



Université Abbas LAGHROUR Khenchela
Faculté de Sciences & de Technologie
Département de Sciences & Techniques
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم العلوم والتقنيات



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Réalisation d'un outil de tour en acier rapide de type outil coudé droit à charioter

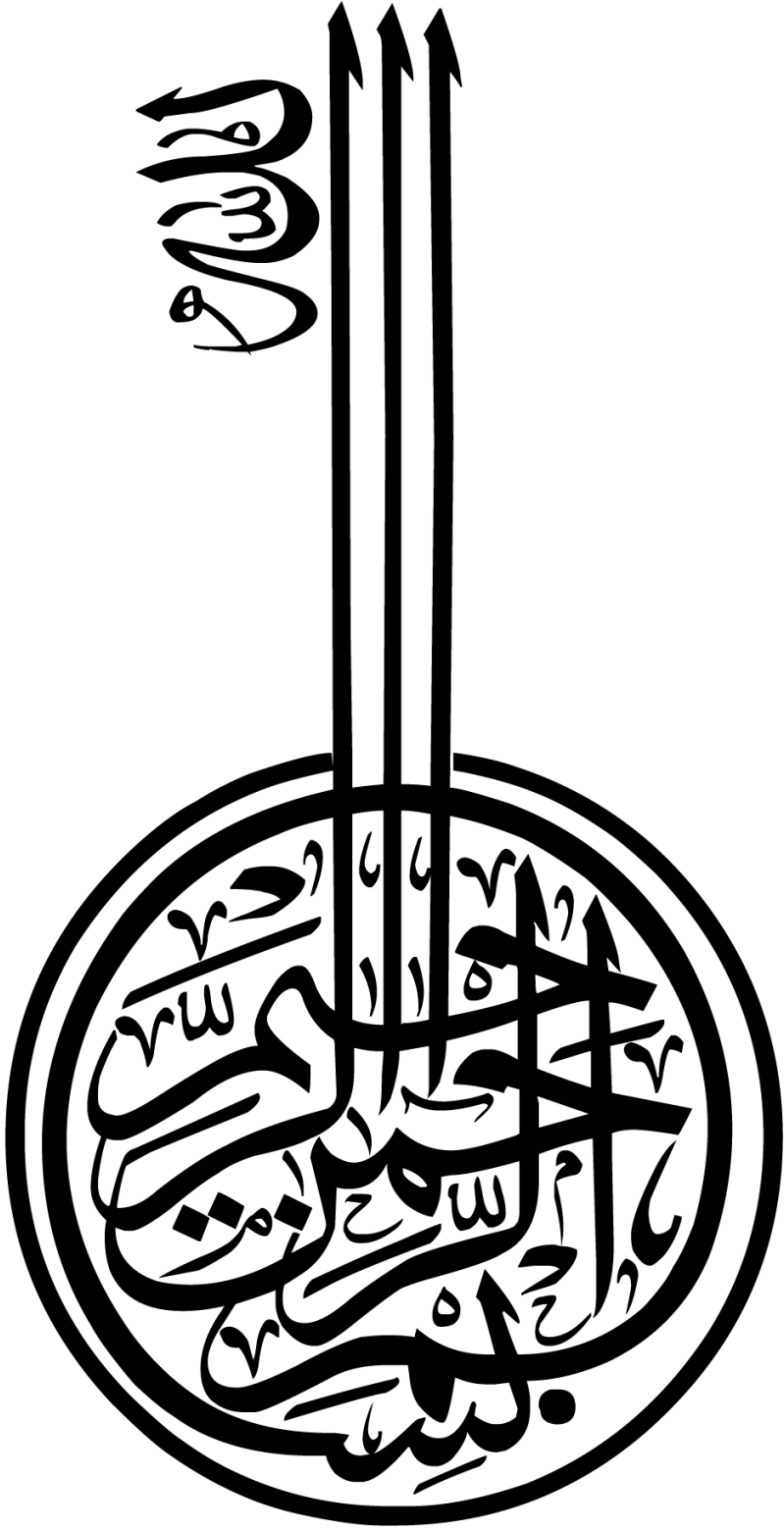
Réalisé par : Marir Abdennour

Dirigé par : Dr Aboudi.A

Membres des jurés :

- Dr Chermim .I
- Mr Humeur.N

Année Universitaire 2018-2019



Dédicace

*A celle qui m'a attendu avec patience pour les fruits de sa
bonne*

Éducation,...

A ma Mère halima attallah.

*A celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que
la volonté fait toujours les grands Hommes dans la vie*

A mon Père laid.

*A ceux qu'ont fait preuve de soutiens et qui m'ont donné une
Motivation sans prix*

A mes frères et sœurs :

issam, djalal, Zoti, dadou.adnen.

A toute la famille marir et attallah.

A tous ceux qu'ont encouragés de près ou de loin

A tous mes ami(e)s :

hamza ,ossama, boka ,djilali,taki, anis, mohamed .

Et sans oublier ceux d'r : fares Espoir, bilal,

Zaugui.

A tous mes enseignants

Remerciement

Remerciement

Je tiens en premier lieu à remercier Allah le tout puissant qui m'a permis de réaliser ce modeste travail.

Je remercie les plus sincères vont à notre encadreur :

Dr Aboudi m pour son soutien, sa confiance et son aide qu'il a apporté tout au long de ce travail. Je souhaite lui transmettre l'expression de notre reconnaissance et notre plus profonde gratitude.

je remercie vont à tous ceux qu'ont contribué de près où de loin à la réalisation de ce travail en particulier :

Dr Zouagui bilal,

Dr Fars mohammed

Mr Falek sayeh

Mr Ounnallah abdel hakim

Je remercie tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation durant les cinq années.

Je tennais à remercier les membres du jury pour avoir accepter de juger ce travail.

Mr Chermim .I

Mr Himeur .N

je ne pourrions clôturer ces remerciements sans retourner vers les êtres les plus chers pour nous, nos parents, nos frères, nos sœurs nos dont leur aide et encouragement nous ont permis de continuer nos études et de réussir.

Merci a tous.....

Sommaire

Sommaire

Sommaire	I
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Étude des aciers rapides	
1.1.Introduction.....	5
1.2.Aciers rapides.....	5
1.2.1. Les aciers rapides de bases.....	5
1.2.2. Les aciers rapides sur carburés.....	5
1.2.3. Les aciers rapides au cobalt.....	6
1.3.Influence des éléments d’alliage.....	6
1.3.1. Carbone.....	6
1.3.2. Vanadium.....	7
1.3.3. Chrome.....	7
1.3.4. Tungstène.....	7
1.3.5. Cobalt.....	7
1.3.6. Le molybdène.....	8
1.4.Classification des outils coupants.....	9
1.5.Conditions techniques des outils coupants.....	9
1.6.Particularités technologiques de la fabrication des outils coupants.....	10
1.6.1. Précision.....	10
1.6.2. Etat de surface.....	10
1.6.3. Dureté.....	10
1.6.4. Influence des paramètres de coupe sur l'usure.....	11
1.7.Micro dureté.....	12
1.7.1. Essai de dureté Brinell.....	12
1.7.2. Essai de dureté Vickers.....	14
1.7.3. Essai de dureté Rockwell.....	15
1.8.Structures métallographiques des aciers	16
1.8.1. Austénite.....	16
1.8.2. Cémentite ou Carbure de Fer.....	16

