernes sont représentées dans la (Fig I-33) [41,3].

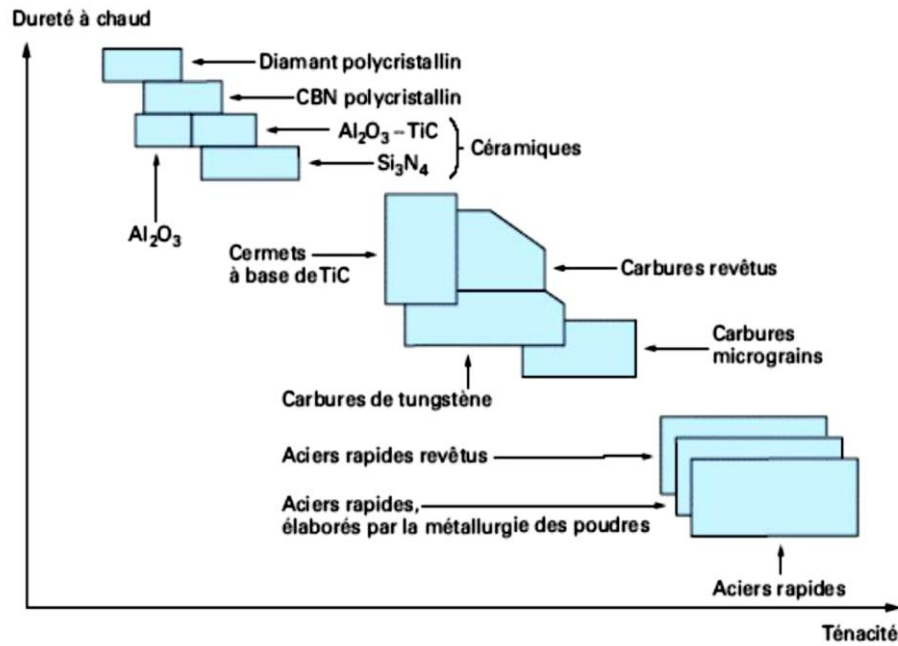


Figure I-33. Disposition des matériaux d’outil selon la ténacité et la dureté [41,3].

Des conditions optimales d’usinage sont à rechercher pour un outil et une pièce donnés. Cette recherche ne peut être établie que par un protocole expérimental très rigoureux.

La (Fig I-34) présente les nuances d’outils coupants et leurs domaines d’application.

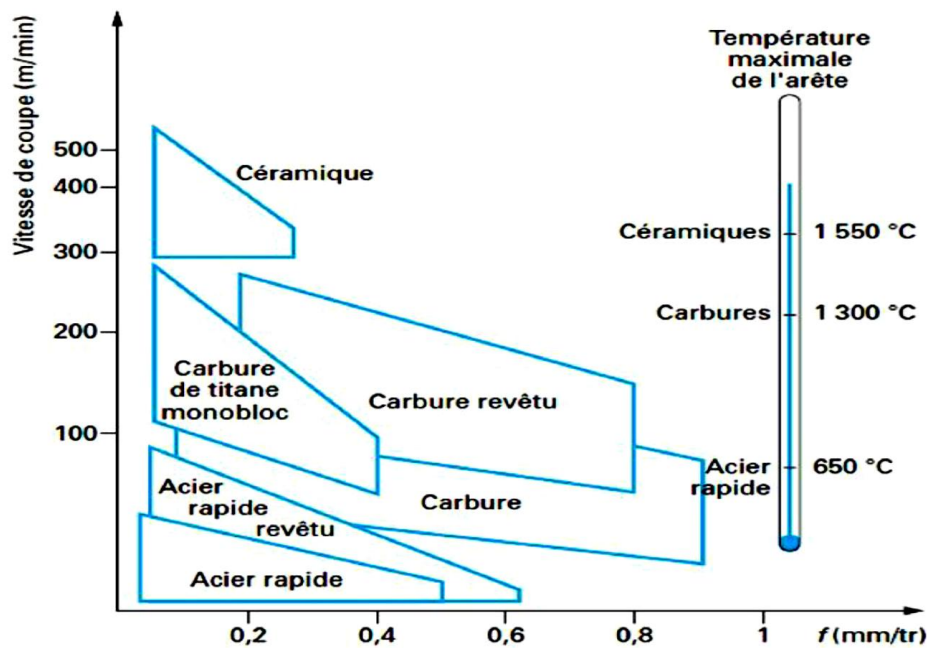


Figure I-34. Matériaux à outil de coupe en fonction de paramètres de coupe [42].

➤ **L'acier rapide (AR) :** La base des outils AR (acier rapide) ou ARS (aciers rapides supérieurs) est un acier faiblement allié qui a subi un traitement thermique, plusieurs outils en RAS sont disponibles, on les distingue par leur composition métallurgique, en général ils ont une teneur en carbone de 0,7 à 1,6 %, en Tungstène de 12 à 20 %, en molybdène de 3,5 à 10% et des traces de vanadium et Cobalt pour avoir plus de duretés. L'usinage par les outils en ARS s'effectue à faible vitesse de coupe pour éviter l'échauffement trop important et aussi éviter que l'outil de perdre ses caractéristiques (la trempe dispersée), une usure rapide de l'arête soit observée.

➤ **Remarque :** Les vitesses de coupe pour ce type varient entre 25 et 35 *m/mn* pour les aciers. Leur dureté varie entre 60 et 70 *HRC*, et sera maintenue jusqu'à 550 °C. (Fig I-31) Actuellement, ce matériau est utilisé seulement pour certains outils comme les forêts ou les outils à faible angle tranchants

➤ **Carbures métalliques :** Les principaux composants des outils en carbures métalliques sont le carbure de tungstène (phase  $\alpha$ ), et le carbure de titane, de tantale ou le niobium (phase  $\gamma$ ) et d'un élément de liaison entre les grains de carbure (taille de 0.2 à 1  $\mu\text{m}$ ) généralement du cobalt (phase  $\beta$ ) de l'ordre de 8 à 20 % [43]. L'ajout du carbure de titane de tantale ou de niobium permet d'augmenter les propriétés à haute température (jusqu'à 1000°C) en réduisant le frottement, donc un choix de vitesses de coupe très importantes allant jusqu'à 100 *m/min*, Cet élément procure aussi à l'outil une durée de vie supérieure à celle des outils en AR ou ARS. La dureté des outils en carbure est de l'ordre de 80 à 90 *HRC*. Aujourd'hui, ces outils sont de plus en plus utilisés, comme plaquettes brasées (fixation permanente) ou plaquettes amovibles par fixation mécanique (fixation non permanente), cette dernière permet l'utilisation de plaquettes à plusieurs faces de coupe.

➤ **Carbures revêtus :** Les carbures métalliques frittés (*obtenu par frittage*) non revêtus présente beaucoup d'avantages mais l'inconvénient majeur est sa faible ténacité. Ces propriétés sont inversement proportionnelles aux quantités de ses composants. Afin de remédier à ce problème, les outils à plaquettes en carbures revêtus ont été mis en œuvre où ils ont appliqué un matériau de revêtement, dont les plus utilisés sont :

- Nitrure de titane TiN;
- Oxyde d'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- Carbure de titane TiC ;
- Carbonitrure de titane TiCN ;
- Alumino-nitrate de titane TiAlN.

Chaque élément de revêtement apporte à l'outil une aptitude meilleure dans un domaine particulier. Il est possible d'appliquer plusieurs couches de différents matériaux de revêtement pour combiner leurs différents avantages [44].

➤ **Céramiques :** Les outils en céramique sont généralement des plaquettes frittées d'alumine  $Al_2O_3$  ou de Nitrure de silicium  $Si_3N_4$  dits plaquettes Sialon ou d'oxyde de chrome  $Cr_2O_3$ . Ils possèdent de bonnes caractéristiques thermomécaniques, ils sont favorables à l'usinage en coupe continue, mais à éviter dans le cas de coupe discontinue où l'outil présente des défauts d'ébréchure du bord des plaquettes et un craquage thermique car des outils fragiles.

Ces outils acceptent un usinage à une vitesse de coupe de  $500\text{ m/min}$  pour les aciers, et gardent ses caractéristiques jusqu'à des températures de  $1200^\circ C$ , donnant un excellent état de surface des pièces usinées [45].

➤ **Cermets :** Les outils Cermets sont en carbures, en nitrures, en carbonitride ou en borure avec un liant de grains un métal ou un alliage ferreux (cobalt, nickel, nickel - fer, nickel – chrome, etc.). Ils ont par rapport aux métaux durs conventionnels une densité faible avec une dureté et une résistance à l'usure plus élevées.

Leurs duretés sont de l'ordre de  $1500$  à  $2000\text{ HV}$ . Ils ne perdent pas leur capacité à chaud en usinage à grande vitesse ou aux températures extrêmes allant jusqu'à  $1000^\circ C$  [45]. Les cermets sont destinés pour les opérations de finition et l'usinage de précision qui sollicitent un travail à grandes vitesses de coupe et à faibles avances.

➤ **Nitrure de bore cubique NBC :** CBN est un matériau très dur prévu pour l'usinage des aciers trempés, des fontes et d'alliages à base de nickel ou cobalt. Il n'oxyde pas à haute température contrairement au diamant. Pour travailler avec ce matériau, il faut être très rigoureux au niveau des conditions de coupe (machine stable, grande rigidité et un arrosage permanent durant l'usinage). Les plaquettes en nitrure de bore sont destinées principalement à la finition des pièces de précisions.

➤ **Diamant :** Le diamant est fortement utilisé comme composant des meules en abrasif, ou des grains sertis ou brasés sur un corps pour les outils tranchant à arête unique réservée à des travaux de finition et de réaffûtage de meules, il est instable à haute température, à  $650^\circ C$  il se transforme en graphite. Il convient parfaitement à l'usinage des alliages d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables...etc [46].

### I.10.7 Durée de vie d'un outil de coupe

Compte tenu de la complexité du phénomène, il n'existe pas de loi mathématique simple permettant de calculer la "durée de vie" de l'outil. La durée de vie d'un outil est caractérisée par le temps mis pour atteindre la valeur limite du critère d'usure considérée dans des conditions de coupe données. Généralement on choisit comme critère d'usure l'un des trois critères suivants :

- Défaillance brutale due à la déformation plastique de l'arête. Ce critère n'est employé que pour les outils en acier rapide ou les outils en céramique ;
- Usure frontale, employé pour tous les outils, caractérisés soit par l'usure frontale moyenne soit par l'usure frontale maximale ;
- Usure en cratère, employé seulement pour les outils en carbure métallique, caractérisé par la Profondeur du cratère [5]. La durée de vie est mesurée sur l'usure en dépouille dans la zone (b) (Fig I-35) VB en *mm*.

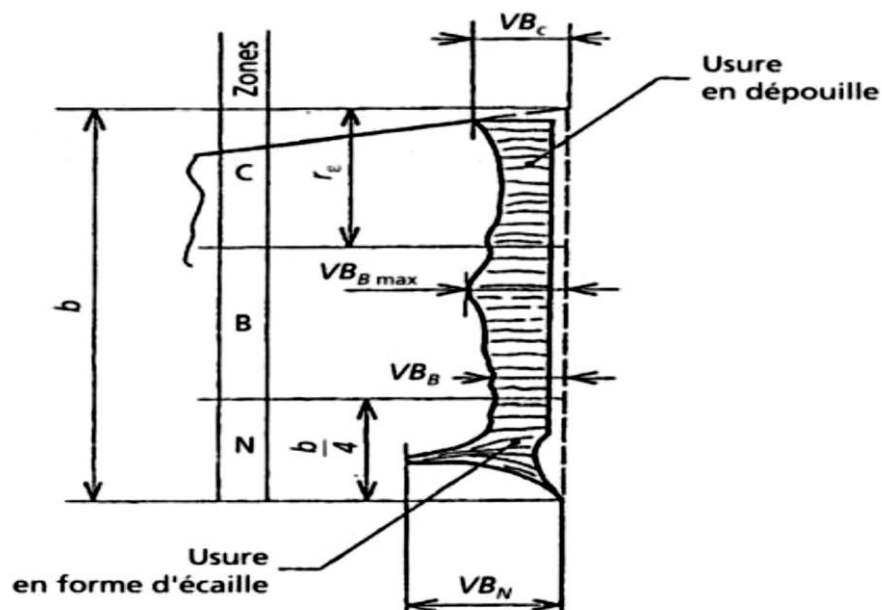


Figure I-35. Critère d'usure VB [5].

En fait la durée de vie de l'outil est fonction des différents paramètres, soit :

- Les conditions de coupe ;
- Le matériau et la géométrie de l'outil ;
- Le matériau et l'état physique de la pièce ;
- La lubrification.

Généralement seules les conditions de coupe sont prises en considération et on établit des lois d'usure pour des outils parfaitement définis pour un matériau usiné donné et dans des conditions de lubrification déterminées [47]. On arrive donc des lois d'usure de la forme :

$$T = f(V_c, f, a_p) \quad (I-4)$$

➤ **Remarque** : La vitesse de coupe étant en fait le paramètre le plus important on trouve aussi des lois d'usure sous la forme :

$$T = f(V_c, f) \quad (I-5)$$

### I.11 Paramètres techno-économiques d'usinage

Le coût d'usinage et le temps d'usinage sont les paramètres techno-économiques d'usinage.

Ces les paramètres qui déterminent l'importance économique des pièces usinées [14].

#### I.11.1 Temps d'usinage

Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. Il s'exprime par la relation [48] :

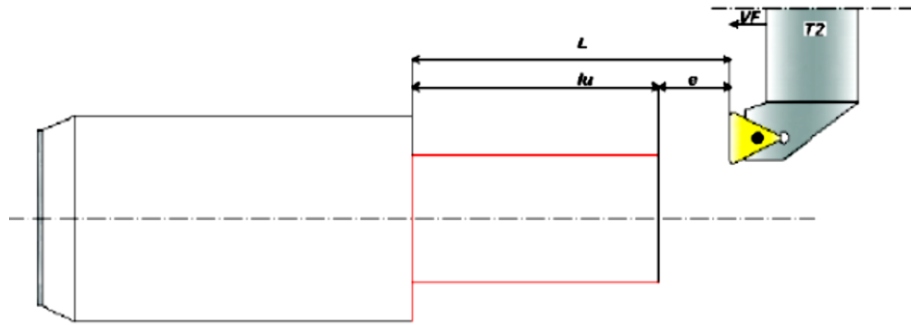
$$T_u = T_m + T_{cs} \left( \frac{T_m}{T} \right) + T_r + T_h \quad (I-6)$$

$T_{cs}$  : (Temps outil) temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire ;

$T$  : Durée de vie de l'outil de coupe ;

$T_r$  : Temps de retour ;

$T_m$  : (Temps technologique) : temps de machine (temps de coupe avec une avance), puisque :  
On détermine le temps technologique comme suite :



**Figure I-36.** Paramètres du temps technologique [48].

$L_u$  : Longueur usinée ;

$e$  : Distance de sécurité ;

$V_f$  : vitesse d'avance.

Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = l_u + e \quad (I-7)$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce est :

$$T_m = L/V_f \quad (I-8)$$

$$T_m = \pi * D * N/1000 * V_c * f \quad (I-9)$$

### I.11.2 Coût d'usinage

Généralement, la formule du coût d'usinage est donnée par :

**Coût total** = frais fixes + coût machine + coût outil

Le coût d'usinage unitaire est le coût nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce, il s'écrit comme suit :

$$C_u = C_0 \cdot t_m + (t_m/T) (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) + C_0(t_h + T_r) \quad (I-10)$$

$C_u$  : Coût d'usinage unitaire ;

$C_0$  : Coût de machine en \$/min ;

$C_t$  : Coût d'une arrête de coupe en \$/arrête.

### I.12 Efforts de coupe en tournage

L'effort de coupe  $F_c$  dépend de la résistance spécifique à la rupture par Compression  $R_c$  de la matière travaillée et de son usinabilité, des dimensions du copeau, de l'outil utilisé ainsi que du mode de travail.

Généralement, l'effort de coupe est calculé par la relation suivante [49] :

$$F_c = k. S. R_r \quad (I-11)$$

Avec :

$R_r$  : La Résistance spécifique à la rupture par compression ;

$S$  : Section du copeau définie par l'avance  $f$  et la profondeur de passe  $ap$ , soit :

$$S = ap.f \quad (I-12)$$

$K$  : Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière, de l'épaisseur du Copeau, (il est plus fort en finition qu'en ébauche) et de la géométrie de l'outil de coupe. On adopte généralement les valeurs suivantes :

$K = 2,5$  à  $4$  (daN) pour les aciers et  $K = 4$  à  $5$  (daN) pour les fontes [49].

➤ **Composants de l'effort** : Pour simplifier le problème relatif aux actions de contact pièce sur outil, c'est-à-dire aux efforts de coupe, on se placera dans les conditions d'une coupe orthogonale où le vecteur avance est perpendiculaire à l'arête de coupe.

D'après *J. Vergnas* [14], la coupe par chariotage longitudinal donne lieu, au moins à deux efforts composants  $F_s$  et  $F_t$ , et un effort de coupe résultant  $F_c$  (Fig I-37). Expérimentalement, *J. Vergnas* a vérifié que  $F_t \approx F_c$

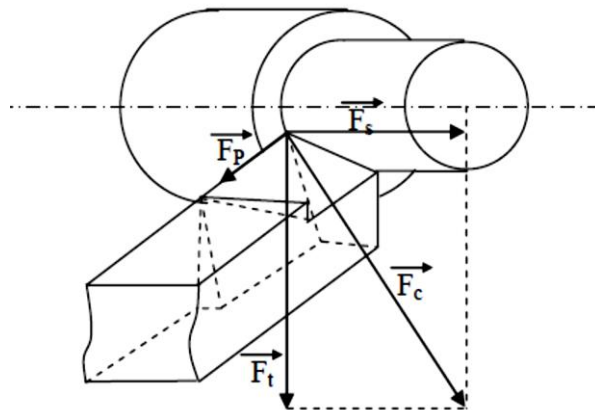


Figure. I-37. Efforts de coupe en tournage [50].

$F_t$  : effort tangentiel ;

$F_s$  : effort d'avance ;

$F_p$  : effort de répulsion (négligeable dans le cas d'une coupe orthogonale) ;

$F_c$  : effort de coupe.

➤ **Puissance de coupe** : On a défini la puissance dans le cas général comme un le produit scalaire du Vecteur d'effort et vitesse :

$$\mathbf{P} = \vec{\mathbf{F}} \cdot \vec{\mathbf{V}} \quad (\text{I-13})$$

$$(\mathbf{P}) = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_f \\ \mathbf{F}_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_f \\ \mathbf{V}_c \end{pmatrix} \quad (\text{I-14})$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{F}_a * \mathbf{V}_a + \mathbf{F}_f * \mathbf{V}_f + \mathbf{F}_c * \mathbf{V}_c \quad (\text{I-15})$$

En chariotage nous négligeons l'effort d'avancement et l'effort radial Donc :

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{F}_c * \mathbf{V}_c \quad (\text{I-16})$$

### I.13 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre de notre étude le procédé de tournage ainsi que les opérations de tournage (Chariotage, Dressage...), ainsi les conditions de coupe est les Paramètres techno-économiques d'usinage (le coût, le temps d'usinage et la rugosité), ensuite Puissance et Efforts de coupe en tournage.