Sommaire

1.8.3. Perlite.....	17
1.8.4. Troostite.....	18
1.8.5. Martensite.....	18
1.8.6. Ferrite.....	19
1.8.7. Bainite.....	19
1.8.8. Sorbite.....	20
1.8.9. Fer α	20
1.8.10. Fer γ	20
Chapitre 2 : Traitement thermique	
2.1.Introduction.....	22
2.2.Définitions et procédés des traitements thermiques.....	23
2.2.1. Chauffage des pièces.....	24
2.2.2. Refroidissement des pièces.....	25
2.3.Diagramme fer-cémentite	26
2.3.1. Trempe.....	28
2.3.2. Revenu.....	30
2.3.3. Recuit.....	31
2.4.Essai de trempabilité par trempe en bout (Essai Jominy).....	32
2.5.Défaut de traitement thermique.....	34
2.6.Défauts de matière.....	36
2.6.1. Cémentite en lamelle (lamellaire).....	36
2.6.2. Carbure en réseau.....	36
2.6.3. Graphitisation.....	36
2.6.4. Carbures eutectiques en bande et en réseau.....	37
2.6.5. Structure non homogène.....	37
Chapitre 3 : gamme d'usinage	
3.1.1Introduction.....	40
3.1.2Gamme d'usinage d'un outil à charioter coudé droit.....	40
3.2.Dessin (solidWorks).....	47
3.2.1. Introduction.....	47
3.2.2. Outil de tour réalisé par solidWorks	47
3.2.3 Mise en plan	48
3.3.Caractéristiques d'un outil de tour	48

Chapitre 4 : Simulation du comportement dynamique d'usinage

4.1.Introduction.....	50
4.2.Modélisation et Approches Numériques.....	51
4.2.1. Equation d'équilibre dynamique.....	51
4.2.2. Le modèle géométrique.....	52
4.3.Simulation de tournage sous ABAQUS.....	53
4.3.1. Géométrie et maillage.....	53
4.3.2. Propriétés des matériaux.....	55
4.3.3. Définition du contact.....	55
4.3.3.1Propriétés du contact	57
4.3.4. Définitions des conditions aux limites.....	58
4.3.5. Résultats de simulation.....	60
4.4 Modélisation d'un outil de tour coudé droit.....	60
4.4.1 Phases de mises en données.....	60.
4.4.2 Réalisation de la mise en données d'un problème.....	60
4.4.3 maillage.....	61
4.4.4 Serrage d'outil.....	61
4.4.5 Contraintes de Von mises.....	62
4.4.6 Contraintes selon ZZ.....	62
4.4.7 Contraintes selon XX.....	63
4.4.8 Contraintes selon YY.....	63
4.4.9 Contraintes selon XY.....	64
4.4.10 Contraintes selon XZ.....	64
4.4.11 Contraintes selon YZ.....	64

Conclusion Général

**Liste des figures
et tableaux**

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1.1 : Dureté Rockwell de la martensite en Fonction du taux de carbone.....	6
Figure 1.2 : Exemple d'outil de coupe.....	9
Figure 1.3 : Essai de dureté Brinell.....	12
Figure 1.4 : Essai de dureté Vickers.....	14
Figure 1.5 : Essai de dureté Rockwell.....	15
Figure 1.6 : Austénite d'un acier 1,70%.....	16
Figure 1.7 : Cémentite Fe ₃ C.....	17
Figure 1.8 : Structure perlitique.....	18
Figure 1.9 : Martensite.....	18
Figure 1.10 : Formes de polyèdres de la ferrite.....	19
Figure 1.11 : Bainite dans un acier de 0.22% carbone.....	20
Figure 2.1 : Procédé du traitement thermique.....	24
Figure 2.2 : Chauffage des pièces par transmission de la chaleur.....	25
Figure 2.3 : Diagramme de phase Fer-cémentite.....	28
Figure 2.4 : Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C).....	29
Figure 2.5 : Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement.....	30
Figure 2.6 : Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6.....	31
Figure 2.7 : Acier rapide déformé et recuit 500X.....	32
Figure 2.8 : Courbe de refroidissement à différentes profondeurs x de l'éprouvette Jominy.....	33
Figure 2.9 : Appareils de trempe selon Jominy.....	34
Figure 3.1 : Outil coudé a charioté.....	39

Liste des figures et tableaux

Figure 3.2 : Débitage de la matiere promier (en HSS+X45).....	40
Figure 3.3 : Soudage en bous de deux morceaux.....	40
Figure 3.4 : Fraisage plans	41
Figure 3.5 : Essai de dureté Brinell.....	41
Figure 3.6 : Control de durete.....	42
Figure 3.7 : Outil de tour par solidworks.....	46
Figure 3.8 : Mise en position d’outil.....	47
Figure 4.1 : Gemetrie et maillage d’outil.....	53
Figure 4.2 : Gemétre et millage de la piece.....	53
Figure 4.3 : Defenition de la face de contact.....	55
Figure 4.4 : Preperité de contact.....	56
Figure 4.5 : Defenition de des deux points de reference pour applique les condition aux limites	57
Figure 4.6 : Application des conditions aux limites.....	58
Figure 4.7 : Formation des coupeaux et distribution de contrainte Von mise.....	59
Figure 4.8 : Evolution des compsants de l’effort de coupe en fonction du temps.....	60
Figure 4.9 : Port-outil.....	61
Figure 4.10 : Cotrainte Von mise.....	62
Figure 4.11 : Contrainte selon l’axe ZZ.....	62
Figure 4.12 : Contrainte selon l’axeXX.....	63
Figure 4.13 : Contrante selon l’axe YY	63
Figure 4.14 : Contrainte selon l’axe XY.....	64
Figure 4.15 : Contrainte selon l’axe XZ.....	64
Figure 4.16 : Contrainte selon l’axe YZ.....	64

Liste des figures et tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers rapide.....	8
Tableau 3.1 : Usinage de la face de coupe (Plan de travail horizontal).....	44
Tableau 3.2 : Usinage de la face de dépouille (Plan de travail vertical).....	45
Tableau 3.3 : Usinage de la face de coupe.....	46
Tableau 4.1 : Propriétés des matériaux (Outil, pièce).....	54

Introduction

Générale

Introduction

Contexte

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques, le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision.

L'usinage entre dans la gamme de fabrication d'une pièce mécanique. Elle est définie par un plan portant une cotation exhaustive. Celle-ci a pour but de définir les dimensions de la pièce finie, la précision, la géométrie ainsi que l'état de surface de l'ensemble des surfaces qui constituent la pièce usinée, à chaque phase de la gamme de fabrication, le concepteur et/ou l'usineur choisissent le type d'usinage à réaliser, la machine, l'outil ainsi que le support de pièce permettant l'obtention de tous les éléments de cotation de la surface considérée.

La dimension de cette interférence est définie par l'avancée mm, lors de la coupe, la matière en interférence avec la trajectoire de l'outil est détachée par déformation plastique du reste de la pièce et se transforme en copeaux lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance).

Les outils de coupe modernes sont composés d'un support appelé porte-outil en acier et d'une partie amovible appelée plaquette de coupe en carbures. La plaquette est fixée par une vis ou une bride sur son support, cela permet d'adapter parfaitement son outil selon la matière que l'on souhaite usiner, de l'opération que l'on doit effectuer ou des contraintes particulières.

Cette plaquette dispose de plusieurs arêtes de coupe qui permettent une réduction des coûts d'utilisation. La durée de vie moyenne pour un outil en carbure de tungstène revêtu est de 20 min en tournage et de 45 min en fraisage (temps de contact outil/matière). Et comme les deux principaux paramètres sont le coût et la fabrication on a orienté notre travail dans ce sens-là pour amortir le coût c'est-à-dire réduire le temps et allonger la durée de vie de l'outil en choisissant un matériau et bien définir les étapes de fabrications ce qu'on appelle gamme d'usinage.

Objectifs

Dans notre de étude on a abordé le sujet de fabrication d'un outil de coupe et mis en évidence le processus de fabrication.

Structure du mémoire

Ce manuscrite est divisé en quatres chapitres :

- Le 1^{er} chapitre: est consacré à une recherche bibliographique sur les aciers rapides
- Le 2^{ème} chapitre: est réservé à l'étude des traitements thermiques pour outils d'usinage.
- Le 3^{ème} chapitre: donne une présentation générale sur l'étude, Gamme d'usinage d'un outil de tour coudé droit à chariotier.
- Le 4^{ème} chapitre: est consacré à la modélisation et la simulation d'un outil de tour coudé à chariotier.
- La recherche est clôturée par une conclusion générale.

Chapitre 1

Étude des aciers rapides

1 · Étude des aciers rapides

1.1 Introduction

Les aciers à coupe rapide, appelés couramment aciers rapides, présentent en commun la propriété de pouvoir acquérir après trempe une dureté élevée et de la conserver aux hautes températures, de l'ordre de 600 à 650°C à un degré supérieur à celui des autres aciers. Utilisé d'abord exclusivement pour la coupe des métaux, les aciers rapides ont depuis trouvé de nombreuses applications dans le domaine de la mise en forme des métaux sans production de copeaux.

Les caractéristiques requises pour la mise en forme avec ou sans enlèvement de copeaux sont essentiellement la dureté (à froid et surtout à chaud), la résistance à l'usure et la ténacité, ces caractéristiques ont été obtenues au moyen d'additions importantes d'éléments tels que le tungstène, le molybdène et le vanadium, combinés à des éléments tels que le chrome et le cobalt donnant, l'un la trempabilité, l'autre la dureté à chaud, l'augmentation de la teneur en vanadium de ces aciers ainsi que l'augmentation correspondante de la teneur en carbone ont conduit à la mise au point de nuances d'aciers rapides dites sur carburées, dont la résistance à l'usure et la dureté à chaud sont nettement supérieures à celles des aciers rapides classiques.

1.2 Aciers rapides

1.2.1 Les aciers rapides de bases

Les aciers rapides de base ont une bonne tenue à la coupe, adaptable à beaucoup de conditions de travail et une assez bonne ductilité, leur résistance à l'usure et leur dureté à chaud sont moindres que celles d'autres aciers, mais sont cependant suffisantes dans un grand nombre de cas [1].

1.2.2 Les aciers rapides sur carburés

Les aciers de ce groupe se différencient des aciers rapides de base par des teneurs en carbone et vanadium nettement plus élevées. Ces nuances, qui sont en quelque sorte des aciers sur carburés sans cobalt, ont une meilleure dureté à la température ambiante que les précédents, mais leur dureté à chaud est sensiblement la même. Ces aciers sont fragiles et leur aptitude au meulage est rendue délicate par suite d'une grande quantité de carbures de vanadium dans la microstructure [1].

1.2.3 Les aciers rapides au cobalt

L'action du cobalt est généralement associée à l'amélioration des propriétés à chaud. Le cobalt ne forme pas de carbure et passe en quasi-totalité dans la matrice. Au sein de celle-ci, il augmente la vitesse de germination des carbures au cours du revenu en diminuant leurs vitesses de croissance et de coalescence ultérieurs. Les carbures sont de ce fait plus nombreux, plus fins et plus dense. La dureté de l'acier se conserve plus longtemps et résiste mieux à l'échauffement. L'addition de cobalt augmente la fragilité de l'acier. D'autre part comme le molybdène, le cobalt rend l'acier plus sensible à la décarburation [1].

1.3 Influence des éléments d'alliage

1.3.1 Carbone

Élément essentiel pour durcir l'acier, L'augmentation progressive de la teneur en carbone conduit à une réduction des domaines de température [1].

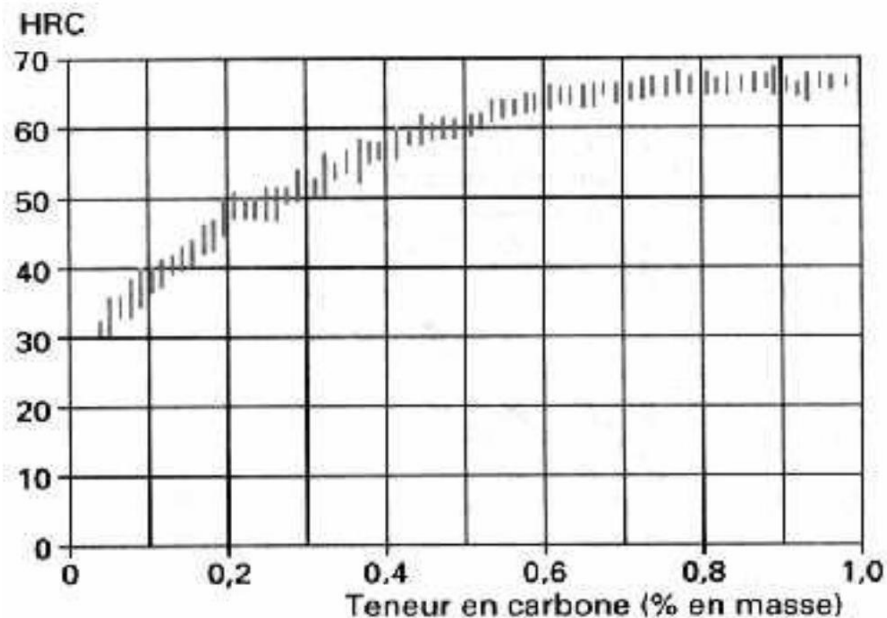


Figure 1.1 : Dureté Rockwell de la martensite en Fonction du taux de carbone.

1.3.2 Vanadium

Utilisé essentiellement comme générateur de carbures. C'est un élément d'alliage important dans les aciers rapides pour l'obtention d'une bonne dureté à chaud et une bonne résistance à

Chapitre 1 : Étude des aciers rapides

l'usure. De petites additions voisines de 0.2% en masse sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain lors du traitement thermique. Le Vanadium est rarement utilisé seul dans les aciers à outils, mais la plupart du temps en association avec le chrome, molybdène et le tungstène.

La teneur en vanadium est étroitement associée à la teneur en carbone. Pour chaque 1% de vanadium ajouté, il faut augmenter la teneur massique en carbone de 0.25%. Des additions de vanadium trop importantes entraînent des problèmes de trempabilité, et des additions de carbone trop importantes entraînent des difficultés de forgeage [1].

1.3.3 Chrome

Cet élément est utilisé dans la plupart des aciers à outils, en quantité allant de 0.5 à 17%. Le chrome joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la trempabilité. Il forme des carbures qui participent à la résistance à l'abrasion et s'opposent au grossissement de grains lors de l'austénitisation. Il provoque, par ailleurs, un certain retard à l'adoucissement lors du revenu, ce qui améliore la résistance à chaud. Il entraîne également une très forte réduction de l'oxydation à haute température [1].

1.3.4 Tungstène

Le tungstène ne se met que très peu en solution dans la cémentite, mais donne naissance à des carbures de haute dureté conférant aux aciers une grande résistance à l'usure. De plus il offre, la possibilité de durcissement secondaire. Par la présence de carbures primaires, le tungstène diminue la tendance des aciers au grossissement du grain par surchauffe. Sa forte masse atomique en fait un élément très ségrégué, d'où une augmentation sensible de l'hétérogénéité de l'acier.