**I.14 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Serra. R, Rmili. W, Ouahabi. A, « *Suivi de l'usure des outils de coupe en tournage à sec de la fonte FT25 par analyse vibratoire* », 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Marseille, (24-28 août 2009).
- [2] Valiorgue. F, « *Simulation des processus de génération de contraintes résiduelles en tournage du 316L Nouvelle approche numérique et expérimentale* ». Thèse, L'ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (08/12/2008).
- [3] Alain Passeron, « *Tournage* », Techniques de L'Ingénieur, BM7086, (1997).
- [4] M. hamdi ben abdelali, « *caractérisation et modélisation des mécanismes tribologiques aux interfaces outils-pieces-copeaux en usinage à sec de l'acier c45* ». Thèse l'Université de Lyon (19 Janvier 2013).
- [5] Jean-Pierre corde bois et coll, « *Fabrication Par Usinage* », DUNOD, Paris (2003).
- [6] Amier. F, « *Etude Comportementale de l'Outil – Pièce en Tournage* », Ecole Nationale Polytechnique d'Oran.
- [7] Alexandre Toumine, « *Cours D'Usinage* », Groupe Conception Production, INSA de Lyon, France. (2007).
- [8] La transformation et le travail des métaux, <http://www.ilocis.org/fr/contilo13.html>.
- [9] Rocdacier, « *Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie* », (2011).
- [10] Philippe. D, « *Cours Fabrication Mécanique* », Université de la Réunion (2004-2005).
- [11] Madani. M, Ghouini. R, « *Amélioration des Paramètres Technologiques de Coupe en Tournage* », Mémoire de Master Université, kasdi Merbah de Ouargla, (2011).
- [12] Détermination Des Paramètres De Coupe, Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail-maroc.
- [13] Vergnas. J, « *Usinage : Technologie et Pratique* », Génie Mécanique DUNOD, ISBN 2-04-011186-7, BORDAS, Paris (1982).
- [14] John Wiley & Sons, « *Fundamentals of Modern Manufacturing* », 2nd edition Inc. M. P. Groover, (2002).
- [15] Benlahmidi. S, Aouici .H, « *Tournage, TP Production/ 2ème année GM&P* », Ecole Nationale Supérieure de Technologie.
- [16] David.J, Velásquez. P, « *Étude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V* », THESE L'université Paul Verlaine de Metz, (12 mars 2007).
- [17] Leroy. F, « *Endommagement des outils de coupe* », Techniques de l'ingénieur. (Février 1993). B 7 042.

- [18] Bennegadi. M, « *Coupe des Métaux en Fabrication Mécanique et Productique* », Université D'Oran Mohamed Boudiaf (2018).
- [19] G. Levallant et al, « Usinage par enlèvement de copeaux », Groupe Eyrolles, 2005.
- [20] Cours de technologie générale, classe de BTS.BE, (1973).
- [21] Gruescu. F, Defourne. P, Quaegebeur et J. F. Antoine, « *Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PM-EFAU), SEMM (service enseignement et multimédia)* » / université lille1 – France, (2015).
- [22] He. N, Lee. T, Lau. W, S. Chan, « *Assessment of deformation of a shear localized chip in high speed machining* », Journal of materials processing technology, 129 (2002) 101-104.
- [23] Merchant M.E, « *Mechanics of the Metal Cutting Process* », I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip, Journal of Applied Physics, 16 (1945) 267-275.
- [24] Merchant M.E, « *Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity conditions in orthogonal cutting* », Journal of applied physics, 16 (1945) 318-324.
- [25] Oxley. P.L.B, « *the mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability* », Ellis Horwood, Chichester, (1989).
- [26] Dudzinski. D, Molinari. A, « *A modelling of cutting for viscoelastic materials* », International Journal of Mechanical Sciences, 39 (1997) 369-389.
- [27] Thomsen. E.G, Yang. C. T, Kobayashi. S, « *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing* », Macmillan, (1965).
- [28] Liyao. G, Minjie. W, Chunzheng. D, « *on adiabatic shear localized fracture during serrated chip evolution in high speed machining of hardened AISI 1045 steel* », International Journal of Mechanical Sciences, 75 (2013) 288-298.
- [29] Molinari. A, Dudzinski. D, Stationary, « *shear band in high-speed machining* », Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'université, Sciences de la Terre, 315 (1992) 399-405.
- [30] Mallock. A, « *The Action of Cutting Tools* », Proceedings of the Royal Society of London, 33 (1881) 127-139.
- [31] M'Saoubi. R, Chandrasekaran. H, « *Innovative Methods for the Investigation of Tool-Chip Adhesion and Layer Formation during Machining* », CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54 (2005) 59-62.
- [32] Oxley. P.L.B, Hastings. W.F, « *Minimum work as a possible criterion for determining the frictional conditions at the tools chip interface in machining* », Royal Society, London, (1976).

- [33] Bouzid. W, « *Etude expérimentale et numérique de la coupe orthogonale* », Paris. ENSAM, (1993).
- [34] Bahi. S, Nouari. M, Moufki. A, El Mansori. M, Molinari. A, « *A new friction law for sticking and sliding contacts in machining*», Tribology International, 44 (2011) 764-771.
- [35] Trent. E.M, Wright. P.K, « *Metal Cutting*», Butterworth-Heinemann, (2000).
- [36] Gilormini. P, « *Contribution à la modélisation de la formation du copeau en usinage des métaux* », ENS des Mines Paris, (1982).
- [37] Marinov. V.R, « *Hybrid analytical–numerical solution for the shear angle in orthogonal metal cutting- Part I: theoretical foundation*», International Journal of Mechanical Sciences, 43 (2001) 399-414.
- [38] Germain.D, « *Développement d'un modèle d'efforts de coupe intégrant le contact en dépouille : Application au tournage de super finition du cuivre Cu-c2* », Arts et Métiers Paris Tech, (2011).
- [39] Albrecht. P, « *New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process: Part I. The Ploughing Process in Metal Cutting*», Journal of Manufacturing Science and Engineering, 82 (1960) 348-357.
- [40] Germain. D, Fromentin. G, Poulachon. G, Bissey-Breton. S, « *From large-scale to micromachining: A Review of force prediction models*», Journal of Manufacturing Processes, 15 (2013) 389-401.
- [41] BERRO. A, « *Optimisation multi-objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique* », thèse de doctorat université Toulouse, décembre (2001).
- [42] Moufki. A, Devillez. A, Dudzinski. D, and Molinari. A, « *Thermomecaical modeling of cutting and experimental validation. In Kluwer Academic Publishers, editor, Metal Cutting and High Speed Machining*», pages pp. 51–67, (2002).
- [43] Battaglia. J.L, Elmoussami. H, et Puigsegur. L, « *Modélisation du comportement thermique d'un outil de fraisage : approche par identification de système non entier* », C. R. Mécanique Vol. 330 (2002), 857-864.
- [44] Pollet. P, « *Usinabilité en fraisage d'un acier 42CrMo4 traité calcium* », Mémoire de PFE, (2000), ENSAM de Metz.
- [45] Sebhi. A, « *Etude tribologique des outils de coupe et aciers* », thèse de doctorat de l'Université Ferhat Abbès – Sétif – Algérie, (2013).
- [46] Bensaada. S, « *Coupe des métaux* », Université Mohamed Khider – Biskra – Algérie.
- [47] Denis Gelin, Michel Vincent, « *Eléments de Fabrication* », Les Editions Foucher, (1995).

- [48] Debbache. A, Benglia. M, « *Optimisation Multi-Passe des Régimes de Coupe En Chariotage* », Mémoire de Master Université kasdi Merbah de Ouargla, (2011).
- [49] Djilali. A.F, « *Etude Comportement de L'outil-Pièce En Tournage* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique D'Oran, (2014).
- [50] Ameer.T, « *Optimisation des conditions de coupe en utilisant le calcul evolutionnaire* », Université Mohamed Khider - Biskra (2005).

**CHAPITRE II**

**L'USURE DES OUTILS DES**

**COUPES**

## II.1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière reste le procédé de fabrication le plus important dans l'industrie mécanique. Cependant, l'influence de l'usure des outils coupants sur la qualité de l'état de surface et la durée de vie de l'outil coupant demeure le problème principal auquel sont confrontés les professionnels de l'usinage. En principe, ce sont les frottements à haute température générés entre l'outil, le copeau et la pièce lors de l'usinage qui provoquent l'usure de l'outil de coupe pouvant aller dans des cas extrêmes jusqu'à la rupture [1].

L'usure de l'outil est un phénomène évolutif, qui se développe en coupe. Une usure excessive nuit à la qualité de l'usinage et surtout conduit à un effondrement de l'outil. D'où l'intérêt vital d'une surveillance en ligne (pendant l'usinage) s'impose. En principe, ce sont les frottements entre le couple outil-matière générés lors de l'usinage qui provoquent l'usure de l'outil de coupe [2].

## II.2 Usure des outils de coupe

L'usure des outils est un processus de destruction des couches superficielles, qui conduit à la modification progressive de la forme et de l'état des surfaces d'un outil. Cette modification provoque des changements de propriétés de l'outil ce qui diminue sa capacité d'usinage. L'usure peut avoir des origines mécaniques (abrasion, attrition) ou bien peut être chimiquement activée (usure par diffusion) et chaque mécanisme d'endommagement agit sur l'outil à des niveaux différents selon les conditions spécifiques de l'usinage. La prédominance d'un des mécanismes où l'effet combiné de plusieurs d'entre eux dépend à la fois du type d'opération d'usinage, des conditions de coupe et des propriétés physico-chimiques des matériaux mis en jeu.

Les phénomènes tribologiques aux interfaces contrôlent alors la nature et la sévérité des usures. Par exemple quand la température à l'interface outil-copeau atteint des valeurs suffisamment élevées, l'adhésion et l'abrasion font généralement place aux phénomènes de diffusion. L'usure des outils de coupe influe d'une manière plus a moins directe sur de nombreux aspects du processus d'usinage tels que :

- La rugosité des surfaces obtenues ;
- Précision dimensionnelle des pièces usinées ;
- L'augmentation de la température dans la zone de coupe ;

- Les efforts de nécessaire à la coupe ;
- Durée de vie de l'outil [3].

**II.3 Manifestation de l'usure**

Deux manifestations de l'usure ont lieu pendant le processus de coupe : l'usure sur la face de coupe et l'usure en dépouille comme cela a été décrit par *Thusty*, [4].

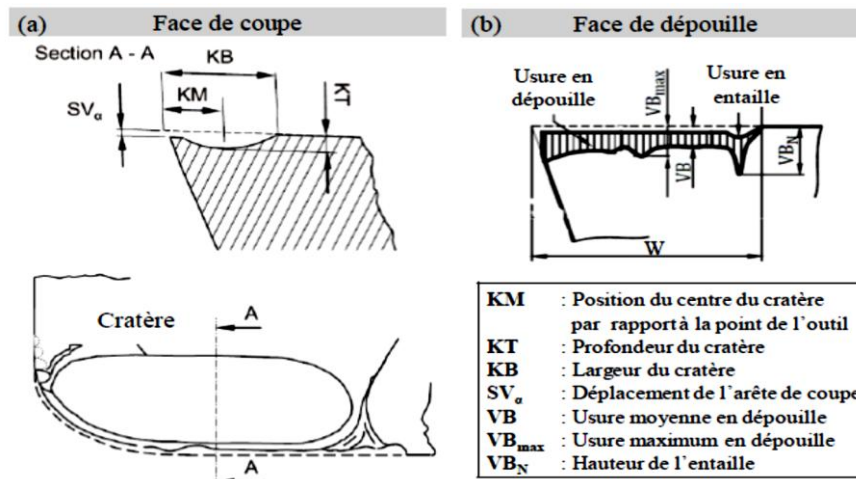
**II.3.1 Usure en cratère**

L'écoulement du copeau sur la face de coupe de l'outil entraîne un frottement sévère et la formation d'un cratère à la surface de celui-ci. Cette manifestation d'usure est appelée usure en cratère, elle est souvent liée aux phénomènes d'abrasion ou mécanismes physico-chimiques à cause des températures élevées qui règnent pendant le processus d'usinage, [5,6].

Certains auteurs évoquent la contribution de l'usure mécanique pour la dégradation de la face de coupe, [7,8]. La profondeur d'usure en cratère  $KT$  voir (Fig II-1 (a)) est généralement utilisée comme moyen de mesure de l'usure en cratère. La valeur de  $KT$  en tant que degré d'usure des outils est donnée en fonction de l'avance selon *la norme NF E66-505* :

$$KT_{lim} = 0.06 + 0.3f \tag{II-1}$$

La position du cratère par rapport à l'arête a également son importance. Un cratère large et profond loin de l'arête peut être moins préjudiciable pour l'outil qu'un cratère étroit et moins profond près de l'arête. Ceci provoque une contrainte croissante sur l'arête de coupe de l'outil et conduit généralement à sa rupture, [9].



**Figure II-1.** Paramètres d'usure selon la norme *ISO 3685*[9].

### II.3.2 Usure en dépouille

L'usure en dépouille apparaît sur la face frontale où l'outil est en contact avec la surface de la pièce usinée. L'usure en dépouille se développe généralement en raison de l'abrasion de l'arête de l'outil de coupe contre la surface de la pièce usinée, [9]. La (Fig II-1 (b)) illustre l'emplacement de l'usure en dépouille sur un outil de tournage, ainsi que le profil d'usure où  $VB$  est la valeur moyenne d'usure en dépouille,  $VB_{\max}$  est la largeur maximale et  $W$  est la longueur de la zone usée. La mesure de cette usure est définie par la largeur moyenne et la largeur maximale de la surface d'usure  $VB$  et  $VB_{\max}$  respectivement.

Le critère de durée de vie de l'outil est généralement considéré comme  $VB \text{ limite} < 0.3 \text{ mm}$  et  $VB_{\max} \text{ limite} < 0.6 \text{ mm}$  selon la norme *NF E66-505* pour un outil en carbure de tungstène. Ces valeurs limites peuvent ainsi varier en fonction des applications industrielles. L'usure en dépouille peut être scindée en trois zones dans la courbe de la durée de vie de l'outil comme montré sur la (Fig II-2). L'usure en dépouille entraîne également des modifications de la mécanique de la coupe et des détériorations du produit fini (état de surface, précision, etc.), [10]. Pour cette raison, l'usure en dépouille est généralement utilisée comme critère de durée de vie de l'outil en plus de la facilité de sa mesure.

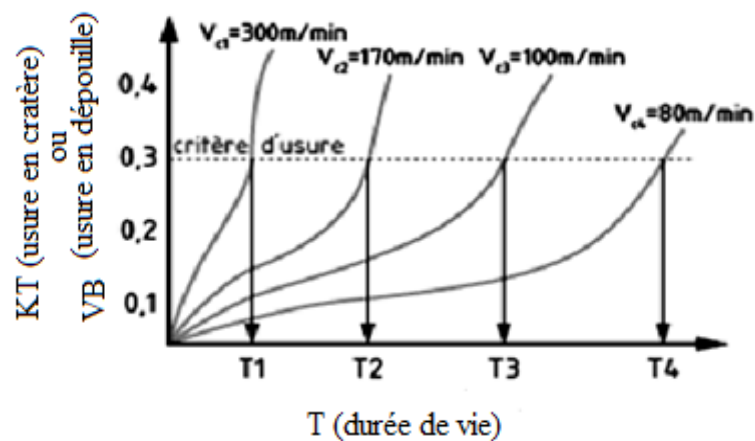


Figure II-2. Zone d'usure en dépouille, [11].

### II.3.3 La cratérisation

La cratérisation implique une réaction chimique entre la pièce et l'outil de coupe. Donc, elle est caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil. Elle se manifeste en particulier avec des outils carbures et céramiques. La forme de cratère peut être définie par

la profondeur maximale KT et par la distance du centre du cratère par rapport à la pointe initiale de l'outil KM [12].

### **II.3.4 Déformation plastique**

La pointe de l'outil peut subir une déformation plastique. On rencontre ce type d'usure, en particulier, avec des outils carbures lors de l'usinage des matériaux à hautes résistances mécaniques. Cette déformation se traduit par un abaissement plastique de la pointe de l'outil. Cette forme de l'usure est caractérisée par la valeur de la flèche SV [12].

### **II.3.5 Entaille**

Une usure en entaille est un phénomène faisant que la ligne d'arête se brise au lieu de s'user. L'usure en entaille survient par le fait que quelque chose concernant la surface de la pièce provoque une condition de coupe plus exigeante que ce que le reste de l'outil subit à profondeur de passe totale [12].

### **II.3.6 Fissuration thermique**

Lorsque le liquide recouvre l'arête de coupe de manière non homogène, la température de cette arête peut fluctuer, ce qui provoque des dilatations et des contractions alternées aboutissant à sa rupture. La fissuration thermique peut aussi avoir lieu sans arrosage. Par exemple, le fraisage à sec peut générer des fluctuations de température suffisantes pour provoquer des fissurations par fatigue sous l'effet d'un mouvement de va-et-vient de la matière [12].

### **II.3.7 Ecaillage et fracturation**






Cette forme d'usure se traduit par la rupture de morceaux de l'arête de coupe, qui est trop fragile pour supporter le choc auquel elle est soumise [12].





### **II.3.8 Formation d'arête rapportée**

Une arête rapportée se forme par soudure de la matière de la pièce sur l'outil. Le copeau atteint une température permettant de le rendre collant mais, à ce stade, il se refroidit suffisamment vite pour s'adhérer à la plaquette [12].

Le (tableau II-1) regroupe les principaux résultats de recherches par macroscopique des modes d'usure en donnant les causes et les corrections probables.

**Tableau II-1.** Principaux usure observées dans un outil de coupe.

Formes d'usures d'outil		Causes	Corrections
Usure en dépouille		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</li> <li>• Angle de dépouille est trop petit.</li> <li>• Taux d'alimentation (vitesse d'avance) <math>V_f</math> est extrêmement faible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure (plaquette avec revêtement <math>Al_2O_3</math>).</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> <li>• Augmenter l'angle de dépouille.</li> <li>• Augmenter le taux d'alimentation <math>V_f</math>.</li> </ul>
Usure en cratère		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</li> <li>• Taux d'alimentation <math>V_f</math> est trop élevé.</li> <li>• Température trop importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> <li>• Taux d'alimentation réduit <math>V_f</math>.</li> </ul>
Usure par ébréchure		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Taux d'alimentation <math>V_f</math> est trop élevé.</li> <li>• Manque de résistance des arêtes de coupe.</li> <li>• Manque de rigidité de la tige ou du support.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outil à ténacité élevée.</li> <li>• Taux d'alimentation <math>V_f</math> réduit.</li> <li>• Augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc.</li> <li>• Utilisez une tige de grande taille à forte rigidité.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> </ul>
Fracture du bec d'outil			
Usure par déformation Plastique		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</li> <li>• Profondeur de coupe et le taux d'alimentation sont trop importants.</li> <li>• Température de coupe est élevée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outil à haute résistance à l'usure.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> <li>• Diminuez la profondeur de passe et le taux d'alimentation <math>V_f</math>.</li> <li>• Qualité d'outil avec haute conductivité thermique.</li> <li>• Usinage lubrifié</li> </ul>

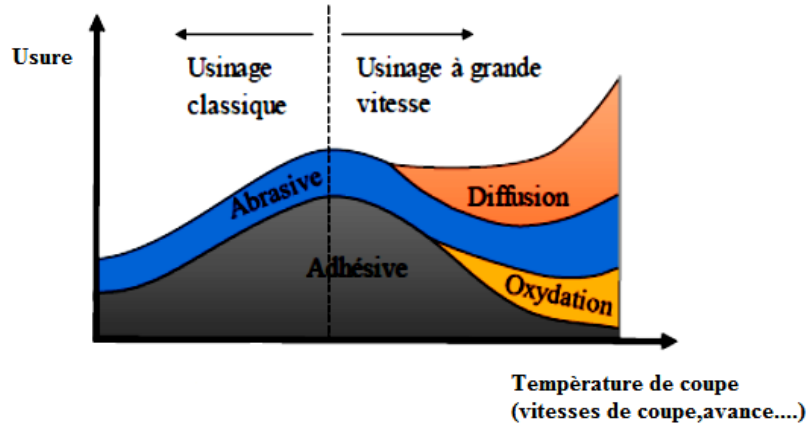
<p><b>Usure par soudure ou Arête rapportée</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> est faible.</li> <li>• Géométrie d'outil inadapté.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmenter la vitesse de coupe <math>V_c</math>.</li> <li>• Augmenter l'angle de coupe.</li> <li>• Qualité d'outil avec une faible affinité. (grade enduit, grade cermet)</li> </ul>
<p><b>Usure par fissuration en peigne</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluctuations thermique en coupe.</li> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Observé surtout en fraisage.</li> <li>• Arrosage intermittent.</li> <li>• Usinage intermittent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coupe à sec. (pour la coupe humide, inonder la pièce avec du fluide de coupe)</li> <li>• Qualité d'outil avec une ténacité élevée.</li> </ul>
<p><b>Usure en entaille</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface dure telle que surface non coupée, pièce refroidie et couche durcie par usinage.</li> <li>• Friction causée par des copeaux de forme irrégulière. (causée par de petites vibrations)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité d'outil avec une grande résistance à l'usure</li> <li>• Augmentez l'angle de coupe pour améliorer la netteté.</li> </ul>
<p><b>Usure par écaillage</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arête rapportée.</li> <li>• Mauvaise élimination du copeau.</li> <li>• Géométrie trop fragile.</li> <li>• Nuance d'outil est trop faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outil à ténacité élevée.</li> <li>• Augmentez l'angle de coupe <math>\beta</math></li> <li>• Augmentez le chanfrein du bec.</li> <li>• Réduire le taux d'alimentation <math>V_f</math> au début de la coupe.</li> </ul>

**II.4 Modes d'usure**

Il existe plusieurs modes d'usure qui peuvent se produire simultanément, usure mécanique (abrasion et adhésion), usure thermomécanique (fatigue), usure thermochimique (diffusion), usure électrochimique (oxydation).