Les aciers à outils au tungstène sont peu sensibles à la décarburation, mais ont une résistance thermique assez faible [1].

1.3.5 Cobalt

Il est communément ajouté en quantités variables entre 3 et 15 %, notamment dans les aciers rapides qui travaillent dans des conditions sévères. Il permet d'effectuer la trempée à des températures plus élevées.

Il accroît la dureté à chaud dans toute l'échelle de température allant de l'ambiante à 600°C et retarde le sur vieillissement de l'acier au-delà du durcissement secondaire. Il améliore également la résistance à l'oxydation catastrophique de l'acier lors du chauffage entre 1000 et 1100 °C, surtout pour des teneurs supérieures à 5 %.

Chapitre 1 : Étude des aciers rapides

Par contre, il diminue la ductilité de l'acier pour des teneurs supérieures à 3 % et à une action néfaste sur la trempabilité, si bien que les nuances à forte teneur en cobalt posent des problèmes d'obtention de dureté pour des outillages de dimensions importantes [1].

1.3.6 Le molybdène

Les aciers au molybdène ont pris une importance croissante pour la fabrication d'organes de machines. Le molybdène améliore les propriétés de résistance aux chocs des aciers trempés. Les recherches étendues et les résultats constatés font que le molybdène est maintenant le plus largement employé dans les aciers à haute résistance, en vue de leur maintenir une bonne résistance aux chocs et une bonne résistance aux températures élevées. Le succès des additions de molybdène est dû à plusieurs causes. L'une d'entre elles est d'éliminer pratiquement toutes tendances à la fragilité de revenu, après trempe, dans les aciers au Chrome-nickel et dans d'autres aciers spéciaux.. Sauf dans les aciers pour outils, où la teneur en molybdène peut atteindre 10%, en remplaçant du tungstène, les additions de molybdène ont rarement besoin de dépasser 1% pour produire leur maximum d'effet utile et souvent, elles sont beaucoup plus faibles. Ainsi, de nombreuses variétés d'aciers spéciaux contiennent seulement de 0.15 à 0.40% de molybdène. Sa solubilité à 1440° C est de 24%. A la température ordinaire, elle est de 4%.

	Carbone	Cobalt	Chrome	Molybdène	Tungstène	Vanadium
Résistance à la traction	↗		↗	↗	↗	↗
Limite élastique		↗	↗	↗	↗	↗
Résistance à l'usure	↗		↗		↗	
Résistance à la fatigue						↗
Résilience	↘		↘			↗
Dureté à froid	↗		↗		↗	↗
Dureté à chaud		↗		↗	↗	
Allongement A%			↘			

Tableau 1.1 : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers Rapide

1.4 Classification des outils coupants

L'outil coupant est le terme générique désignant les outils coupants pour les tours, les fraiseuses et raboteuses. Leur applications est nombreuses et leur construction est différente, selon leur usage, on distingue deux classes

1. **Outils à arête 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.
2. **Outils à arête multiples** : Ces outils comme leur nom l'indique possèdent plusieurs arêtes tranchantes et sont de forme cylindrique. On les utilise dans les opérations de perçage, d'alésage et de fraisage où le mouvement de coupe est leurs attribué.



a) Outil de tournage



b) Fraise à deux tailles

Figure 1.2 : Exemple d'outil de coupe

1.5 Conditions techniques des outils coupants

Les conditions techniques des outils coupants sont les bases de fabrication et de réception des outils coupants, elles comprennent les exigences techniques, les règles de réception, le marquage et l'emballage, etc. Nous présentons ci-après la partie principale des exigences techniques.

- La partie active de l'outil coupants ne doit pas présenter la lamellation, la crique, l'éraflure la bavure, l'endommagement de choc et l'amorce de rouille ; s'assurer que la surface rectifiée est exempte de la tache noire et de la brûlure et que les lames d'outils en métal dur sont exemptes des stries.
- La surface non rectifiés doit subir le sablage ou le bleuissage après le traitement thermique, et il ne doit pas présenter les souillures sur les filets intérieurs.

- L'arête coupante doit être acérée sans partie émoussée et ébréchure.
- Les centres d'usinage et la contre-pointe doivent être rodés avec soin, en s'assurant de l'absence de faux rond et de l'endommagement.
- Les outils coupants rectifiés sur la table magnétique doivent subir la démagnétisation.
- L'outil coupant traité peut présenter la trace légère de redressage.

1.6 Particularités technologiques de la fabrication des outils coupants

1.6.1 Précision

La précision de fabrication des outils coupants est généralement plus haute que celle de fabrication mécanique courante. Surtout pour l'alésoir, la broche, les outils de formes, les outils à fileter, ils exigent non seulement la bonne précision dimensionnelle, mais aussi la bonne précision géométrique. Ainsi, au cours de la fabrication des outils coupants, il faut bien assurer leur précision, sinon, cela influe directement sur la qualité des pièces à usinées [2].

1.6.2 Etat de surface

L'état de surface des outils coupants se rapporte directement à la durée d'utilisation des outils et à la qualité des pièces usinées. Si l'état de surface des outils coupants est bon, la durée d'utilisation est longue, et la qualité des pièces usinées est bonne. A cet effet, en cours de la fabrication des outils coupants, il faut satisfaire les exigences prescrites dans les documents, et prendre les mesures nécessaires pour améliorer l'état surface des outils coupants [2].

1.6.3 Dureté

Comme les outils coupants sont utilisés pour l'usinage de coupe, ils doivent porter une très bonne dureté, en général, la dureté est au-dessus 60 HRC. Généralement parlant, la dureté des outils coupants dépend de la nature de matière et du traitement thermique des outils coupants, mais dans la fabrication des outils coupants le procédé d'usinage influe aussi sur la dureté des outils coupants, en particulier la rectification après le traitement thermique, la profondeur de passe trop grande, la vitesse d'avance trop rapide, l'influence des liquides d'arrosage, le choix des meules non convenable. Tout cela peut causer l'abaissement de la dureté des outils coupants, par suite, l'aptitude de coupe et la durée d'utilisation des outils coupants subiront l'influence. Ainsi, lors de la rectification, il faut éviter la brûlure des outils coupants [2].

1.6.4 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) [3].

1.6.4.1 Vitesse de coupe

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

1.6.4.2 Avance

Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil [3].

1.6.4.3 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.

1.6.4.4 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).

1.7 Micro dureté

A la différence des minéraux dont la dureté est historiquement caractérisée par rayage on utilise généralement des essais de rebondissement ou de pénétration pour caractériser la dureté des métaux [4].

Les essais de dureté par pénétration sont les plus couramment pratiqués. Le principe est toujours identique un pénétrateur indéformable laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté.

Dans une première approche, on peut relier de manière assez simple la limite d'élasticité avec la surface de l'empreinte: plus l'objet pénétrant s'enfonce, plus la surface S de pression

s'agrandit, donc la force F étant constante, plus la contrainte diminue. Lorsque la contrainte n'est plus suffisante pour déformer plastiquement le solide à tester, l'objet pénétrant s'arrête, et on a donc :

$$R_e = \frac{F}{S}$$

Les valeurs de dureté obtenues grâce aux différents protocoles et dispositifs d'essais indiqués ci-dessous sont cette limite d'élasticité R_e mais les résultats ne sont pas identiques car ces calculs simplifiés prennent en compte la surface de la projection de l'empreinte (comme un disque ou un carré) au lieu de prendre en compte la vraie surface de l'empreinte (comme la surface de la calotte sphérique ou des facettes de l'empreinte pyramidale). Un essai Brinell et un essai Vickers sur la même éprouvette ne donnent pas la même valeur en résultat, mais en ramenant par le calcul la valeur de la force à la vraie surface de l'empreinte (respectivement).

1.7.1 Essai de dureté Brinell

L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force F un pénétrateur ayant une forme de bille dans un métal afin d'en déduire la dureté de ce matériau.

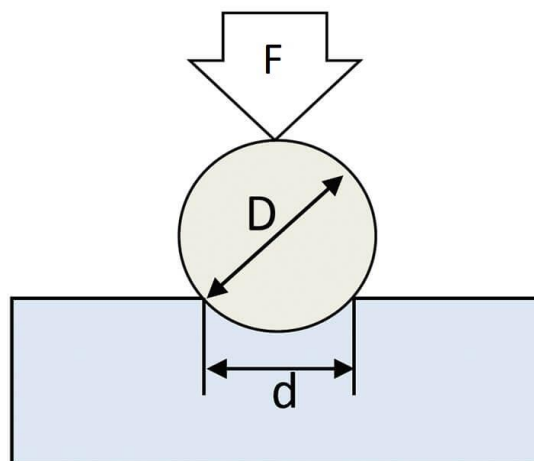


Figure 1.3: Essai de dureté Brinell

Les méthodes d'essai de dureté Brinell sont définies dans les normes suivantes : ASTM E10 et

Chapitre 1 : Étude des aciers rapides

ISO 6506. Il est recommandé aux opérateurs de disposer d'un exemplaire à jour des normes applicables car elles font régulièrement l'objet de révisions.

L'essai de dureté Brinell consiste à appliquer une charge ou force constante, comprise entre 187,5 et 3 000 Kgf, pendant une durée déterminée (entre 10 et 30 secondes), avec une bille en carbure de tungstène de 2,5 ou 10 mm de diamètre généralement (Figure 1.2).

Un temps de maintien de la charge est nécessaire pour laisser passer la phase élastique du métal. Des forces inférieures et des billes de diamètres plus petits sont également possibles dans certaines applications spécifiques. Comme dans les essais de dureté Knoop et Vickers, une seule charge d'essai est appliquée pour la dureté Brinell. Après le retrait de la charge, le diamètre de l'empreinte laissée est mesuré à intervalle de 90° à l'aide d'un microscope de faible puissance ou d'un dispositif de mesure automatique et le calcul de la moyenne fournit la valeur de dureté.

La formule utilisée pour calculer la valeur de dureté Brinell (HB) réelle à partir des dimensions de l'empreinte et de la charge d'essai est la suivante :

$$HB = \frac{2F}{\frac{\pi D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Où F est la charge, D est le diamètre de la bille du pénétrateur et d est le diamètre de l'empreinte. Il n'est pas nécessaire de procéder au calcul pour chaque essai. Il existe des tableaux qui indiquent la valeur de dureté en fonction des diamètres d'empreinte, de la charge et du diamètre de bille. Cette tâche peut en outre être automatisée grâce à différents systèmes de mesure de dureté Brinell automatiques.

1.7.2 Essai de dureté Vickers

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136°. L'empreinte a donc la forme d'un carré.

On mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur de d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalement utilisées.

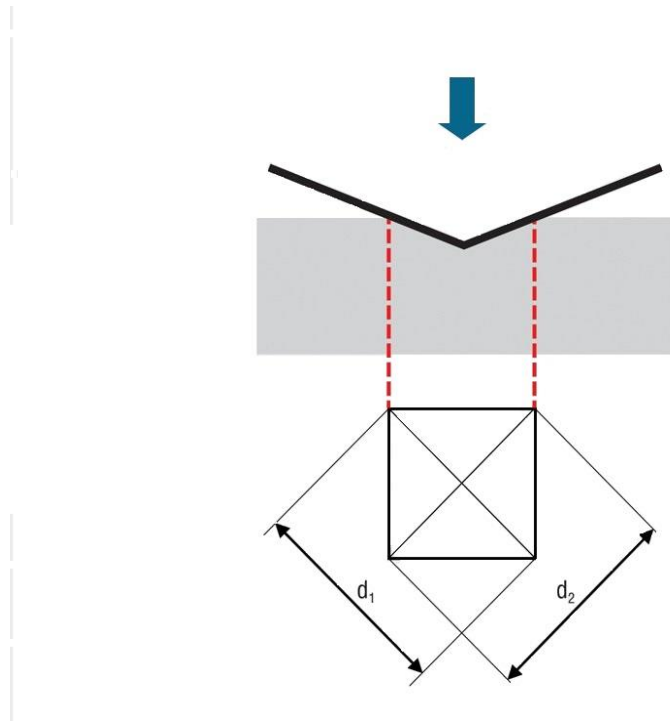


Figure 1.4 : Essai de dureté Vickers

Hv : dureté Vickers

- d^1 et d^2 : mesure de l'empreinte réalisée à 90° (2 diagonales du carré de l'empreinte) (mm)
- F : charge d'essai (N)
- g : accélération de la pesanteur

$$Hv = \frac{1}{g} \frac{\text{Charge d'essai}}{\text{Aire de l'empreinte}}$$

$$Hv = \frac{1}{g} \frac{2F \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2}$$

$$Hv = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

Le degré de dureté, noté Hv , est ensuite lu sur un abaque (une table) . il y a un abaque par force d'appui [4].

1.7.3 Essai de dureté Rockwell

Chapitre 1 : Étude des aciers rapides

L'essai se déroule en trois phases :

- Application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0 = 98\text{N}$ (soit 10kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale. Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell.
- application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P .
- relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

La valeur de e étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force F_1 . La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

- **Échelle B, E et F**

$$HRB = 130 - e$$

- **Échelle C**

$$HRC = 100 - e$$

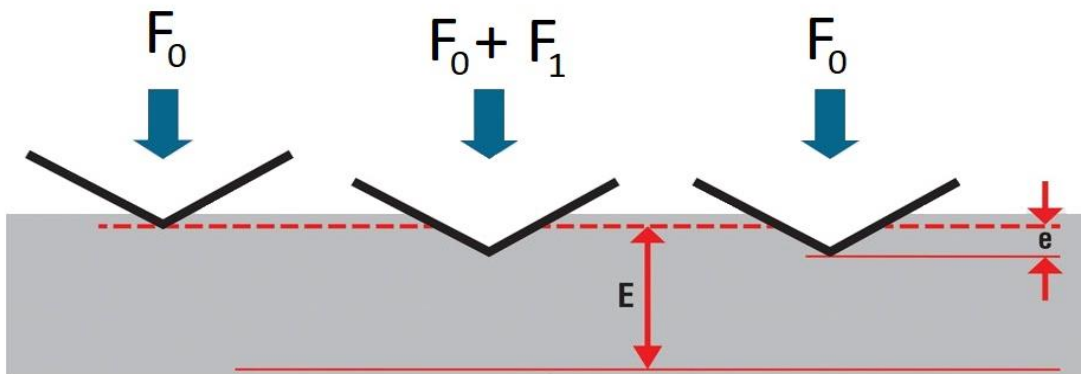


Figure 1.5 : Essai de dureté Rockwell

1.8 Structures métallographiques des aciers [5]

L'étude métallographique est un moyen de contrôle essentiel de la structure micrographique des matériaux métalliques. Toute étude de matériaux métalliques passe presque toujours par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux leurs afférentes caractéristiques mécaniques. Toutes les étapes de la vie d'un matériau sont concernées. Mise au point, utilisation, détérioration par corrosion, fatigue, rupture, etc.