La (Fig II-3) présente la dépendance de ces modes d'usure et des quantités relatives d'usure par rapport à la température de coupe. L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne

une diminution de l'usure par adhésion, tandis que tous les autres types d'usure augmentent. *Kato et Adachi [13]* ont résumé les interrelations de certains termes d'usure selon le type de contact, l'état de déformation et des principes d'enlèvement de matière.



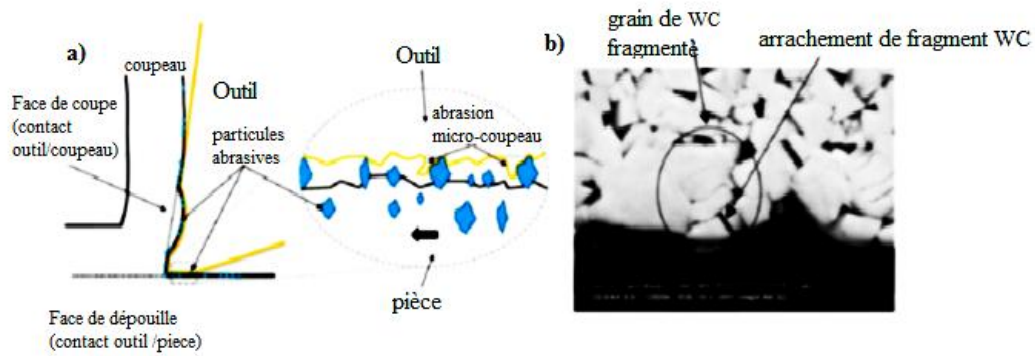
**Figure II-3.** Classification des modes d'usure en fonction des paramètres d'usinage, [8].

Dans ce qui suit, les trois principaux modes d'usure : abrasive, adhésive et diffusives sont analysés.

#### II.4.1 Usure par abrasion

De manière globale, ce mécanisme est causé par les particules abrasives dures piégées à l'interface de contact outil/pièce (Fig II-4(a)). L'abrasion est un phénomène mécanique conduisant à l'écaillage de la surface de l'outil et à la formation de débris d'usure (micro écaillage). En comparaison avec d'autres mécanismes d'usure, l'usure abrasive contribue à l'usure totale de l'outil entre 10 % [14] et 25 % [15].

Néanmoins, selon *Trent et al [5]* et *Gekonde et al [7]*, l'usure par abrasion est le mode d'usure dominant lorsque le contact à l'interface outil/copeau est de nature glissante. Selon *Rama lingam et al [16]*, la faible température (environ 400°C comparée à celle de la face de coupe ~1000°C) générée sur la face de dépouille favorise souvent la domination de l'usure par abrasion, et empêche la génération des autres modes d'usure activés thermiquement (adhésion et diffusion). Mais une température élevée sur la face de coupe peut induire la diffusion ou la migration des particules de liant (par exemple : le cobalt dans un outil en carbure de tungstène (Fig II-4 (b)), rendant le matériau de l'outil de coupe plus sensible à l'abrasion

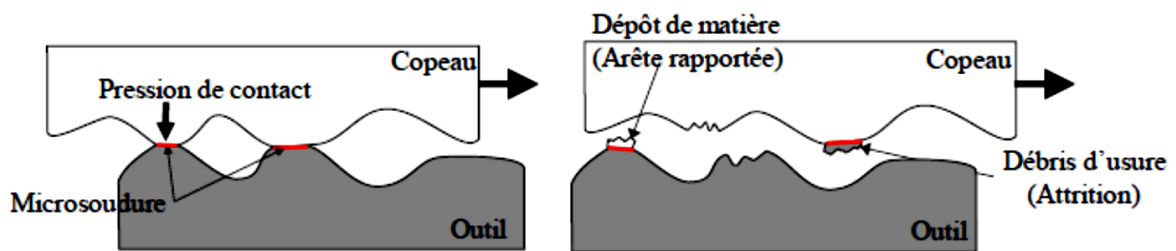


**Figure II-4.** (a) Illustration de l'usure par abrasion [17], (b) Particules abrasives

(Grains de WC) Piégés à l'interface de contact outil/pièce [18].

#### II.4.2 Usure par adhésion

L'usure par adhésion est un phénomène physico-chimique. Une forte adhérence entre l'outil et la pièce (ou copeau) entraîne le cisaillement des aspérités de contact lors du contact glissant (Fig II-5). La perte de matériau de l'outil se produit lorsque la résistance dans le matériau d'outil lui-même est inférieure à la résistance de l'interface entre l'outil et la pièce [9]. Ce phénomène est plus courant lorsque les températures et les pressions sont élevées, car cela crée des microsoudures entre les deux matériaux. Si la température augmente davantage, le matériau de la pièce peut perdre sa résistance mécanique et le cisaillement se produit dans le matériau de la pièce (arête rapportée).



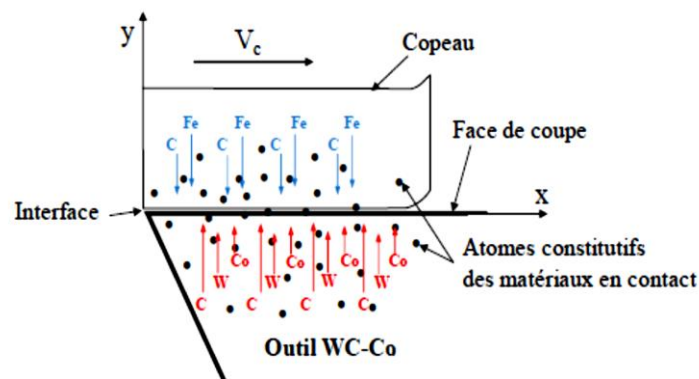
**Figure II-5.** Mode d'usure par adhésion.

Rabinowicz [19] a classé l'usure par adhésion en fonction d'un coefficient d'usure et de la taille des particules d'usure en trois régimes : le régime d'usure sévère, le régime d'usure modérée et le régime de brunissage. La taille des particules d'usure est entre 20 et 200  $\mu\text{m}$ . Une usure intense se produit lorsque des paires métalliques propres ou mal lubrifiées glissent l'une sur l'autre. Une usure modérée se produit lorsque la force d'adhérence entre deux surfaces est relativement plus faible, telle qu'une paire céramique-céramique. Dans ce cas, la taille des particules d'usure est comprise entre 2 et 20  $\mu\text{m}$ . Enfin, le régime de brunissage se

produit lorsque la résistance d'adhérence entre deux surfaces est extrêmement faible, comme dans des surfaces bien lubrifiées ou hautement incompatibles à faible chargement. Dans ce cas, on n'observe pas de particules d'usure importantes, et les surfaces prennent un aspect lustré. L'adhérence entre deux surfaces solides sera fortement réduite avec la présence d'air ou de liquide entre elles, [20].

### II.4.3 Usure par diffusion

Ce mécanisme d'usure est provoqué par une diffusion chimique des atomes de l'outil et ou de la pièce lors de l'usinage. L'usure par diffusion a été rapportée pour la première fois par *Loladze* [21], qui a montré qu'à vitesse de coupe conventionnelle, l'usure de l'outil est principalement dû à l'abrasion et à l'adhésion, mais à des vitesses plus élevées, elle est dominée par les processus de diffusion. L'usure par diffusion est un processus de transfert atomique entre deux surfaces dû aux gradients de concentration d'espèces chimiques et à la haute température dans ces zones. On peut assister par exemple à la diffusion du cobalt (Co) de l'outil en carbure de tungstène (WC-Co) vers la pièce (FeC), et simultanément à la diffusion du fer de la pièce vers l'outil (Fig II-6).



**Figure II-6.** Schématisation de la diffusion (outil en carbure de tungstène, copeau en acier), [22].

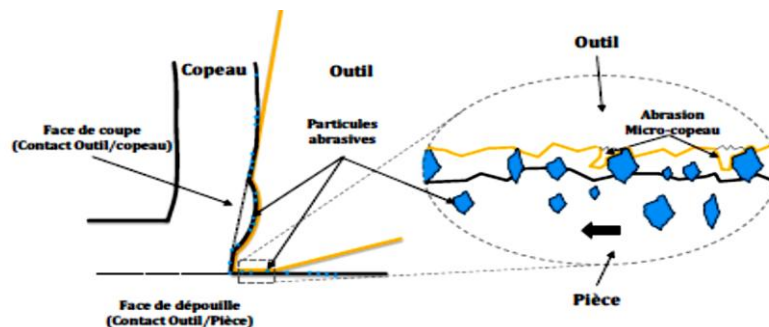
D'après *Vleugels* et *Van der Biest* [23], à des vitesses de coupe plus élevées, la contribution relative de l'usure chimique à l'usure totale augmente de façon exponentielle, puisque la solubilité<sup>1</sup> et la diffusivité dépendent fortement de la température. *Akasawa* et *al* [24] indiquent qu'avec l'usure par diffusion, l'acquisition et/ou la perte des éléments fondamentaux du matériau fragilisent la structure de l'outil.

A l'issue de cette fragilisation, l'usure par abrasion et par adhésion augmentent leur contribution dans la dégradation finale d'un outil. *Molinari et Nouari* [22] ont supposé que le gradient de concentration dans la direction d'avance est important par rapport au gradient dans la direction de coupe dans le copeau. L'effet de la convection du matériau due au glissement du copeau le long de l'outil avec la vitesse de coupe est pris en compte. Il a été supposé également que le procédé de diffusion est fortement contrôlé par la température d'interface outil/copeau.

Généralement, la localisation de l'usure par diffusion est sur la face de coupe, et la profondeur maximale du cratère correspond au point de température maximale selon *Molinari et Nouari* [22], alors que pour *Gekonde et al* [7] elle se trouve à l'endroit où la température de transformation de phase de l'acier usiné est atteinte.

## II.5 Description des particules abrasives

De manière globale, l'abrasion est un mode d'usure inévitable. Elle est définie comme étant une usure purement mécanique résultant d'un contact entre deux corps solides piégeant des particules abrasives. Dans le cadre de la coupe des métaux, plusieurs auteurs [25,15,27,28,29] ont identifié les particules abrasives à l'origine de l'usure par abrasion comme étant des inclusions non-métalliques initialement présentes dans le matériau usiné.



**Figure II-7.** Schématisation du mode d'usure par abrasion. La présence des impuretés non-métalliques est responsable de ce phénomène d'usure

En glissant le long des faces de contact de l'outil avec la pièce (face de coupe ou face de dépouille), ces particules arrachent de la matière à la surface de l'outil et forment des débris d'usure. D'après *Marinov*, les inclusions non-métalliques responsables de l'usure par abrasion ne sont pas exclusivement initialement présentes dans le matériau à usiner. Elles peuvent être endogènes ou exogènes aux matériaux usinés. Cependant, d'après cet auteur, les inclusions

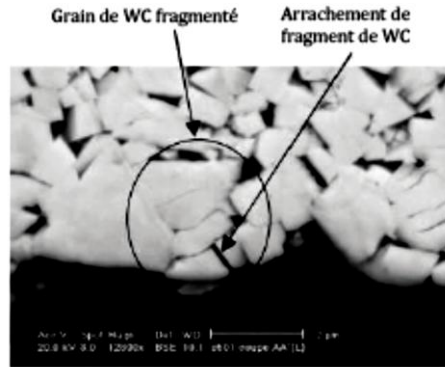
non-métalliques exogènes sont peu nombreuses et ne peuvent pas jouer un rôle significatif dans l'usure par abrasion. *Marinov* [15], dans ces recherches expérimentales sur l'abrasion, considère ainsi que les inclusions endogènes sont les seules responsables de ce mode d'usure.

Elles peuvent être des phosphures, des silicates, des carbures, des oxydes, etc. issues de l'étape de désoxydation ou d'oxydation lors de la fabrication de l'acier. *Kramer et al* [28] souligne que les inclusions endogènes douces (*phosphures, sulfures*) n'enlèvent pas directement de la matière, mais peuvent contribuer à l'usure abrasive par délaminage due aux mécanismes de fatigue et à l'apparition de microfissures autour de ces inclusions. Toutefois, des études récentes menées par *Van-Ende* [30] portant sur le processus de formation des inclusions non-métalliques pendant la fabrication d'acier, ont montré que les inclusions exogènes peuvent être candidats à devenir des particules abrasives.

En effet, il arrive parfois que des oxydes durs (*alumine ou spinelle d'alumine*) d'origine exogènes soient piégés dans l'acier pour agir par la suite comme des particules abrasives [30]. Les inclusions de types carbures, silicates et surtout oxydes possèdent une dureté très élevée supérieure ou égale à la dureté de l'outil de coupe et peuvent par conséquent participer à l'évolution de l'usure. A titre d'exemple, *Collins et al.* [31] ont étudié l'effet des inclusions non métalliques sur le comportement en fatigue de l'acier 42CrMo4, et ont relevé les micro-duretés de différentes inclusions trouvées initialement dans l'acier. Les auteurs ont ainsi évalué pour le composé  $Al_2O_3$  (candidat pour être une particule abrasive) une valeur de l'ordre de  $4500H_v$ . Une micro-dureté qui correspond ainsi à 10 fois celle de l'acier d'étude  $300H_v$  et à 3 fois celle d'un outil en carbure de tungstène  $1600H_v$ . Même pendant les opérations de coupe où les températures atteignent des valeurs très élevées, ces inclusions conservent leurs propriétés mécaniques [15]. En contact avec la face de coupe de l'outil, les inclusions non métalliques abrasives agissent comme des micros-outils de coupe. Par conséquent, un cratère ou des rayures peuvent apparaître. Un tel phénomène est appelé « *abrasion dure* » par *Larsen-Basse* [32].

Parfois des fragments de grains ou des amas de grains de la microstructure de l'outil peuvent être enlevés et agir à leur tour comme des particules abrasives. Cette constatation, faite initialement par *Akasawa et al.* [34], a été confirmée par *Marinov* [15] et *Trent et Wright*. [5]. Ces derniers ont prédit par ailleurs que les modes d'usure par diffusion et par adhésion peuvent aussi générer ces débris d'usure. Une telle observation a également été faite par *Kagnaya* [18] lors des essais de tribologie à grandes vitesses conduits à l'aide d'un pion en

carbure de tungstène frottant sur un acier *AISI 1045*. L'objectif de ces travaux était de mettre en évidence les modes d'usure que de tungstène et l'acier usiné. La (Fig II-8), tirée des travaux de *Kagnaya [18]* illustre la formation d'un fragment de grain de C suite à d'autres modes d'usure. Ce grain est susceptible d'être piégé dans les contacts (troisième corps) et d'agir comme une particule abrasive.



**Figure II-8.** Mise en évidence de la fragmentation des grains de WC constitutifs d'un outil de coupe *Kagnaya [18]* et susceptibles de se piéger dans les interfaces de contact et d'agir alors comme des particules abrasives.

En conclusion, le mode d'usure par abrasion est souvent le mode qui prédomine au niveau de la face de dépouille où la température est assez faible (300°C à 400°C) par rapport à la face de coupe (800 à 1000°C), *Ramalingam et al [27]*. Cela empêche alors à cet endroit l'apparition d'autres modes d'usure activés thermiquement comme l'adhésion et la diffusion. Ceci étant, selon *Ramalingam et al [27]* (avis partagé par *König et al [8]*), il arrive parfois que l'usure par abrasion soit significative sur la face de coupe où les températures élevées rendent certains matériaux d'outil de coupe plus sensibles à ce type d'usure par diminution de leur dureté et par affaiblissement de la partie liante comme le cobalt dans le cas d'outils en carbure de tungstène, *Kagnaya [18]*.

## II.6 Loi d'usure

Le modèle de Taylor [36] (Eq. (II-2)) Est le modèle empirique le plus utilisé dans les applications industrielles (*ISO 3685* pour le tournage et *ISO 8688* pour le fraisage). Il peut prédire la durée de vie de l'outil en fonction de différents paramètres de coupe une fois déterminés les coefficients  $n$  et  $C$  (paramètres constants du matériau usé et dépendant du couple outil/matière respectivement).

Cependant, il ne peut pas présenter une quantité réelle d'usure (volume usé) pendant un temps de coupe définie :

$$T = Cv^n \quad (\text{II-2})$$

L'exposant  $n$  dépend : de la profondeur de passe, avance, matériau usiné et matériau constituant de l'outil et il a une valeur :  $-10 < n < -1$ . (Tableau II-2)

**Tableau II-2.** Valeurs moyenne de l'exposant  $n$  de la loi de Taylor.

Matériau d'outil	ARS / HSS	Carbure	Carbure revêtu	Céramique
N	-6	-4	-3	-2

La constante  $Cv$  dépend essentiellement du matériau usiné et des conditions de coupe. Sa valeur est très variable :  $10^4 < Cv < 10^{14}$ .

*Takeyama* et *Murata* [37] ont suggéré que l'usure globale de l'outil peut être décrite comme un résultat combiné des mécanismes activés mécaniquement et thermiquement sur la surface de l'outil. Ces auteurs ont conclu que le mécanisme d'usure abrasive est indépendant de la température et que sa quantité est uniquement proportionnelle à la distance de glissement, alors que le taux d'usure physico-chimique dépend en grande partie de la température de l'interface. Ils ont ensuite formulé le taux d'usure totale de l'outil due aux effets combinés de l'abrasion et des mécanismes physico-chimiques comme suit :

$$\frac{dw}{dt} = AV_s + B \exp\left(-\frac{E}{RT_{\text{int}}}\right) \quad (\text{II-3})$$

Où  $V_s$  est la vitesse de glissement,  $T_{\text{int}}$  la température de l'interface de l'outil et  $E$  l'énergie d'activation des atomes qui diffusent.  $A$  et  $B$  sont les constantes du modèle et  $R$  la constante des gaz parfaits. *Pálmai* [38] a suggéré que le comportement d'usure des outils non revêtus en carbure cémenté serait estimé plus précisément en tenant compte de l'effet de la longueur de coupe pour les processus d'usure mécaniquement induits et thermiquement activés :

$$\frac{dw}{dt} = AV_s + BV_s \exp\left(-\frac{E}{RT_{\text{int}}}\right) \quad (\text{II-4})$$

Les constantes  $A$  et  $B$  reflètent indirectement les effets de la dureté du matériau d'outil ainsi que de la pression de contact sur le taux d'usure globale. *Usui* et *al* [39] ont étendu le modèle d'usure adhésif pour inclure les effets de la pression de contact  $\sigma_n$ , de la vitesse de glissement et de la température à l'interface sur le taux d'usure de l'outil :

$$\frac{dw}{dt} = A\sigma_n V_s \exp\left(-\frac{B}{T_{int}}\right) \quad (\text{II-5})$$

Les auteurs ont ensuite conclu que ce modèle peut simuler le comportement d'usure des outils en carbure cémenté non revêtus dans différentes gammes de température. Des expériences d'usinage ont été effectuées sur des barres en acier fritté contenant des particules d'oxyde d'aluminium.

Les résultats de comparaison indiquent que le modèle proposé peut bien représenter les effets d'abrasion en utilisant des ensembles appropriés de paramètres  $A$  et  $B$  dans l'équation (II-5), [39]. Ce modèle a été utilisé ensuite par plusieurs auteurs [40,41] pour simuler l'usure des outils revêtus et non revêtus dans l'usinage des aciers, Ti-6Al-4V et des superalliages à base de Nickel « Ni » dans une large gamme de conditions de coupe. L'équation (II-5) peut encore être simplifiée en négligeant les effets de la pression de contact sur la vitesse d'usure globale, en supposant que la pression de contact sur la surface d'usure en dépouille reste constante avec l'évolution de l'usure :

$$\frac{dw}{dt} = AV_s \exp\left(-\frac{B}{T_{int}}\right) \quad (\text{II-6})$$

Cette hypothèse a été justifiée dans certaines études expérimentales [42,43] qui ont montré que les efforts de coupe et d'avance augmentent linéairement avec la largeur de la zone d'usure.