1.8.1 Austénite

L'austénite est une solution solide de carbone dans le fer gamma la quantité de carbone atteint 1.7 % à 1145°, ce constituant n'existe pas à la température ordinaire, il est stable qu'à haute température, il ne peut exister à la température ambiante que par un maintien hors équilibre à la faveur d'éléments d'alliage tel que par exemple Ni et Mn (aciers austénitiques), l'austénite est très ductile, entre 240 - 300 HB [6]. Cette dernière est représentée sur la (Figure 1.6).

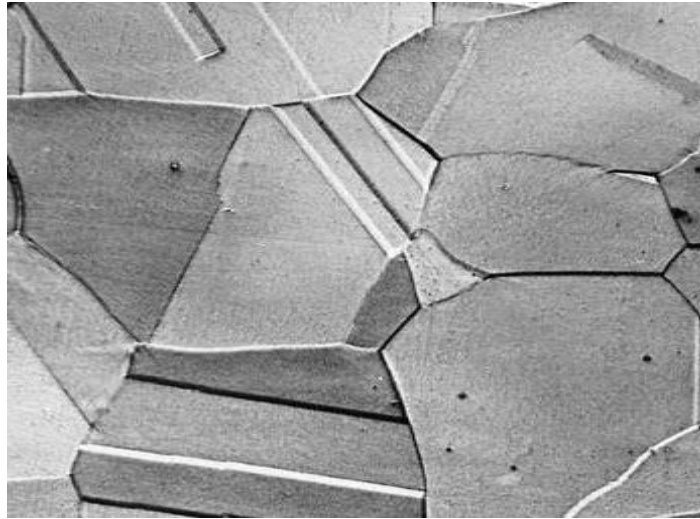


Figure 1.6 : Austénite d'un acier 1,70%

1.8.2 Cémentite ou Carbure de Fer

La cémentite est un composé cristallin de fer et de carbure de fer - Fe_3C , elle peut contenir des éléments tel que le Cr, la cémentite est magnétique jusqu'à 210°, elle apparaît en blanc après attaque au Nital sans que l'on puisse distinguer les joints de grains. Elle est colorée en rouge brun par le picrate de sodium. C'est une combinaison très dure ($H_v=800$) mais très fragile $A=0\%$, $R_m=700N/mm^2$ Elle a donc une très bonne tenue à l'abrasion et à l'érosion. Elle est très présente dans d'autres constituantes perlites, troostite, sorite [6]. Sa microstructure est illustré sur la (Figure 1.8).

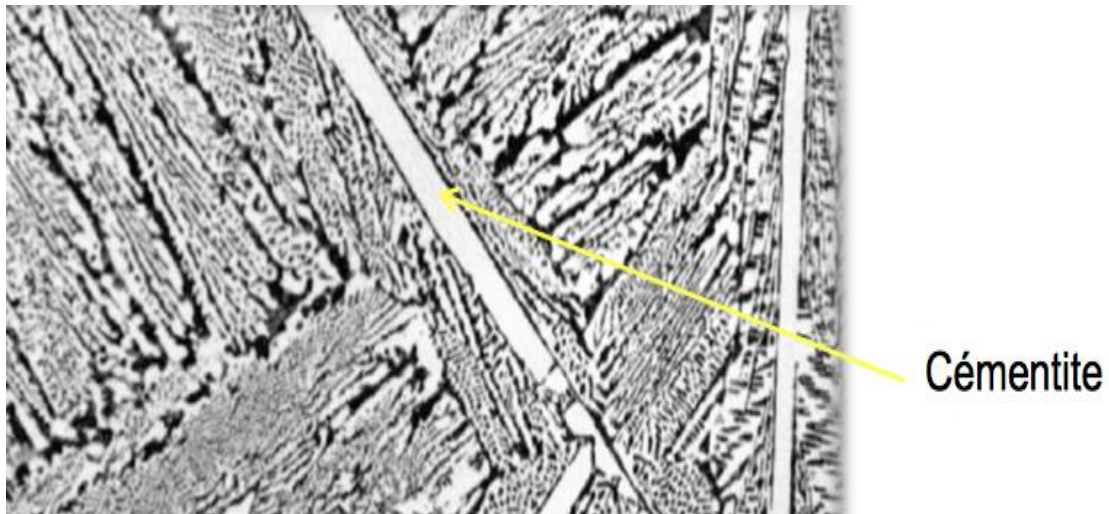


Figure 1.7 : Cémentite Fe³C [6]

1.8.3 Perlite

La perlite est un agrégat de ferrite et de cémentite à 0.85% en masse de carbone (eutectoïdes) qui peut avoir deux aspects: lamellaire ou globulaire (ou coalescée),(voir figure. **et **) elle ne dissout pas le carbone, elle est magnétique est ductile, dureté(HB=200-250), traction ($R_m \sim 830 \text{ N/mm}^2$) allongement ($A\% \sim 10$), facile à usiner elle offre une assez bonne résistance aux efforts statiques et à l'usure par frottements. Sous sa forme globulaire, elle se présente sous la forme d'une matrice ferritique, dans laquelle sont enchâssées des particules de cémentite. Sous sa forme lamellaire des lamelles de ferrite et de cémentite dont l'épaisseur et les écarts dépendent de la vitesse de refroidissement. On distingue une alternance de bandes claires et sombres qui ne représentent pas les constituants mais correspondent aux zones planes et inclinées de l'échantillon, provoquées par l'abrasion préférentielle causée par le polissage. A faible grossissement, les lamelles peuvent ne pas être distinctes [6].

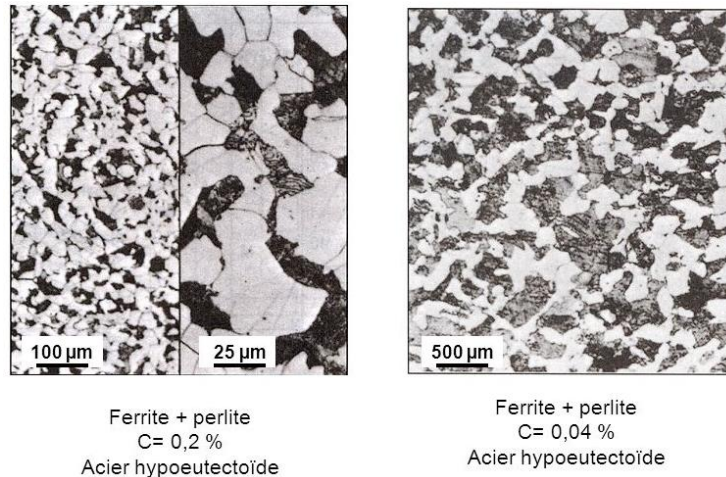


Figure 1.8 : Structure perlitique

1.8.4 Troostite

La troostite est un agrégat lamellaire semblable à la perlite, mais de dimension microscopique et de dureté plus élevée, dureté supérieure à 400HB, souvent on rencontre la troostite avec la martensite, elle est précipitée par une trempe douce au cours de la décomposition de l'austénite [7].