## II.7 Conclusion

Nous avons résumé dans ce chapitre les mécanismes de formation de l'usure et les lois de prédiction lors d'opérations d'usinage. Ces connaissances permettent de trouver des solutions pour ralentir l'usure. La satisfaction de ce besoin ne sera réalisée qu'à l'aide d'un choix judicieux des paramètres de coupe. Toutefois, les techniciens ou opérateurs vont choisir ces paramètres, qui interviennent directement sur le temps d'usinage de la pièce, donc sur son prix de revient, à partir des abaques et tableaux réalisés par l'expérimentation, ce qui conduit dans la plupart des cas à des résultats approximatifs.

La présence d' affinité chimique entre les atomes qui constituent les surfaces antagonistes en contact, cause le phénomène de solubilité

**II.8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Bouziane. A, Boulanouar. L, Azizi. M.W, Keblouti. O, « *étude de l'effet de la vitesse de coupe sur l'usure des outils de coupe en carbure métallique revêtu et non revêtu.* ». Université Constantine, Algérie (Octobre 30-31, 2016).
- [2] Rmili. W, Serra. R, Ouahabi. A, Gontier. C, « *surveillance de l'usure des outils de coupe par analyse vibratoire* ». Université François-Rabelais, Tours – France (2006).
- [3] Mahfoudi. F, « *étude de l'influence de la machine-outil sur les paramètres technologiques en particulier lors de l'usinage des matériaux durs* ». Université Badji Mokhtar – Annaba année (2010).
- [4] T. lusty. J, « *Manufacturing processes and equipment* ». Prentice Hall (2000).
- [5] Trent. EM, Wright. PK. « *Metal cutting* ». Butterworth-Heinemann (2000).
- [6] Grzesik. W, « *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications* ». Elsevier;(2008).
- [7] Gekonde. HO, Subramanian SV. « Tribology of tool–chip interface and tool wear mechanisms. Surf Coat Technol (2002); 149:151–60.
- [8] Xie. L, « *Estimation of two-dimension tool wear based on finite element method* ». Wbk, Inst. für Produktions technik, (2004).
- [9] Sandvik. C, « *performance testing, "Wear guide,"* ». (Sandvik Coromant internal material). Sandvik Coromant Intern Mater Stockh Västberga n.d.
- [10] Thangavel. P, Selladurai. V, Shanmugam. R, « *Application of response surface methodology for predicting flank wear in turning operation* ». Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf (2006); 220:997– 1003.
- [11] Altintas. Y, « *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design* ». Cambridge université presse ; (2012).
- [12] Hamdi Ben Abdelali. M, « *caractérisation et modélisation des mécanismes tribologiques aux interfaces outils-pièces-copeaux en usinage à sec de l'acier c45* ». Ecole Doctorale de Matériaux de Lyon, (19 Janvier 2013).
- [13] Kato. K, Adachi. K, « *Wear mechanisms* ». Mod Tribol Handb (2001); 1:273–300.
- [14] Ho CF, Chen NNS, « *Prediction of wear of carbide cutting tools* ». Int J Prod Res (1977); 15:277 90.
- [15] Marinov. V, « *Experimental study on the abrasive wear in metal cutting* ». Wear (1996); 197:242–7.

- [16] Ramalingam. S, Wright PK, « *Abrasive Wear in Machining: Experiments with Materials of Controlled Microstructure* ». J Eng Mater Technol (1981) ;103 :151–6. Doi 0.1115/1.3224987.
- [17] Halila. F, « *Modélisation analytique et caractérisation expérimentale de l'usure par abrasion des outils de coupe* ». Université de Lorraine, (2015).
- [18] Kagnaya. T, Boher. C, Lambert. L, Lazard. M, Cutard. T, « *Microstructural analysis of wear micromechanisms of WC–6Co cutting tools during high speed dry machining* ». Int J Refract Met Hard Mater (2014); 42:151–62.
- [19] Rabinowicz. E, « *The least wear* ». Wear 1984; 100:533–41.
- [20] Rabinowicz. E, « *Friction and wear properties of rhenium* ». Wear (1967); 10:313–8.
- [21] Loladze. TN, « *Adhesion and diffusion wear in metal cutting* ». J Inst Eng India (1962); 43:108–41.
- [22] Nouari. M, Molinari. A, « *Experimental verification of a diffusion tool wear model using a 42CrMo4 steel with an uncoated cemented tungsten carbide at various cutting speeds* ». Wear (2005); 259:1151–9.
- [23] Vleugels. J, Van der Biest. O, « *Chemical interaction between SiAlON ceramics and iron-based alloys* ». Key Eng. Mater., vol. 138, Trans Tech Publ; (1998), p. 127–76.
- [24] Akasawa T, Hashiguti Y, Suzuki K. « *Crater wear mechanism of WC-Co tools at high cutting speeds* ». Wear (1980); 65:141–50.
- [25] Childs. T.H, Maekawa. K, Obikawa. T, Yamane. Y, « *Metal Machining-Theory and Application* ». Arnold, (2000) 177-198,265.
- [26] Ramalingam. S, Wright. P.K, « *Abrasive Wear in Machining: Experiments with Materials of Controlled Microstructure* », Journal of Engineering Materials and Technology, 103 (1981) 151-156.
- [27] Kramer. B.M, von Turkovich. B.F, A « *Comprehensive Tool Wear Model* », CIRP Annals - Manufacturing Technology, 35 (1986) 67-70.
- [28] François. L, « *Endommagement des outils de coupe* », Techniques de l'ingénieur Travail des matériaux, mise en forme et tribologie, (1993).
- [29] Van Ende. M.A, « *Formation and morphology of non-metallic inclusions in aluminum killed steels* », UCL, (2010).
- [30] Collins. S.R, Michal. G.M, « *Effects of processing on the transverse fatigue properties of low-sulfur AISI 4140 steel, Metallurgical Transactions A* », 24 (1993) 2701-2708.
- [31] Larsen-Basse. J, « *Effect of composition, microstructure, and service conditions on the wear of cemented carbides* », JOM, 35 (1983) 35-42.

- [32] Akasawa. T, Hashiguti. Y, K. Suzuki, « *Crater wear mechanism of wc-co tools at high cutting speeds* », *Wear*, 65 (1980) 141-150.
- [33] Taylor. FW, « *On the art of cutting metals* ». New York, The American Society of Mechanical Engineers, (1907); 1907.
- [34] Takeyama H, Murata R, « *Basic investigation of tool wear* ». *J Manuf Sci Eng* (1963); 85:33–7.
- [35] Pálmai. Z, « *Proposal for a new theoretical model of the cutting tool's flank wear* ». *Wear* (2013); 303:437–45.
- [36] Usui. E, Shirakashi. T, Kitagawa. T, « *Analytical prediction of cutting tool wear* ». *Wear* (1984); 100:129–51.
- [37] Özel. T, Karpat. Y, Srivastava. A, « *Hard turning with variable micro-geometry PcBN tools* ». *CIRP Ann-Manuf Technol* (2008); 57:73–6.
- [38] Hosseinkhani. K, Ng E. A « *combined empirical and numerical approach for tool wear prediction in machining* ». *Procedia CIRP* (2015); 31:304–9.
- [39] Connolly. R, Rubenstein. C, « *The mechanics of continuous chip formation in orthogonal cutting* ». *Int J Mach Tool des Res* (1968); 8:159–87.
- [40] Kobayashi. S, Thomsen. EG, « *The role of friction in metal cutting* », ASME; 1959.

**CHAPITRE III**

**CONCEPTION ET SIMULATION**

### III.1 Introduction

L'avenir est à l'outil numérique et à la réalité virtuelle ; la simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeurs automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs [1].

La solution d'analyse par éléments finis optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise en utilisant les hypothèses de la mécanique de la rupture en élasticité et de la dynamique. Ainsi elle simule et améliore les performances.

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...). Et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit. Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O.

Se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...). L'étude ne sera validée qu'à partir d'essais physiques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation (crash test...). D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à *ABAQUS* sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle.

### III.2 Généralité sur le code de calcul ABAQUS

*ABAQUS* est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires [2].

Les codes éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception et à l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement

développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes. Si l'utilisation de la méthode se démocratise de par la simplicité croissante de mise en œuvre, la fiabilité des algorithmes et la robustesse de la méthode, il reste néanmoins des questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par éléments finis dans de bonnes conditions : formaliser les non-dits et les réflexions qui justifient les choix explicites ou implicites de son analyse du problème évaluer la confiance qu'il accorde aux résultats produits analyser les conséquences de ces résultats par rapport aux objectifs visés. L'objectif de cette partie est de présenter les principes de base de cette méthode en insistant sur l'enchaînement des tâches (démarche et hypothèses associées) qui assurent la cohérence du processus de calcul. Ces connaissances vous seront utiles pour maîtriser les deux principales difficultés de mise au point d'un modèle numérique :

- Problèmes préliminaires à la phase de calcul ;
- Problèmes liés à l'exploitation des résultats et le retour à la conception.

Il ne faut pas perdre de vue que l'analyse des résultats nécessite une bonne compréhension des différentes étapes mathématiques utilisées lors de l'approximation, pour pouvoir estimer l'erreur du modèle numérique par rapport à la solution exacte du problème mathématique. Sans oublier que le modèle numérique ne peut fournir que de résultats relatifs aux informations contenues dans le modèle mathématique qui découle des hypothèses de modélisation. Nous nous limiterons à la présentation de modèles élémentaires utilisés dans le cadre des théories linéaires. Bien que simples ces modèles permettent déjà de traiter un grand nombre d'applications liées aux problèmes de l'ingénieur. Du point de vue pédagogique, ils sont suffisamment complexes pour mettre en avant les difficultés de mise en œuvre de la méthode.

L'idée fondamentale de cette méthode est de discrétiser le problème en décomposant le domaine matériel à étudier en éléments de forme géométrique simple. Sur chacun de ces éléments il sera plus simple de définir une approximation nous permettant d'appliquer les méthodes présentées dans la première partie de ce cours. Il ne reste alors qu'à assembler les formes matricielles élémentaires pour obtenir les équations relatives à la structure à étudier. C'est sous cette forme pragmatique qu'elle est utilisée par les ingénieurs, et que nous allons maintenant l'aborder [3].

### III.3 Produits ABAQUS

ABAQUS compose de trois produits :

- ABAQUS/Standard ;
- ABAQUS/Explicit ;
- ABAQUS/CAE (Fig III-1).

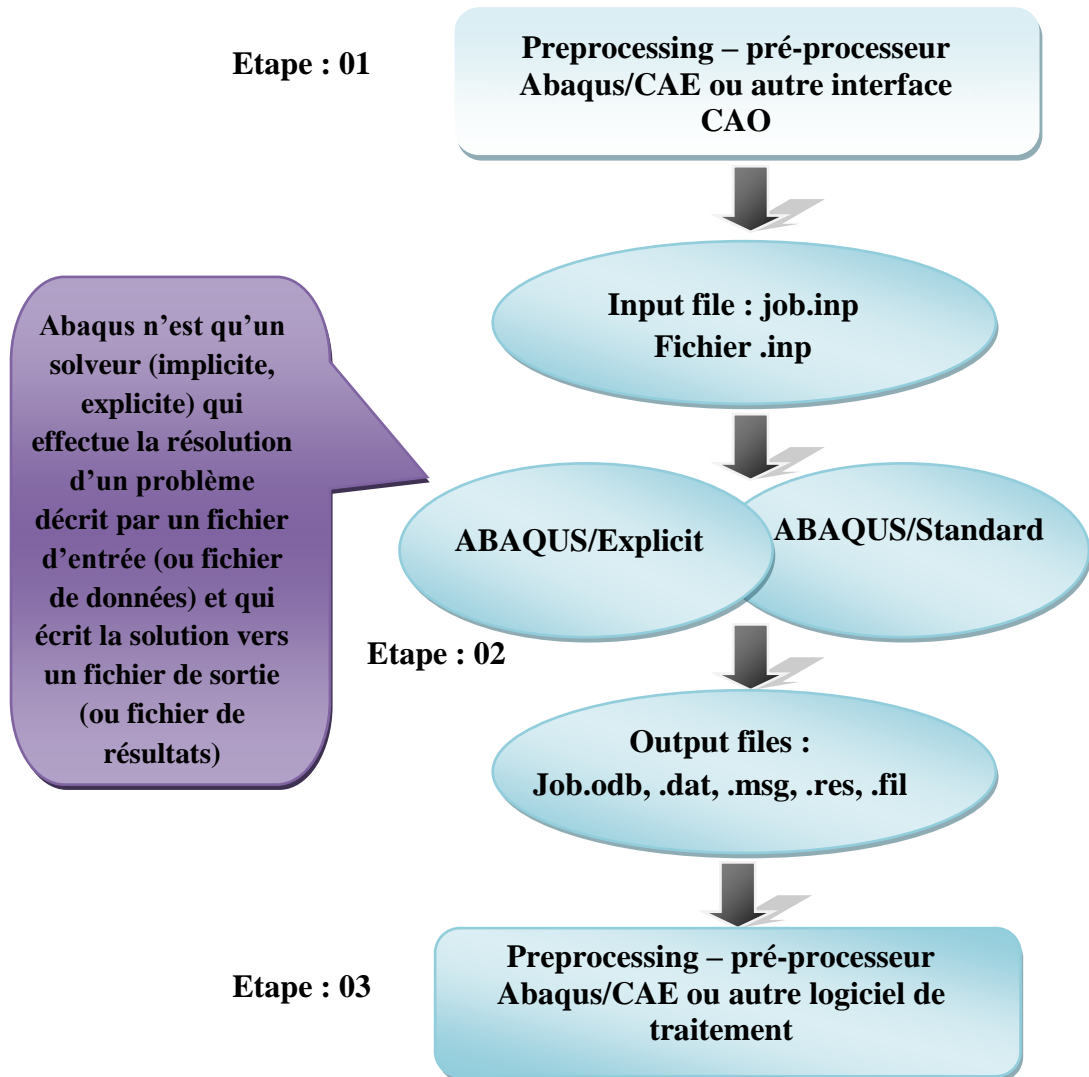


Figure III-1. Structure d'une analyse sous Abaqus [4].

➤ **ABAQUS/Standard** : Est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite [4]. Résolution basée sur l'algorithme de *Newton-Raphson* et la méthode de *Riks* Problèmes linéaires et non linéaires Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.

➤ **ABAQUS/Explicit** : Un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires. Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle) Problème transitoire et dynamique des structures Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps.

➤ **ABAQUS/CAE** : Constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et optionnels, spécifiques à certaines applications. *ABAQUS* fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

### III.4 Les différents fichiers pour la simulation sous *Abaqus*

#### a) Fichier d'entrée (Input file)

**Extension. inp** : contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée Avec un éditeur (fichier texte) ou programme en connaissant les divers mots clés de commande *Abaqus* Avec l'interface graphique *Abaqus/CAE* Avec un logiciel annexe (*I-DEAS*, *NASTRAN*, ...)

#### b) Fichier de résultats (output file)

**Extension. Odb** : Contient les contours et courbes de résultats

#### c) Autres fichiers créés par *Abaqus* lors de la simulation

- Fichier .com : exécutable de vos calculs ;
- Fichier .res : fichier binaire de reprise ;
- Fichier .dat : liste des résultats, résumé de votre modélisation ;
- Fichier .msg : résumé du déroulement du calcul en cours, message d'erreur ;
- Fichier. Fil : fichier binaire des résultats ;
- Fichier .log: fichier de procédure ;
- Fichier. Sta : Fichier statistique ... ets.

### III.5 Organisation de l'interface *Abaqus* CAE (complète *Abaqus* environnement)

Il est important de savoir que le module *CAE* (Fig III-2) que vous allez utiliser pour créer votre jeu de données est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la

mise en données de problèmes relativement classiques. Donc pas toutes les commandes utilisables dans Abaqus et fait souvent le choix de paramètres par défaut [5].

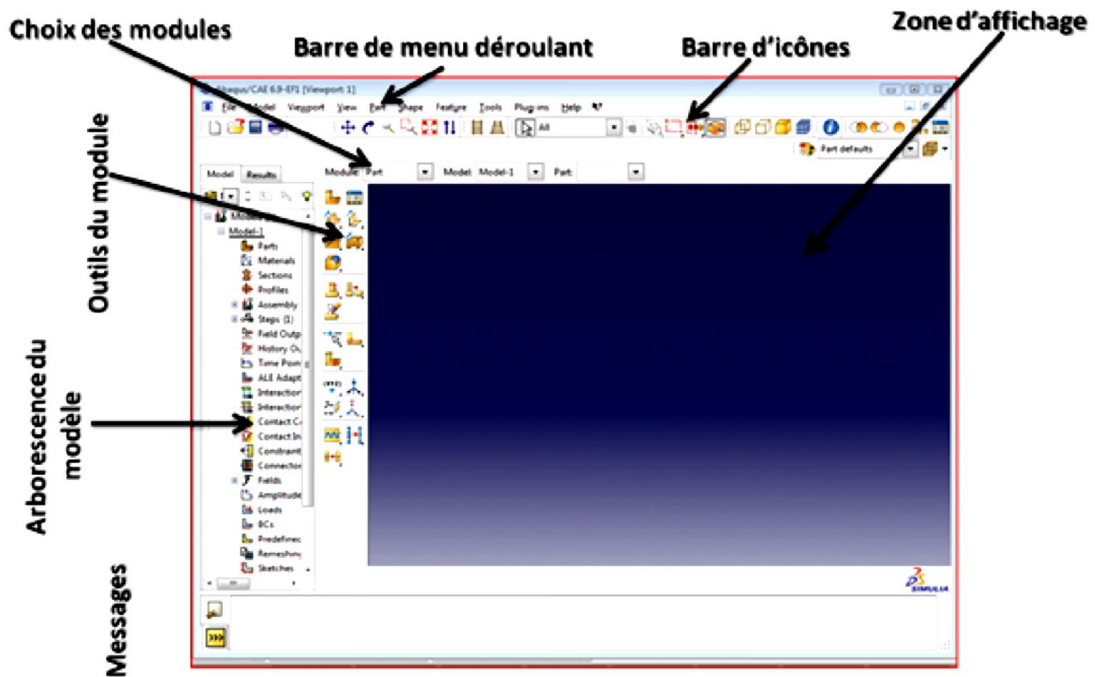


Figure III-2. Organisation d'abaqus [5].

➤ **Les modules** : La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules, (Fig III-3) [6].

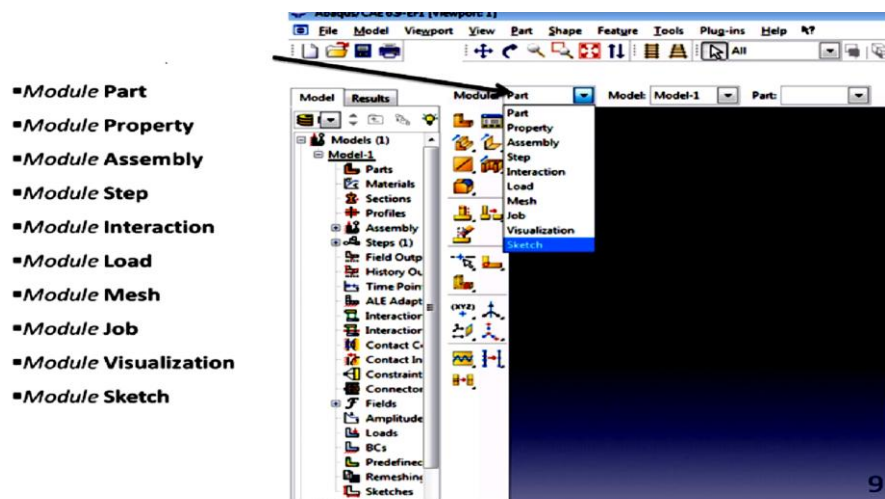


Figure III-3. Réalisation de la mise en données d'un problème.

a) **Module part** : ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle. (Fig III-4 et Fig III-5) Elles comprennent à la fois les parties déformables et les parties rigides. Pour créer

les créer, il faut utiliser l'icône de création en haut à gauche. Il ne vous reste plus qu'à sélectionner convenablement :

- L'espace de modélisation : 3D par exemple
- Le type d'entité à générer : déformable
- La forme de l'entité.

Dans tous les cas vous passez dans un autre environnement de type CAO où vous dessinez vos pièces. Dans le cas d'un solide rigide, il est nécessaire de définir un point de référence. C'est en fait en ce point que sont définis les degrés de liberté du solide sur lesquels vous imposerez des conditions aux limites par la suite. Ceci se fait dans le menu Tools, grâce à la commande Référence point.

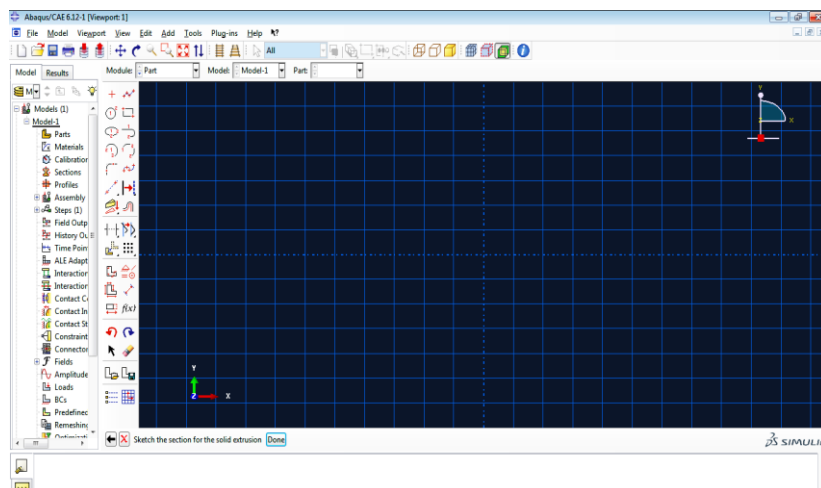
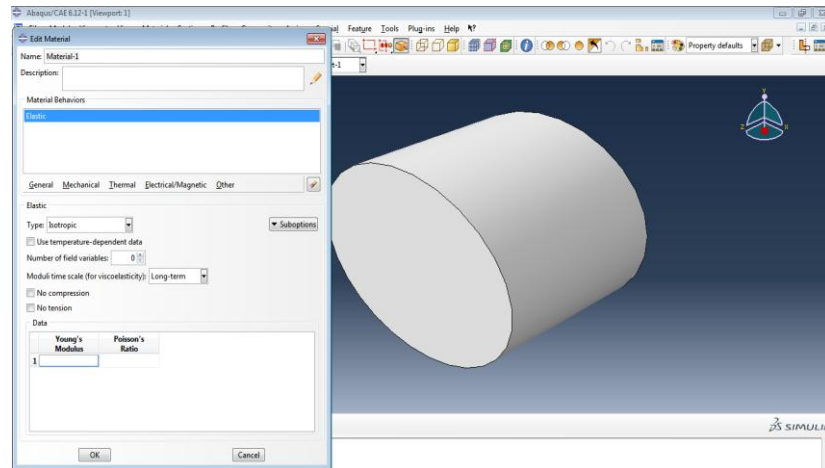


Figure III-4. Module part.

**b) Module Property :** On y définit les propriétés du ou des matériaux (Fig III-5) (des parties déformables du modèle) et la masse des corps rigides si nécessaire. Dans le cas présent, vous avez à définir des propriétés élastiques et/ou plastiques. Pour créer un matériau, il suffit de cliquer sur l'icône en haut à gauche. Il vaut mieux ensuite donner un nom spécifique à chacun de vos matériaux ce qui permet éventuellement la création d'une base de données, il vous reste à définir :

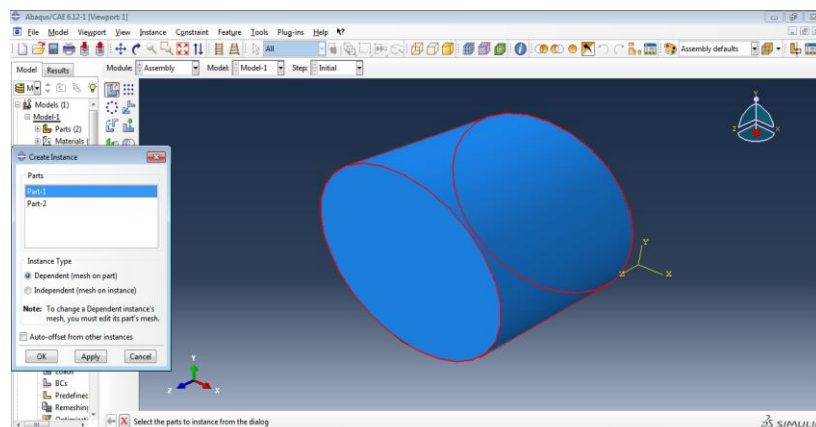
- Les propriétés élastiques via Mechanical, Elasticity, Elastic (module d'Young et le coefficient de Poisson pour un matériau isotrope).
- Les propriétés plastiques via Mechanical, Plasticity, Plastic. (Sous l'hypothèse d'un écrouissage isotrope, la courbe d'écrouissage est entrée sous la forme : limite d'élasticité/déformation plastique. Dans cette courbe, la contrainte est de type Cauchy ( $F$

divisée par la surface actuelle) et la déformation est logarithmique ( $\ln(L/L_0)$ ). Il faut ensuite affecter les propriétés matériau à une entité du maillage : pour cela il est nécessaire de créer tout d'abord une section avec l'icône en forme de poutre. Vous aurez à faire référence à un matériau et il ne vous restera plus qu'à Donner une valeur à l'épaisseur.



**Figure III-5.** Module Property.

**c) Module Assembly :** Assembly ce module, il s'agit de créer une instance (Fig III-6) à partir des entités que vous avez définies dans le module Part. Ces instances seront celles que vous manipulerez par la suite dans le modèle. Dans le cas général, à partir de l'icône en haut à gauche, pour créer une instance vous sélectionnez tous les éléments créés dans Part. Vous pouvez le cas échéant faire subir des mouvements d'ensemble à ces instances pour les repositionner dans l'espace.



**Figure III-6.** Module Assembly.

**d) Module Step :** C'est ici que vous choisirez, (Fig III-7) dans le cas d'études de crash ou d'impact, le module « Dynamic explicit ». Vous remarquerez au passage les nombreuses autres possibilités qui sont offertes par ce code de calcul.

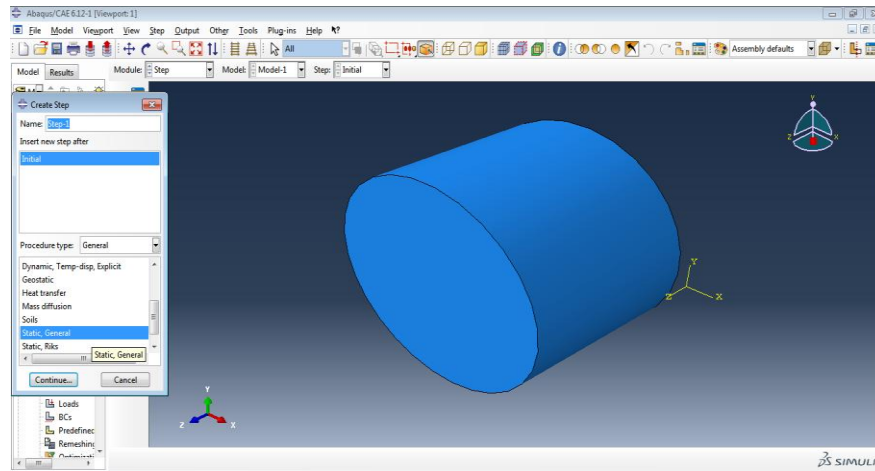


Figure III-7. Module Step.

**e) Module Interaction :** Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante (Fig III-8).

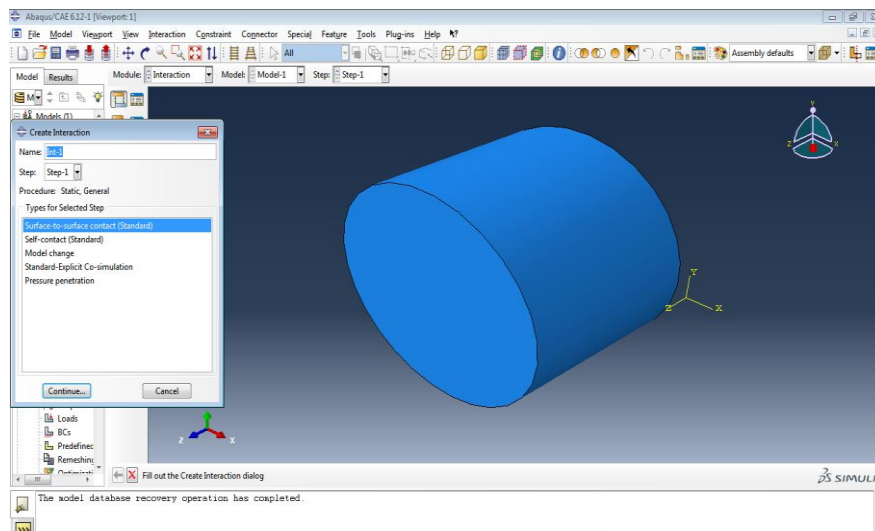
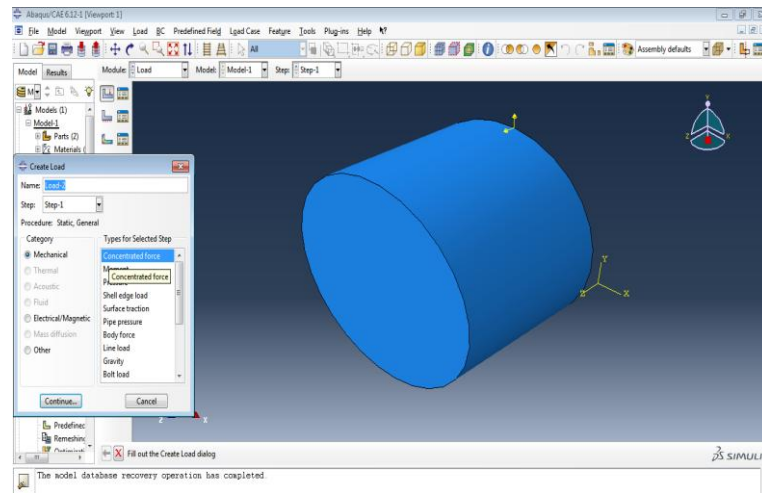


Figure III-8. Module Interaction.

**f) Module Load :** Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et Champs. (Fig III-9) Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step



**Figure III-9.** Module Load.

**g) Module Mesh :** Mesh contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

**h) Module Job :** Le « lancement » du calcul est classique. Après avoir lancé le calcul, vous pouvez suivre l'évolution du procès en cliquant sur Monitor : vous pouvez ainsi avoir en temps réel l'évolution des incréments de chargement et apprécier la convergence des calculs.

**i) Module visualisation :** Visualisation Est un module qui affiche tous les résultats de la pièce soit contrainte ou déformation.

**j) Module sketch :** Sketch permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

### III.6 L'arbre du modèle

L'arbre donne une description visuelle de la hiérarchie des objets du modèle. Tous les objets sont indiqués par de petites icônes avec en parenthèses le nombre de ces objets. L'ordre de l'arbre reflète l'ordre classique d'élaboration du modèle. A partir de cet arbre il est possible de retrouver la plupart des fonctionnalités de la barre de menu principale.

Par exemple, double cliquer sur Part permet de créer une nouvelle Part comme sélectionner Part -> Create dans la barre de menu.

### III.7 Les éléments dans ABAQUS

- Un très large choix d'éléments (plus de 100), (Fig III-10) ;
- Chaque élément est caractérisé par : famille, ddl, nombre de nœuds, intégration ;

➤ Possibilités de programmer de nouveaux éléments (en *FORTRAN*, sur *ABAQUS/Standard*) [7].

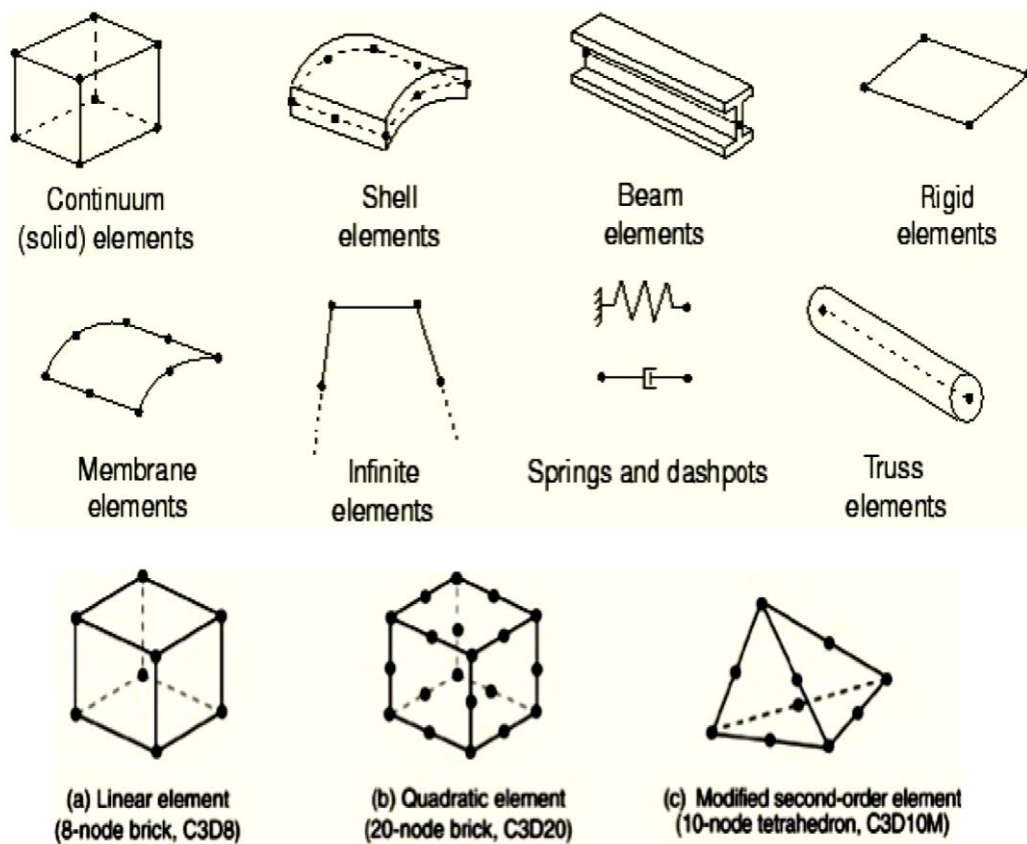


Figure III-10. Quelque élément dans Abaqus [7].

### III.8 Hypothèses générale de la modélisation

Dans le contexte de notre travail, l'échantillon de structure est essentiellement composé d'une éprouvette (outil), le matériau en présence (outil) est l'acier. La simulation associe : une représentation géométrique, un modèle mécanique, un modèle de comportement matériel et une représentation des actions extérieurs (conditions aux limites). Dans ce travail on effectue une étude sur la distribution des contraintes sur l'arrête coupante de l'outil coudé à charioter (dimensions données).

III.8.1 Représentation géométrique

Tableau III-1. Montre les différentes caractéristiques géométriques des outils coudés à charioter.

Section de tige		L	l	ll	M	B	R	R1	r	c
B	H									
10	16	100	8	35	6	8	8	3	0.5	0.5
12			10		7	10	10	4		1
	20	120	45							
16	16	100	12	35	9	14	14	5	1	1.5
	20	120		45						
	25			55						
20	20	150	15	55	12	18	18	6	1	1.5
	30									

En utilisant un outil de coupe (outil coudé à charioter) Q/JR D104-64 en acier rapide .sa géométrie est représentée sur la (Fig III-11).

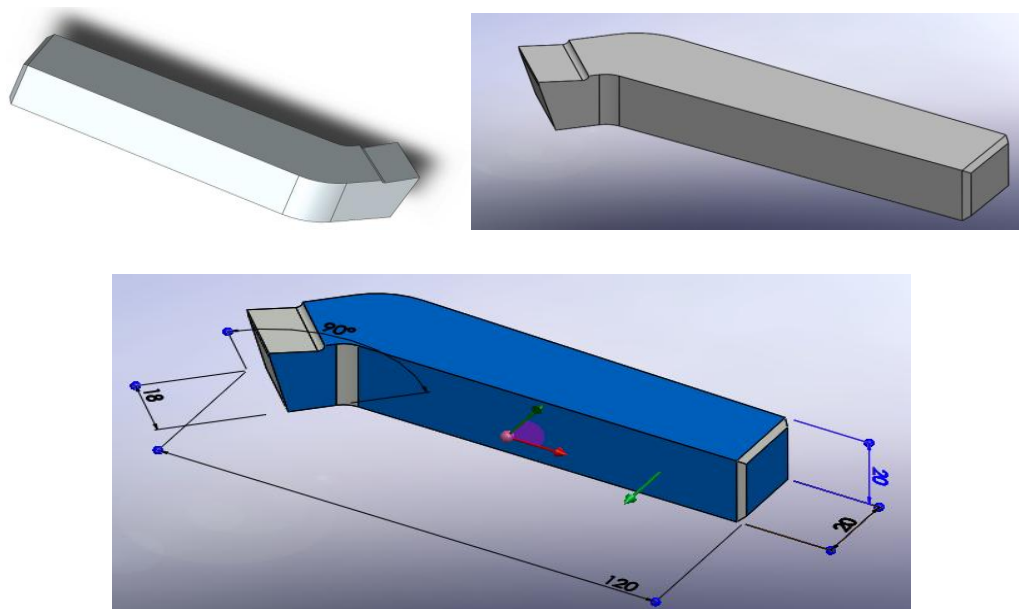


Figure III-11. Représentation géométrique de l'outil.

### III.8.2 Caractéristique de matériau

Dans ce travail on effectue une analyse mécanique d'un outil coudé à charioter en acier rapide.

- Les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé sont :

**Tableau III-2.** Caractéristique de matériau.

Limite d'élasticité $R_{P0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Résistance à la traction $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Allongement à la rupture A(%)	Module d'élasticité E(GPa)	Coefficient de poisson $\nu$ (-)	Densité (kg/mm <sup>2</sup> )
650	900-1100	12	202	0.3	7.8

- La composition chimique :

**Tableau III-3.** Composition chimique du matériau.

DESIGNATION COURANTE	DESIGNATION		COMPOSITION					
	AISI	AFNOR	C	Cr	W	Mo	V	Co
<b>HSS</b> <b>Acier super rapide</b>	M2	Z90WDCV6.5.4.2	0.90	0.4	6.0	5.0	2.0	
<b>HSS.E Co 5</b> <b>Acier super rapide</b> <b>À 5% de cobalt</b>	M35	Z90WDCV6.5.5.4.2	0.92	4.2	6.4	5.0	1.8	4.8
<b>HSS.E Co 8</b> <b>Acier super rapide</b> <b>À 8% de cobalt</b> <b>Désignation E</b> <b>LECLERC ELO</b>	M42	Z11ODKCWV9.8.4.2.1	1.08	3.9	1.5	5.0	1.2	8.0
<b>ASP 30 ou</b> <b>Co8+Va3</b> <b>Acier super rapide</b> <b>*FRITTE*</b>		Z13OKCWCV9.6.5.4.3	1.28	4.20	6.0	4.5	3.1	8.5
<b>HSS.E</b> <b>Acier super rapide</b> <b>Sur carburé au</b> <b>vanadium</b>	M 4	Z13OWDCV6.5.4.4	1.30	4.3	6.0	4.5	3.9	

### III.9 Étude numérique

#### III.9.1 Conditions aux limites

##### a) blocage

Les conditions aux limites cinématique considèrent l'encastrement parfait du corps de l'outil (Figure III-12) les conditions sont notamment le blocage en rotation de bord autour des 3 axes et le blocage en translation suivant les 3 axes.

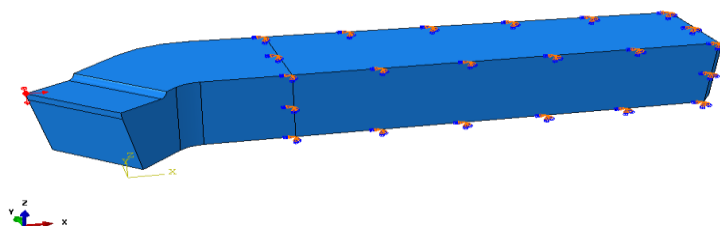


Figure III-12. Le blocage en rotation et en translation.