1.8.5 Martensite

La martensite est un constituant de trempe engendré au cours de la décomposition de l'austénite, la structure se présente sous la forme d'aiguilles, la martensite est une ferrite au réseau détendu sursaturé de carbone, elle est très dure entre 500 - 650 HB selon la teneur en carbone, et difficilement usinable (Figure 1.10) [7].

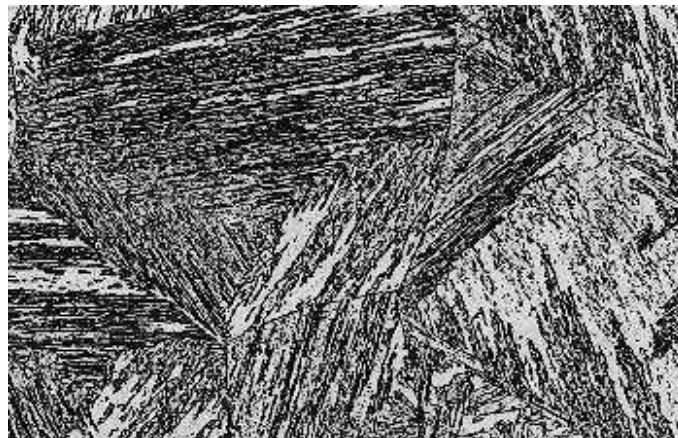
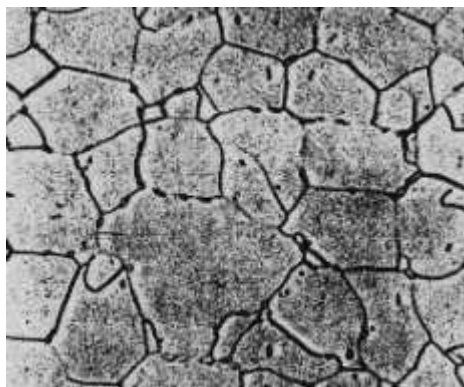


Figure 1.9 : Martensite [7]

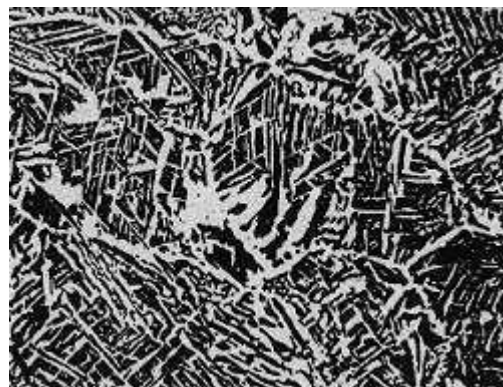
1.8.6 Ferrite

La ferrite est une solution solide de carbone dans le fer α (structure cubique centrée) 0.005 % à 0.008% de carbone à température ambiante - environ 0.03 % à 720 °C.

La ferrite peut contenir en solution des éléments variés tel que le Cr-Ni-Si-P. Elle est ductile et malléable $H_v : 80 \text{ à } 100 \sim R_m=300\text{N/mm}^2 \sim A=35\%$ (allongement) la ferrite est magnétique jusqu'à 770 °C (point de curie) Après attaque au Natal, elle se présente sous forme de polyèdres blancs dont les joints de grains apparaissent en foncé (Figure 1.11) [8].



a) Structure perlitique dans un acier eutectoïdes [6] (Grossissement 200)



b) ferrite+perlite 0.3 carbone [6] (Grossissement 200)

Figure 1.10 : Formes de polyèdres de la ferrite

1.8.7 Bainite

Le bainite est un constituant de trempe intermédiaire, la structure à un aspect voisin de celui de la martensite, c'est un agrégat de ferrite et de carbures. C'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (ferrite et cémentite), mais de structure vraiment fine, Souvent en aiguilles (voir Figure 1.12) ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Elle est dure et plutôt facile à usiner. La bainite supérieure est une microstructure constituée de fines plaquettes de ferrite, chacune ayant environ 0.2 micromètres d'épaisseur sur 10.

La bainite inférieure présente une microstructure et des caractéristiques cristallographiques très proches de celles de la bainite supérieure. La principale différence étant que les particules de cémentite précipitent dans les plaques de ferrite la bainite granulaire est l'absence principalement de carbures dans la microstructure. Le carbone est rejeté dans l'austénite qui la stabilise, de telle sorte que la microstructure finale contient de l'austénite, un peu de martensite ceci à haute teneur en carbone, plus de la ferrite [8].

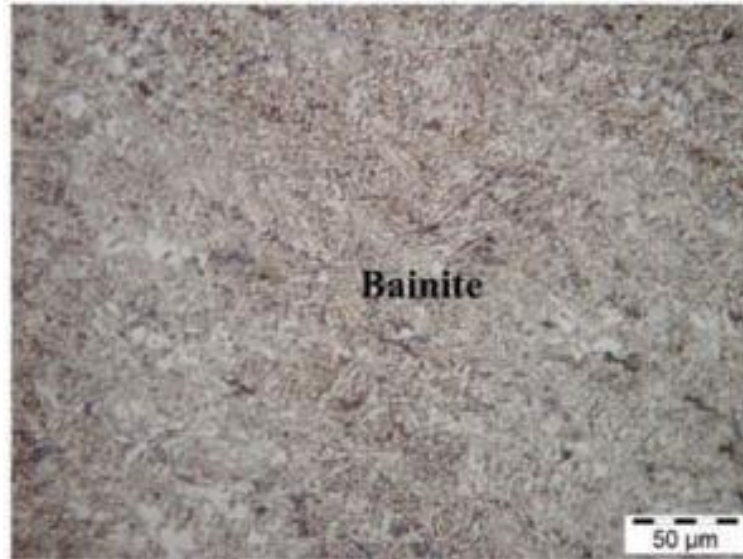


Figure 1.11 : Bainite dans un acier de 0.22% carbone [8]

1.8.8 Sorbite

Constituant extrêmement fin qui se forme au cours du réchauffage d'un acier trempé martensitique (revenu), sa structure est constituée par de fins carbures de fer (Fe_3C cémentite) dans une matrice ferritique, la sorbite possède une bonne résilience dureté 250-400 HB [9].

1.8.9 Fer α

C'est un état stable du fer pur en dessous de 960°C . Il a une structure cristalline cubique centrée [10]. Il ne dissout pratiquement pas le carbone, il est doux, très malléable et magnétique.

1.8.10 Fer γ

État stable du fer entre 960°C et 1400°C . De structure cristalline cubique à faces centrées. Il dissout facilement le carbone, il est paramagnétique [10].

Chapitre 2

Traitement thermique

2. Traitement thermique

2.1 Introduction

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes:

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_{em} , R_e , A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs
- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) casok des matériaux ayant subi le forgeage
- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage.

Dans cette étude, nous allons nous intéresser à étudier le traitement thermique ordinaire trempe,

revenu, recuit et normalisation [11].