##### b) charge appliqué

Les efforts de coupe : Acier doux

$$F_C = K * S * R_r \quad \text{(III-1)}$$

$$S = a_p * f \quad \text{(III-2)}$$

Si :  $R_r=500$  ;  $k=2.5$  pour les aciers

Si :  $f=0.15$  ;  $a=0.9$

$$S = 0.15 * 0.90$$

$$S=0.135mm^2$$

$$F_C = 2.5 * 0.135 * 500$$

$$F_C=1687.5N$$

Les efforts de coupe : acier demi dur

Si :  $R_r=700$

Si :  $f=0.3$  ;  $a=2$

$$F_C = 2.5 * 0.6 * 700$$

$$F_C=10500N$$

Les efforts de coupe : acier dur

Si :  $R_r=1000$   $f=0.6$  ;  $a=6$

$$F_c = 2.5 * 3.6 * 1000$$

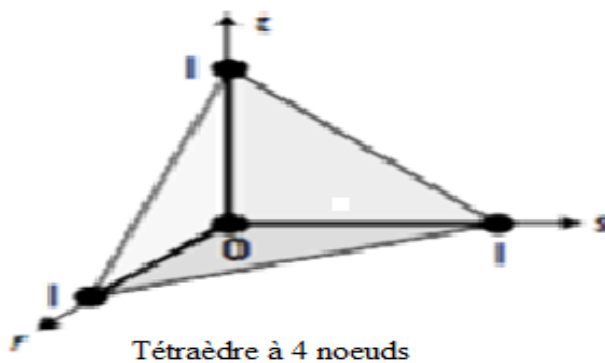
$F_c=90000N$

**Tableau III-4.** Les différents paramètres de coupe en fonction de la matière de l'outil en usinage.

<b>Tournant</b>					
<b>Matériel d'exploitation</b>	<b>Rr</b>	<b>Vitesse de coupe Vc</b>		<b>L'avance f</b>	<b>Profondeur de passe « a »</b>
		<b>Un outil de coupe en carbure</b>	<b>Outil en acier rapide</b>		
<b>Acier doux</b>	<b>&lt;400</b>	<b>60à65</b>	<b>270à280</b>	<b>0.1à0.2</b>	<b>0.2à1</b>
		<b>45à60</b>	<b>180à270</b>	<b>0.2à0.4</b>	<b>1à4</b>
		<b>30à45</b>	<b>130à180</b>	<b>0.4à0.8</b>	<b>4à8</b>
<b>Acier demi dur</b>	<b>600à750</b>	<b>45à50</b>	<b>190à200</b>	<b>0.1à0.2</b>	<b>0.2à1</b>
		<b>30à46</b>	<b>130à190</b>	<b>0.2à0.4</b>	<b>1à4</b>
		<b>25à30</b>	<b>90à130</b>	<b>0.4à0.8</b>	<b>4à8</b>
<b>Acier dur</b>	<b>900à1100</b>	<b>22à28</b>	<b>160à170</b>	<b>0.1à0.2</b>	<b>0.2à1</b>
		<b>17à22</b>	<b>115à160</b>	<b>0.2à0.4</b>	<b>1à4</b>
		<b>14à17</b>	<b>75à115</b>	<b>0.4à0.8</b>	<b>4à8</b>
<b>Fonte a graphite l'armillaire</b>	<b>900</b>		<b>180à190</b>	<b>0.1à0.2</b>	<b>0.2à1</b>
		<b>35à45</b>	<b>140à1480</b>	<b>0.2à0.4</b>	<b>1à4</b>
		<b>20à35</b>	<b>100à140</b>	<b>0.4à0.8</b>	<b>4à8</b>
<b>Alliage d'aluminium(alpax)</b>	<b>Dureté HB90à160</b>	<b>700à800</b>		<b>0.1à0.2</b>	<b>0.2à1</b>
		<b>650à700</b>		<b>0.2à0.4</b>	<b>1à4</b>
		<b>600à650</b>		<b>0.4à0.8</b>	<b>4à8</b>
<b>Bronze</b>	<b>Dureté HB60à100</b>	<b>110à130</b>	<b>395</b>	<b>0.1à0.2</b>	<b>0.2à1</b>
		<b>80à110</b>	<b>395</b>	<b>0.2à0.4</b>	<b>1à4</b>
		<b>70à80</b>	<b>365</b>	<b>0.4à0.8</b>	<b>4à8</b>
<b>plastiques</b>		<b>50à300</b>		<b>0.4à0.5</b>	

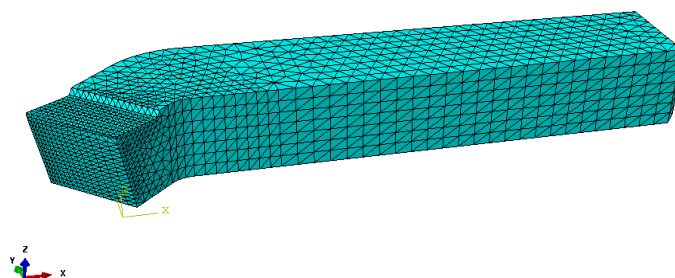
### III.9.2 Discrétisation

Le logiciel utilisé est *ABAQUS* 6-12.1 largement utilisé dans les domaines de recherche, type d'élément fini utilisé est le (3D stress), type de maillage est (Tétraèdre 4nœuds) maillage structuré consiste à diviser le domaine de calcul en plusieurs compartiments



**Figure III-13.** Type de maillage.

La figure suivante illustre le maillage sur la pièce étudiée.



**Figure III-14.** Modèle discrétisé.

III.10 Résultats e discussion

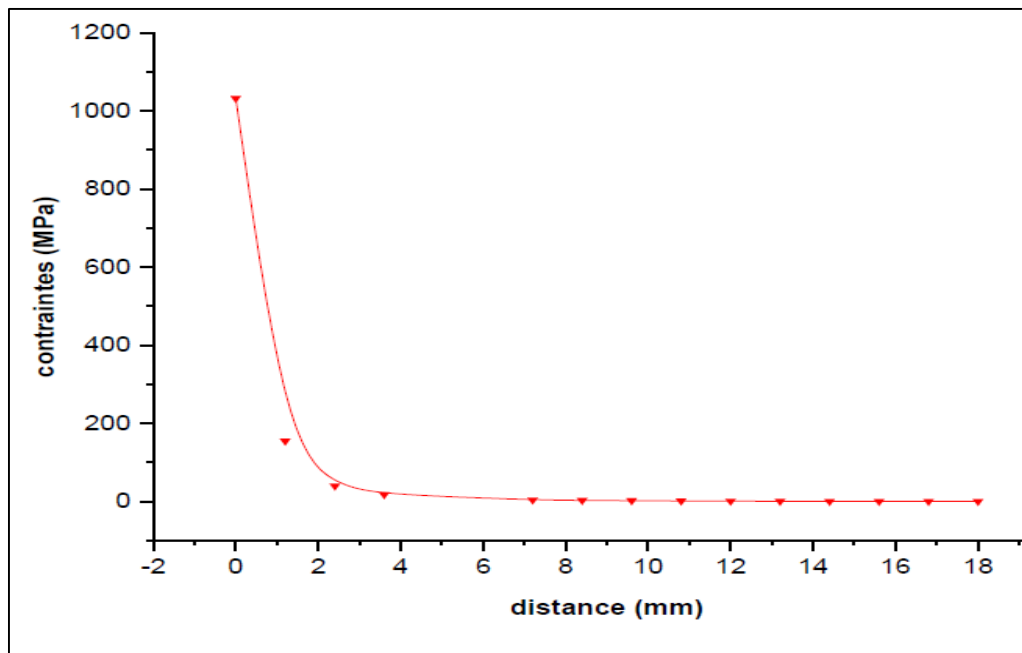
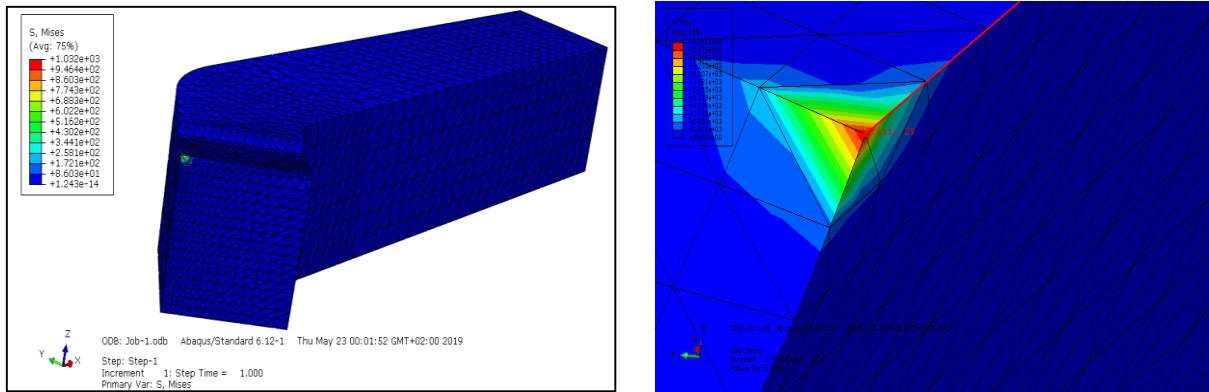
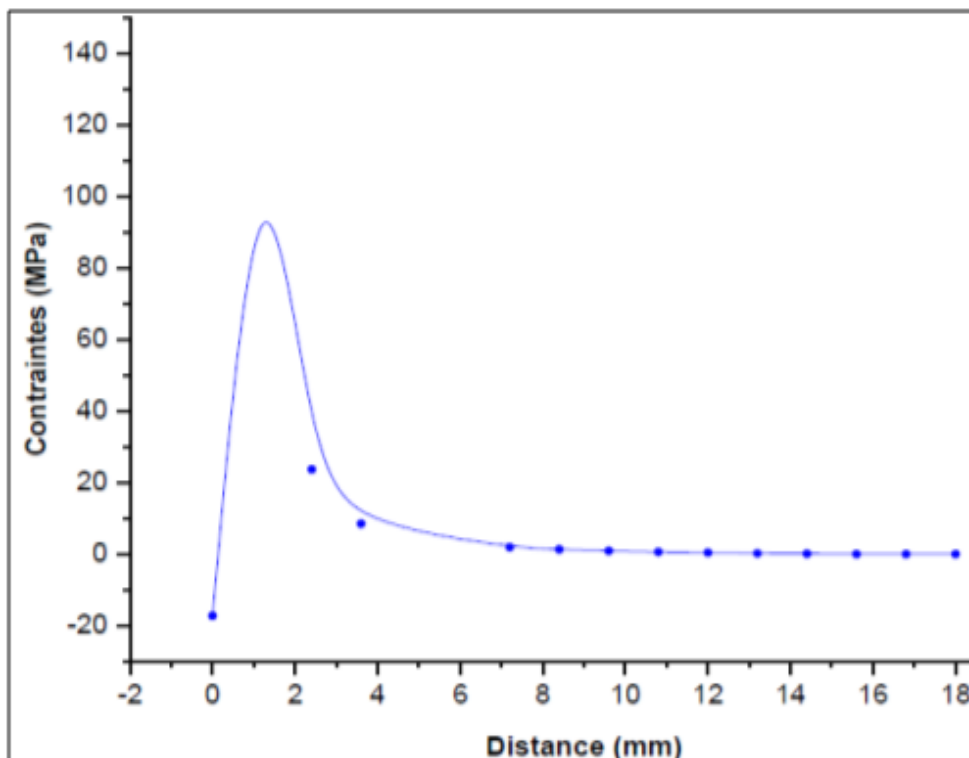
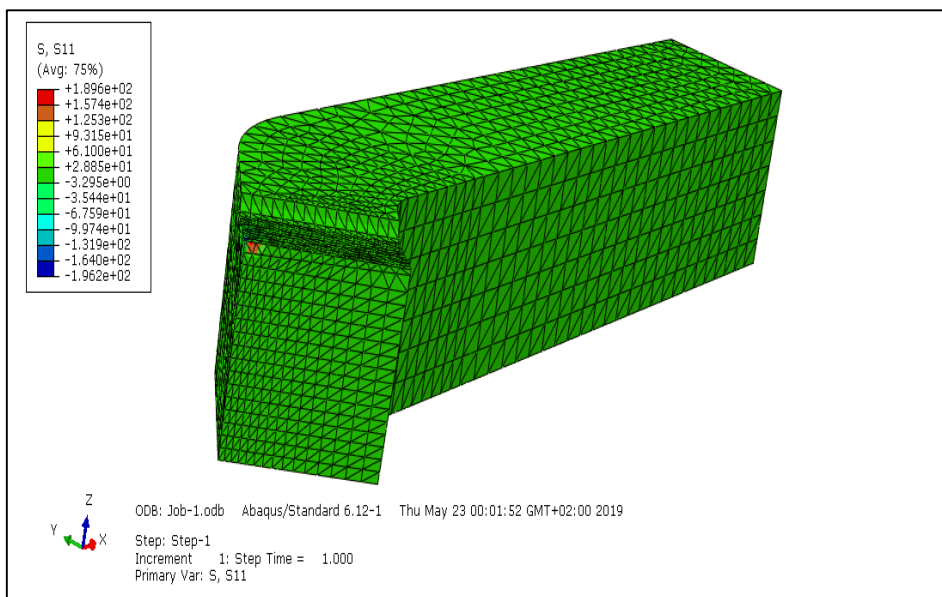
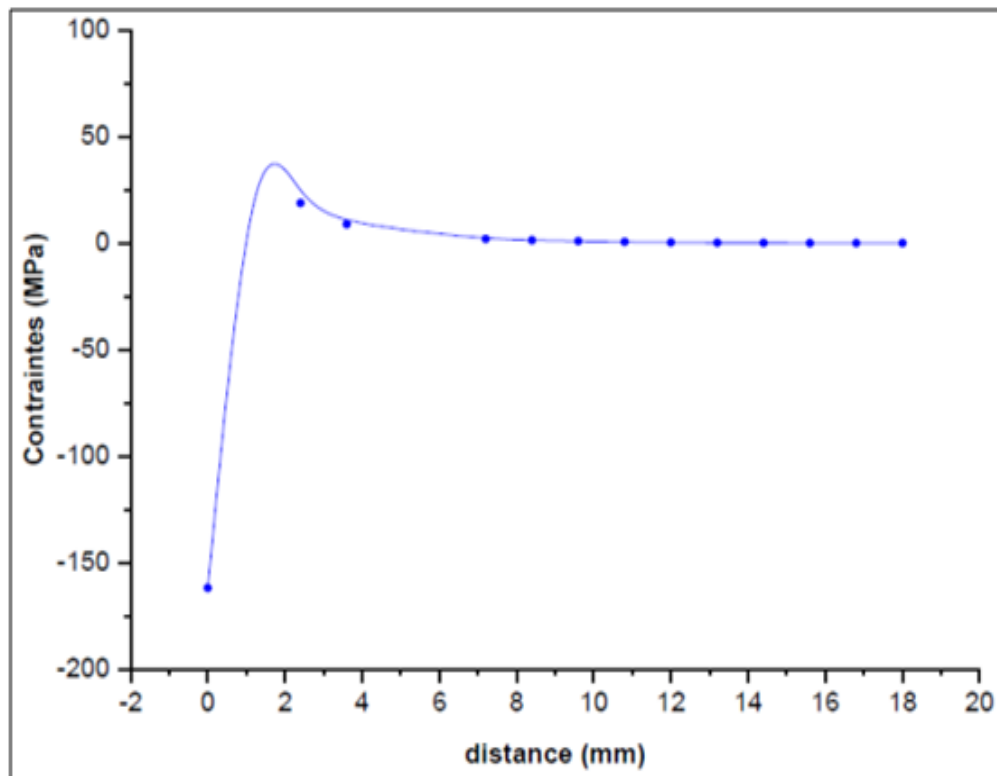
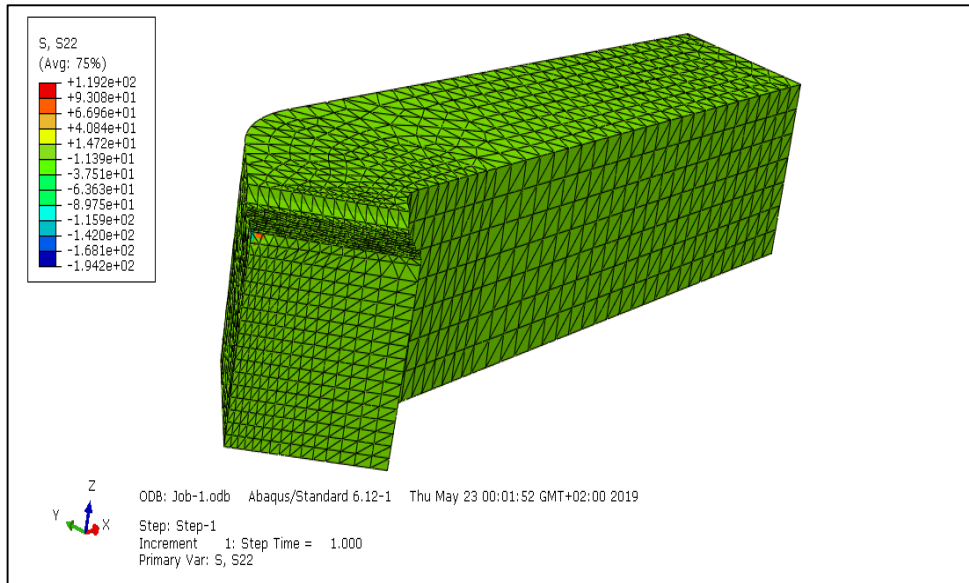


Figure III-15. Distribution des contraintes van-mises le long de la distance de l’arrête coupante.

La (Figure III-15) montre une diminution progressive des contrainte de  $+1.032e+03 \text{ Mpa}$  à  $6 \text{ Mpa}$  entre  $X=0 \text{ mm}$  et  $X=2.5 \text{ mm}$ , et que la contrainte de Von mises atteint une valeur maximale de  $\sigma_{\text{max}} = +1.032e+03 \text{ Mpa}$  situé au niveau de la tête coupante, à partir de  $2.5 \text{ mm}$  représente de variation de faible amplitude et des valeurs des contraintes. La concentration de contrainte max au niveau de la tête due à l’effort de réaction sue l’outil (efforts de coupe).

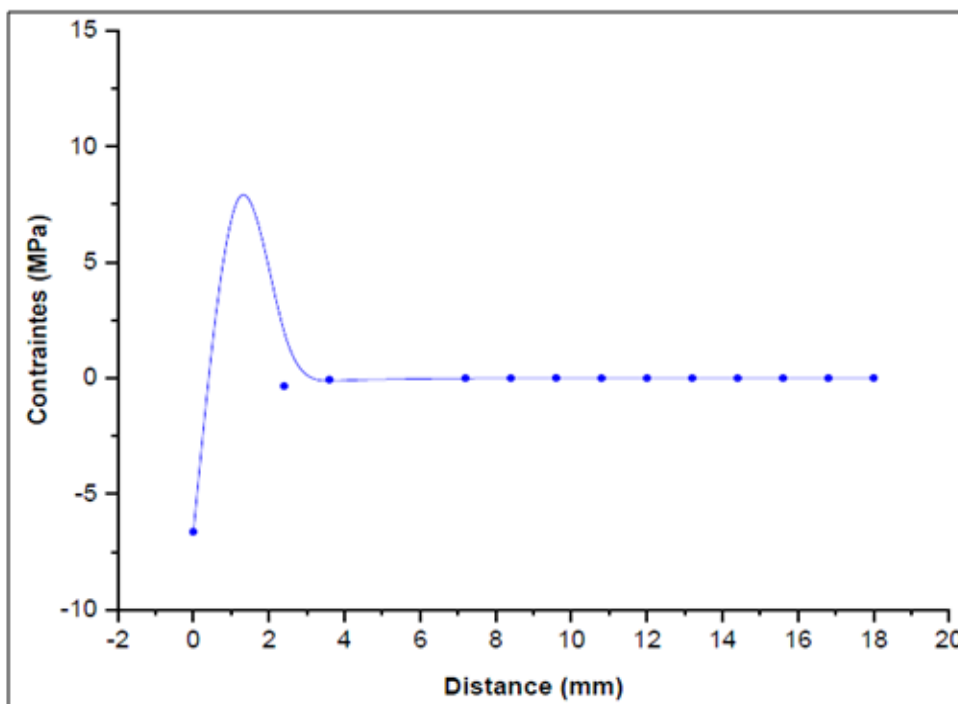
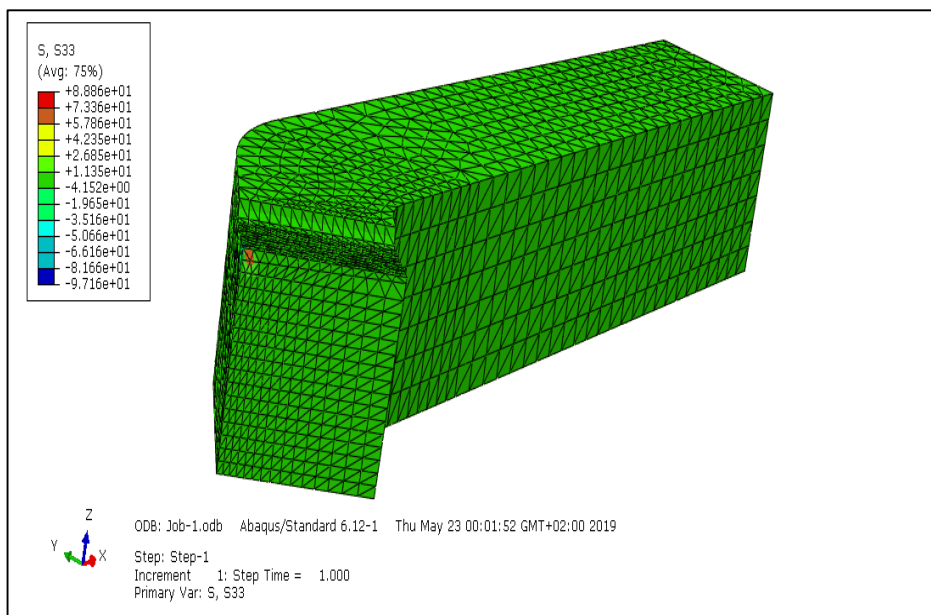


**Figure III-16.** Distribution des contraintes normale S11 le long de la distance de l'arrête coupante.

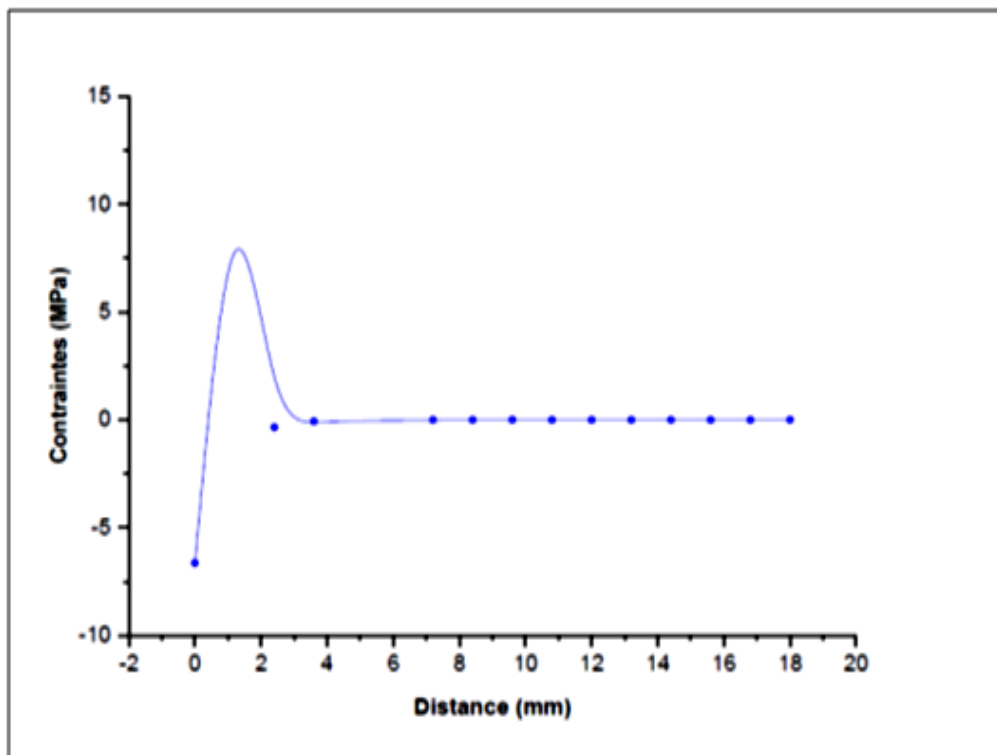
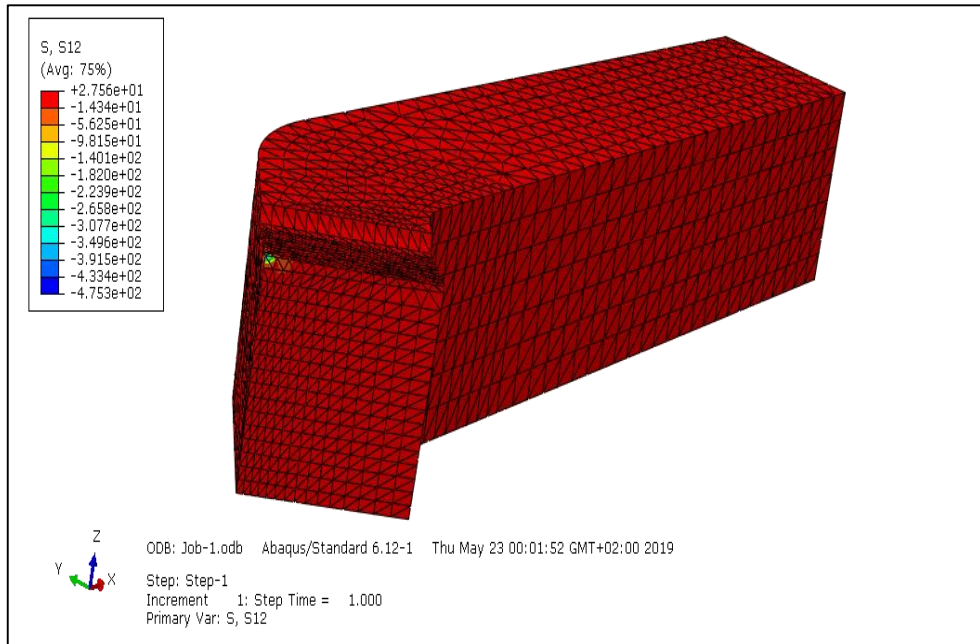


**Figure III-17.** Distribution des contraintes normale S22 le long de la distance de l’arrête coupante.

Nous constatons sur la (Figure III-17) une compression excessive au niveau de la tête coupante de contrainte de l’ordre  $+1.192e+02$  Mpa à  $X=0$  mm, avec une augmentation progressive des contraintes de  $-1.942e+02$ Mpa à 70 Mpa entre  $X=0$  mm et  $X=2.5$  mm,



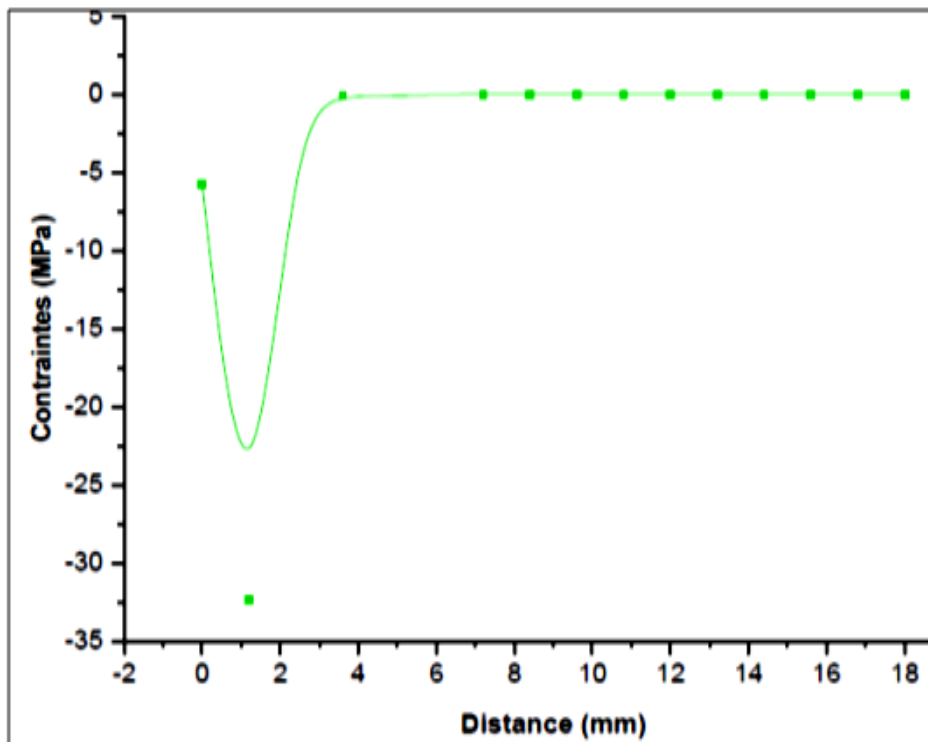
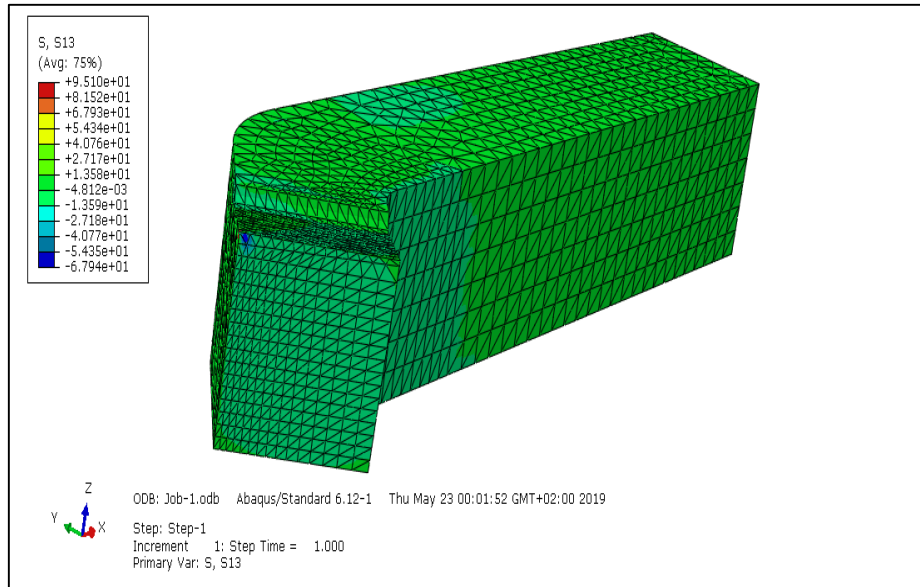
**Figure III-18.** Distribution des contraintes normale S33 le long de la distance de l'arrête coupante.



**Figure III-19.** Distribution des contraintes tangentielle S12 le long de la distance de l'arrête coupante.

Par contre sur les (Figure III-19) nous constatons la présence de deux point chaud (valeur de contraintes de l'ordre de  $-7\text{ Mpa}$  et  $7\text{ MPa}$  aux deux point  $X=0$  et  $X=2\text{ mm}$ ) et une stabilité

le long de l'arrête coupante avec une de variation de faible amplitude et des valeurs des contraintes



**Figure III-20.** Distribution des contraintes tangentielle S13 le long de la distance de l'arrête coupante.

La distribution des contraintes tangentielles  $\sigma_{xz}$  sur l'arrête coupante : montre l'existence d'un point chaud situés au  $X=2.5 \text{ mm}$  et de valeurs des contraintes négative avec des faibles amplitudes.

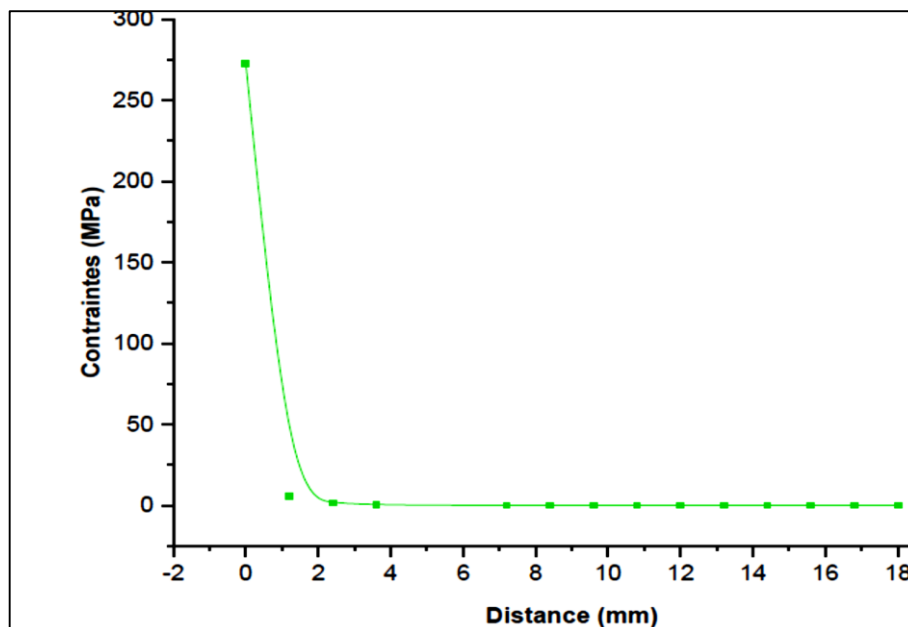
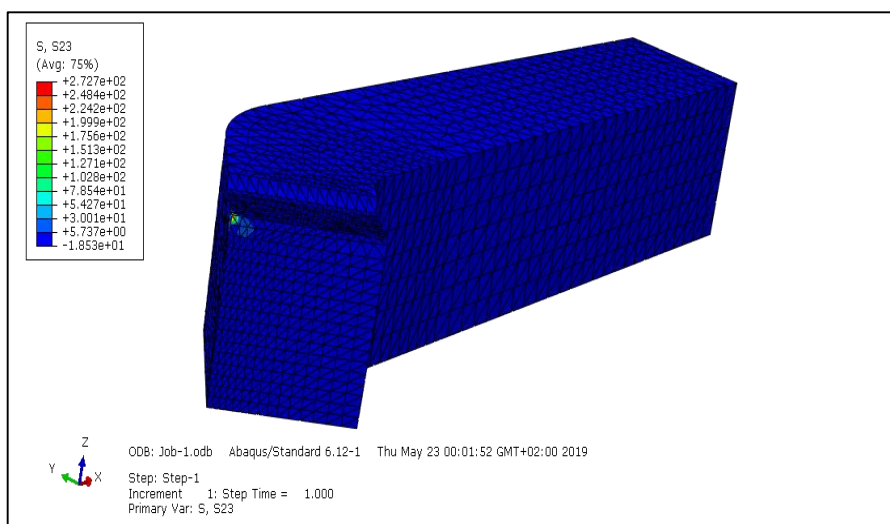
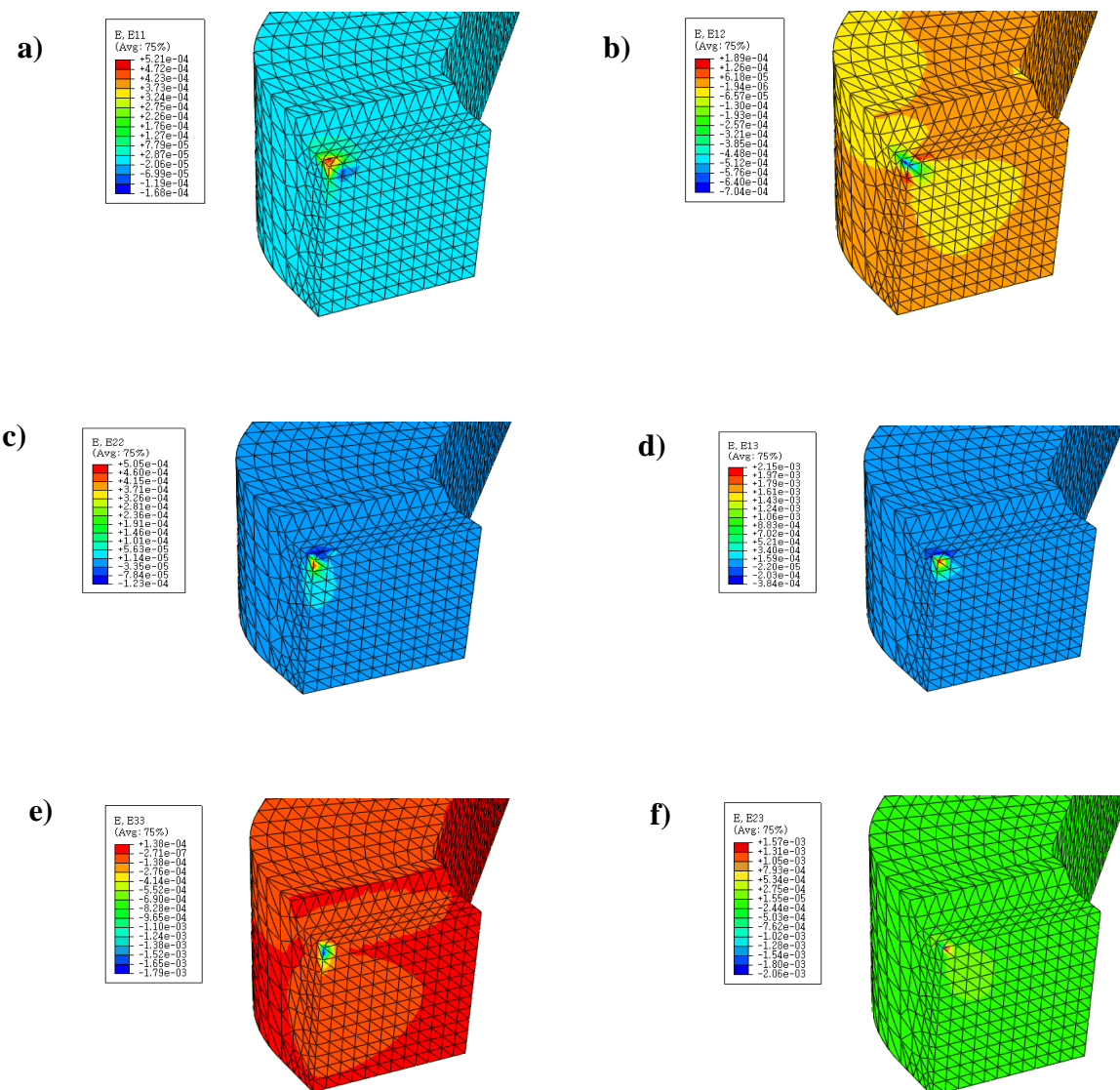


Figure III-21. Distribution des contraintes tangentielle S23 le long de la distance de l'arrête coupante.

Tableau III-5. Valeurs maximales et minimales des contraintes sur la surface interne de l'outil.

Contrainte	VM	S11	S22	S33	S12	S13	S23
Max	+1.032e+03	+1.896e+02	+1.192e+02	+8.886e+01	+2.756e+01	+9.510e+01	+2.727e+02
Min	+1.243e-14	-1.962e+02	-1.942e+02	-9.716e+01	-4.753e+02	-6.794e+01	-1.853e+01



**Figure III-22.** Les déformations suivant les trois axes x ,y, z ,  
**a)** Les déformations suivantes xx, **b)** Les déformations suivantes xy, **c)** Les déformations  
 suivantes yy, **d)** Les déformations suivantes xz, **e)** Les déformations suivantes zz,  
**f)** Les déformations suivantes yz

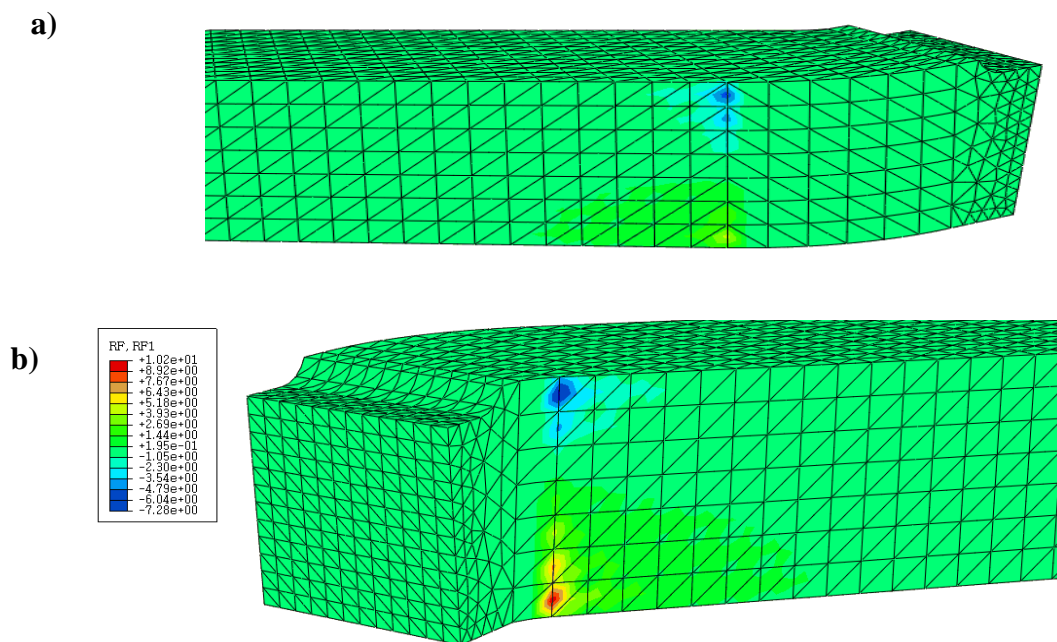


Figure III-23. Les rections des forces appliquées sur l'axe x.

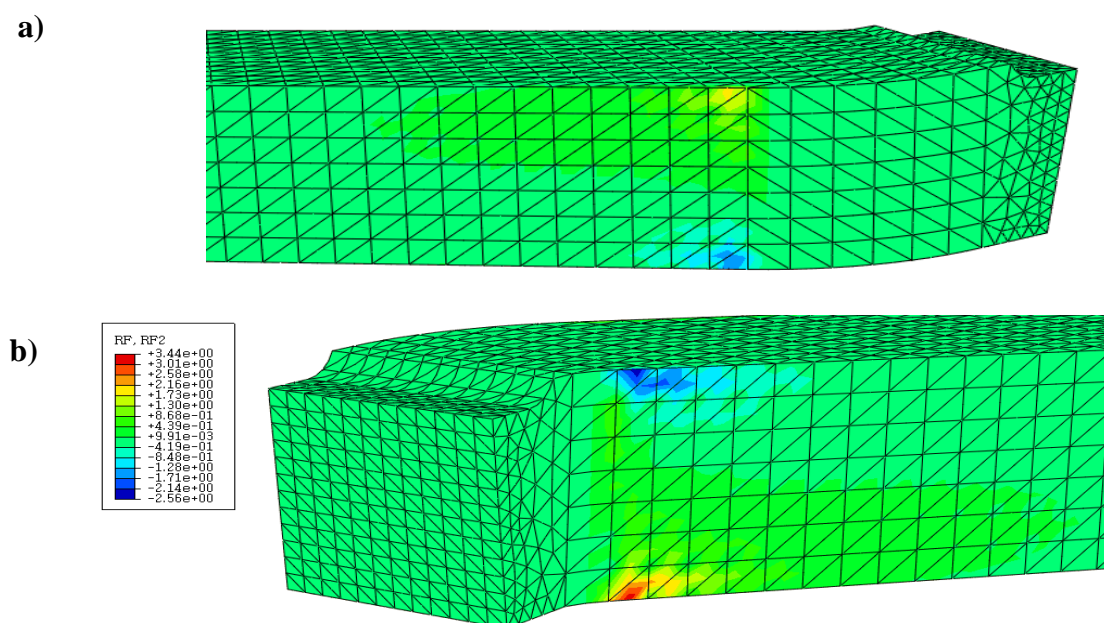


Figure III-24. Les rections des forces appliquées sur l'axe y.

a)

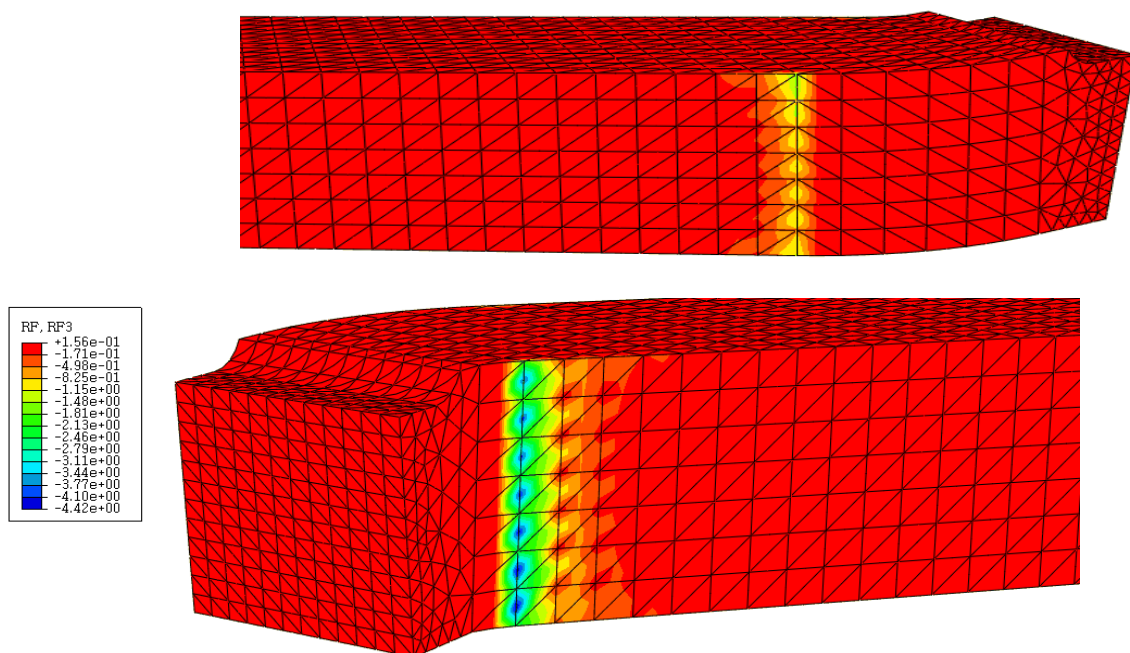


Figure III-25. Les reactions des forces appliquées sur l'axe z.

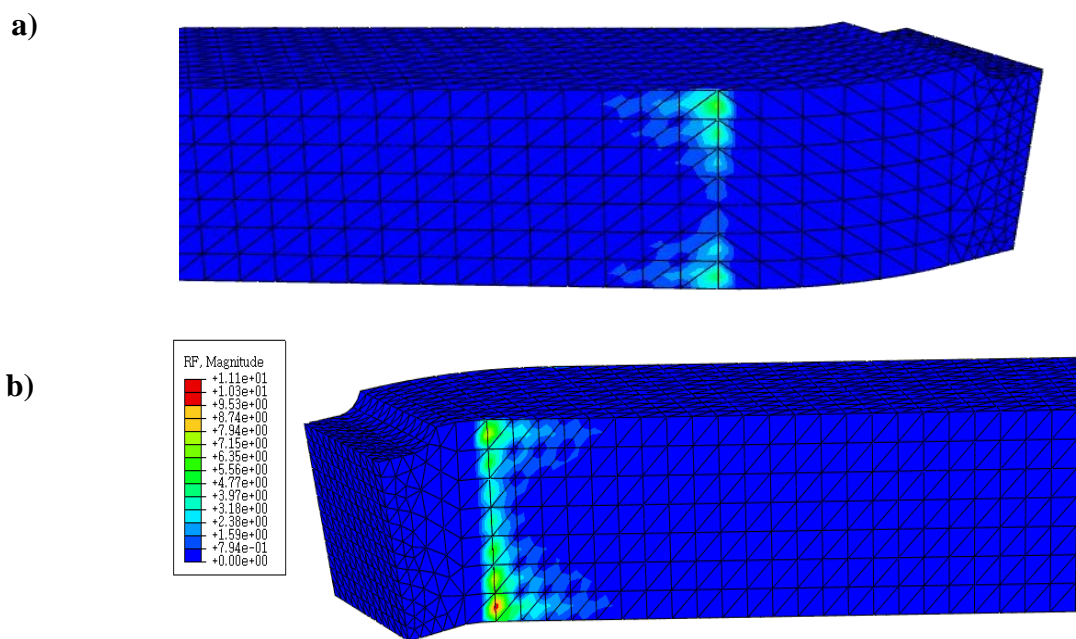
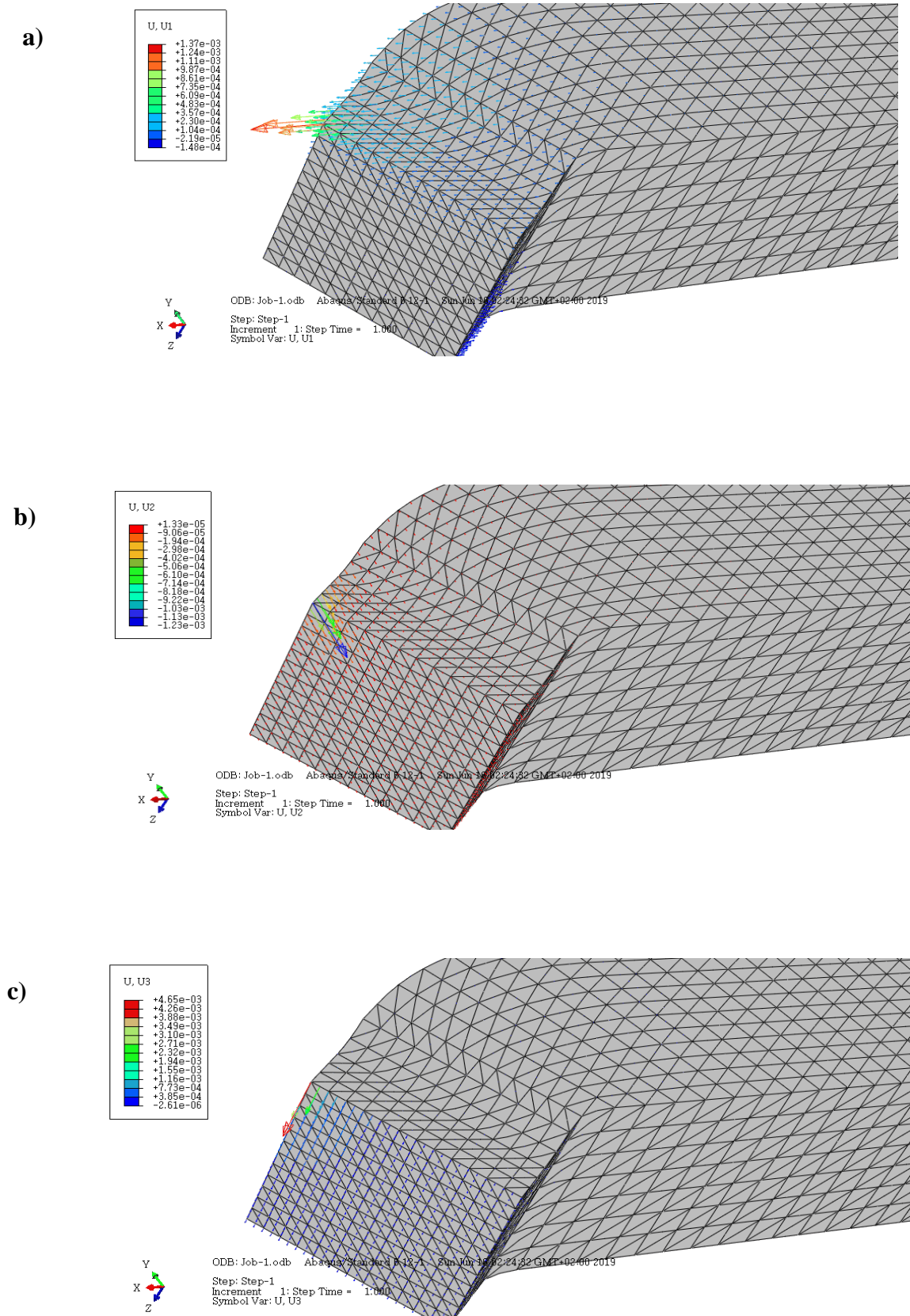
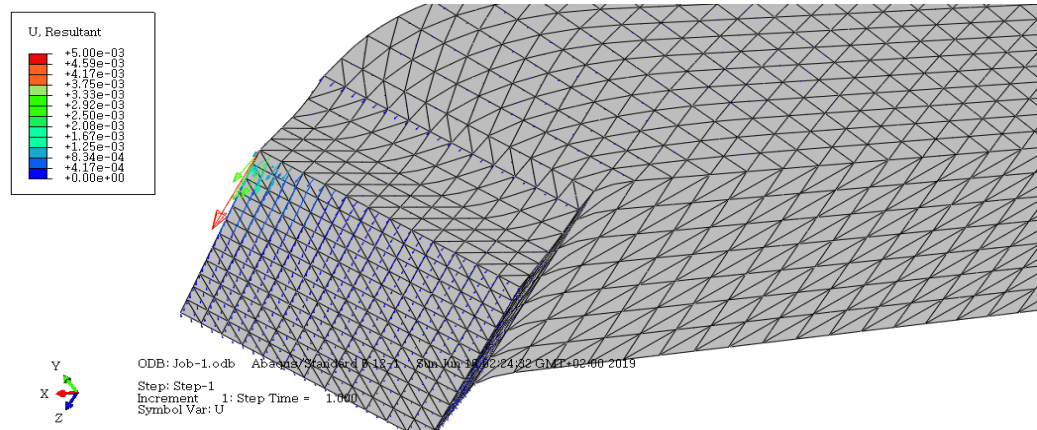


Figure III-26. La résultante des reactions des forces appliquées.



**Figure III-27.** Les déplacements suivant trois axes a) Déplacements suivant l'axe x  
 b) Déplacements suivant l'axe y c) Déplacements suivant l'axe z.



**Figure III-28.** Les résultantes des déplacements.

### III.11 Conclusion

On a examiné, dans le contexte de l'analyse générale quelques aspects du comportement des outils en usinage a l'interface copeau/outil et nous constatons que :

L'usure des outils de coupe est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En, effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique (type d'usure) qui doit obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques ou thermiques subies par l'outil de coupe sont donc très importantes.

Les contraintes mécaniques à l'interface copeau/outil peuvent atteindre des valeurs max. de plus la d'formation plastique des matériaux engendre, par réaction des contraintes (efforts de réaction de la pièce) provoquent l'usure de l'outil, il y a donc une variation rapide des contrainte le long de l'arrête coupante.

### III.12 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Denis. A, « *Présentation général d'Abaqus. Formation des masters* », école central de Paris. (2008)
- [2] Patrickh. R, « *Formation ABAQUS* » ; Université de Nantes. France 2007.
- [3] Hervé. O, « *Méthode des éléments finis* » ; université de Nantes. France. Cel-00341772, version 1 – 26.Nov. (2008).
- [4] Mefteh. K, « *Cours : Introduction général au logiciel Abaqus* » ; université de Biskra. (2013).
- [5] Mefteh. K, « *Présentation Abaqus. Formation des masters* » ; université de Biskra .2014.
- [6] ABAQUS. « *Formation sur le code de calcul ABAQUS – module Explicit* », élève ingénieur ; université de Nantes. (2007).
- [7] Mickael. A, « *Principe et fonctionnement ABAQUS* », université de technologie de Compiègne. (2011).

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Le manuscrit de mémoire débute par une revue bibliographique exposée au chapitre 1 dans laquelle un bilan des connaissances acquises dans le domaine de l'usinage en général et particulièrement au tournage a été donné. Après une brève introduction sur les généralités de la coupe et la phénoménologie de la formation du copeau nous avons traité le phénomène de l'usure de l'outil de coupe de tournage (l'outil de chariotage accoudeé).

A travers ce thème traité nous avons enrichi nos connaissances sur l'usure de l'outil de tournage. Le second chapitre se penche sur l'influence des conditions de contact à l'interface entre la surface usinée et la face de dépouille de l'outil coupant en tournage. Pour ce faire, le premier volet de cette étude se concentre sur l'influence de la géométrie de l'outil coupant sur les efforts de coupe tout en conservant une géométrie de pièce usinée figée. Le second volet de ces travaux se positionne, quant à lui, à l'inverse du premier, en s'attardant sur l'effet de la géométrie de la pièce usinée sur les efforts de coupe tout en conservant une géométrie d'outil la plus constante possible.

Ces deux analyses mettent en évidence des effets significatifs sur les efforts de coupe et l'existence d'un couplage entre le niveau d'usure en dépouille de l'outil coupant et le rayon de contact en dépouille. Ces aspects, pris en compte dans la formulation d'un nouveau modèle, selon une approche phénoménologique, généralisé à un ensemble d'opérations de tournage intérieur et extérieur, ainsi qu'à un domaine de validité large, permettent d'améliorer la qualité de prédiction des efforts de coupe à iso-niveau d'usure. De plus, le troisième volet de cette étude s'attarde à enrichir la modélisation des efforts de coupe par l'introduction d'une composante d'effort de coupe local représentative de la contribution de la contrainte induite par l'écoulement du copeau sur les efforts de coupe.

L'objectif de cette mémoire était de proposer une simulation de l'usure par déformation plastique des outils de coupe dans un moment d'une opération d'usinage. Ce modèle se devait de restituer les mécanismes physiques régissant l'usure par abrasion aux interfaces de contact en prenant en compte l'hétérogénéité de particules abrasives liée au matériau usiné.

## Résumé

Les progrès dans le domaine de l'usinage font apparaître des outils coupants de nature nouvelle susceptible d'améliorer la productivité des techniques d'usinage automatisé. Leur mise en œuvre nécessite des expérimentations spécifiques pour évaluer leurs conditions d'emploi optimales avec un minimum d'usure. Cette étude contribue à cet objectif. Le premier chapitre a pour but de faire connaître les différents outils de coupe de tournage et leurs caractéristiques et des matériaux utilisés. Le deuxième chapitre traite le phénomène de l'usure des outils de coupe particulièrement au tournage. Le troisième chapitre consiste en l'étude expérimentale de l'usure, suivie d'une analyse des résultats obtenus et observés. On peut conclure que l'étude des problèmes de l'usure en mécanique permet de choisir les paramètres nécessaires afin d'avoir un usinage avec une usure minimale de l'outil de coupe.

**Mots-clés :** usinage, outil, tournage, usure, contrainte, déformation,

## Abstract

Progress in machine manufacturing reveals a new type of tool that can improve the productivity of automated cutting techniques. Their implementation requires specific testing to evaluate their optimal condition with minimal usury. This study contributes to this goal. The first chapter aims to introduce various cutting tools, their properties and materials used. The second chapter deals with the phenomenon of usurying cutting tools. The third chapter consists of the pilot study of usury, followed by analysis and observation of results. We can conclude that studying one of the mechanical usury problems allows to select the necessary conditions in order to obtain a minimum usury cutting tool

**Key words:** manufacturing, tool, turnery, usury, stress, deformation,

## ملخص

التقدم في مجال تصنيع الآلات تكشف عن نوع جديد من الأدوات قادرة على تحسين إنتاجية تقنيات القطع الآلي. تنفيذها يتطلب تجارب محددة لتقييم أوضاعهم الأمثل مع الحد الأدنى من الارتداء. تساهم هذه الدراسة في تحقيق هذا الهدف. ويهدف الفصل الأول للتعريف بمختلف أدوات القطع وخصائصها والمواد والفصل الثاني يتناول ظاهرة ارتداء أدوات القطع. ويتألف الفصل الثالث من الدراسة التجريبية للارتداء يعقبه تحليل للناتج ومراعاتها. ويمكن أن نلخص إلى أن دراسة واحدة من مشاكل ارتداء الميكانيكية تسمح لاختيار الشروط الضرورية من الحصول على الحد الأدنى من ارتداء أداة القطع.