2.2 Définitions et procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de : (Figure 2.1).

- L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation.
- Maintient à une température définie.
- Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - Lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

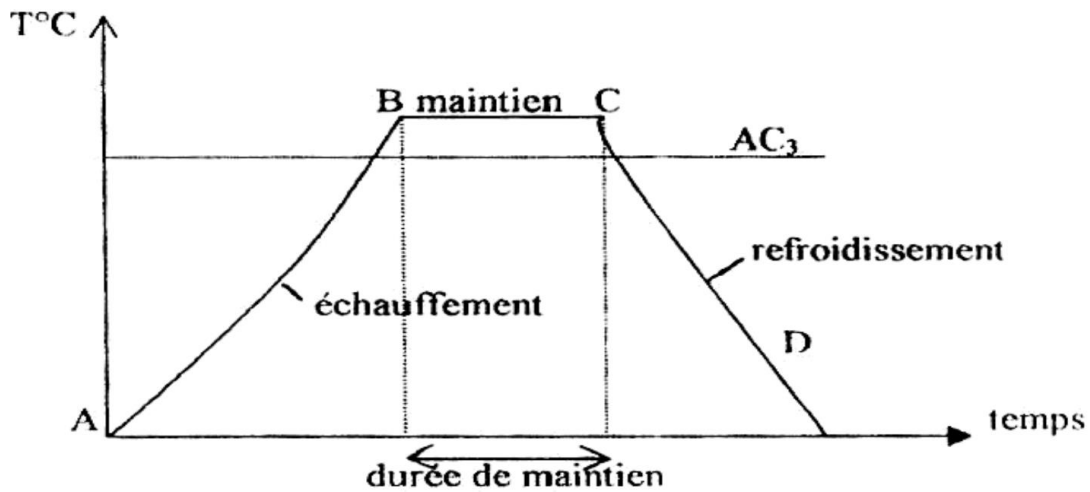


Figure 2.1 : Procédé du traitement thermique

2.2.1 Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces.

1. Par transmission de la chaleur:

On distingue trois possibilités:

- **Par conductibilité:** La pièce est chauffée dans un four ordinaire où elle est en contact qu'avec le sol du four, elle ne reçoit par conductibilité qu'une petite quantité de chaleur dépensée.
- **Par convection:** Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dépensée.
- **Par rayonnement:** La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four est rayonnée vers la pièce qui l'absorbe. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important.

Dans la plupart des cas, le chauffage des pièces, est effectué simultanément par convection et rayonnement.

2. Par production de la chaleur dans la pièce:

C'est une possibilité de chauffer la pièce en créant dans cette dernière un flux de courant, soit par l'utilisation de la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou l'emplacement de la pièce dans un champ variable (chauffage par induction) comme le montre (figure**).



Figure 2.2: Chauffage des pièces par transmission de la chaleur

Cette méthode est utilisée surtout pour les pièces à sections petites et uniformes. On peut obtenir des vitesses de chauffage très élevées.

Les difficultés qui peuvent se présenter lors d'un chauffage rapide sont les fissures et tirages des pièces à la suite de la différence de dilatation de la couche extérieure et du cœur de la pièce où se créent des contraintes pouvant provoquer des fissures pour des températures basses et des déformations plastiques pour des températures élevées.

Quelque soit le procédé de chauffage utilisé, il existe toujours une différence de température dans les différentes parties de la pièce. Répartition de la chaleur non uniforme.

2.2.2 Refroidissement des pièces

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration et d'étirage des pièces.

La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminée selon le diagramme TTT (Température, Transformation, Temps). Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante. L'eau chaude se trouvant constamment remplacée par de l'eau froide arrivant par le bas du bac.

On utilise aussi les jets permettant de régler le refroidissement des pièces sur toute leur surface,

et enfin des chambres spéciales avec production du brouillard obtenu par jet d'eau et d'air sous pression, surtout utilisé en aviation pour le traitement de certaines pièces en aluminium.

2.3 Diagramme fer-cémentite

Diagramme de phase fer-cémentite, permettant de visualiser les conditions d'existence des formes d'acier. On remarque que la structure du fer pure dépend de la température en dessous de 721°C et au-dessus de 1400°C le fer α a une structure cristalline cubique centré (structure cristalline à température ambiante). Entre 721°C et 950°C jusqu'à 1400°C le fer γ a une structure cristalline cubique à faces centrées.

La trempe des aciers comporte un chauffage jusqu'au-delà de la température d'austénitisation, un maintien à cette température pendant un temps déterminé et un refroidissement à une vitesse déterminée. Dans ce procédé intervient la mise en solution de précipités qui ont, de manière générale, des dimensions trop importantes pour obtenir finalement un durcissement optimal. C'est ici que le procédé d'austénitisation joue son rôle principal. Cette température doit être choisie de manière à assurer une bonne répartition des éléments d'alliage, ce qui assure un durcissement homogène. C'est pour cela qu'il est important, lors de la conception de pièces destinées à être trempées, de veiller à avoir une forme homogène de la pièce, afin d'éviter des concentrations de matière en certaines parties, qui peuvent poser problème lors du traitement thermique. Dans le domaine austénitique, le fer a une structure cubique à faces centrées (fer γ) qui possède des sites interstitiels plus grands que dans la structure cubique centrée (fer α), ce qui permet au carbone de se dissoudre beaucoup mieux dans le fer γ que dans le fer α . Si on le soumet maintenant à un refroidissement lent et en équilibre, il y aura précipitation du carbure et on retournera à l'état initial avant l'austénitisation, chose qui ne nous intéresse pas car on n'aura pas obtenu le durcissement souhaité. Par contre, si le refroidissement se produit à une vitesse assez rapide (gouvernée par différentes variables qu'on abordera plus tard), la précipitation est empêchée et en conséquence la matrice de fer est contrainte par les atomes de carbone. De cette façon, on obtient le durcissement. Ce traitement de trempe transforme l'austénite en martensite, qui présente une dureté proportionnelle à la teneur en carbone. De même, en fonction de la teneur en carbone du matériau, d'autres éléments peuvent apparaître, comme la bainite. En même temps, ce durcissement provoque aussi des effets indésirables comme par exemple une augmentation de la fragilité du matériau (résilience). C'est pour cette raison qu'après la trempe martensitique, on effectue toujours un revenu (au minimum un revenu de détente aux environs de 200°C). Après une trempe bainitique (ou trempe isotherme), le revenu est inutile.

De nombreuses variables influencent la qualité et les propriétés mécaniques de l'acier trempé

Chapitre 2 : Traitement thermique

et elles sont toutes importantes à maîtriser :

- La température de trempe
- Le temps de trempe
- Le taux de refroidissement
- La composition chimique du matériau

De plus, au cours de la trempe il apparaît certains problèmes qu'on doit éviter ou contrôler selon la qualité du produit final à obtenir. Au cours du chauffage la température n'est pas homogène dans la pièce (plus chaude sur la peau et plus froide au cœur). Ce gradient de température provoque des contraintes internes qui peuvent entraîner des déformations élastiques voire plastiques. Pendant le refroidissement il existe aussi un gradient de température, mais de sens contraire. La transformation allotropique dont nous avons parlé ci-dessus (fer γ \Rightarrow fer α) implique aussi une déformation. À ce moment on assiste à une contraction volumique importante. On doit prêter beaucoup d'attention à ce point parce que comme la déformation est importante, elle peut provoquer des fissures en surface de la pièce. La résistance à la compression n'est pas la même qu'à la traction et le risque de fissuration est donc différent. C'est pour cette raison que le risque est présent particulièrement pendant le chauffage (il engendre des efforts de traction à la surface), mais on doit aussi contrôler le refroidissement (il engendre des contractions à la surface). C'est le liquide de Trempe (entre autres) qui détermine la vitesse de refroidissement. Un autre type de problèmes possibles lors de la réalisation d'une trempe sont les réactions avec l'atmosphère. Si on met l'acier en contact avec l'air, il peut y avoir décarburation et formation de calamine. L'acier peut être exposé à ces conditions non seulement pendant le chauffage mais aussi pendant le refroidissement (l'air libre est aussi un milieu de trempe). En connaissant les avantages et inconvénients de la trempe à l'air.

On peut décider s'il vaut mieux choisir un liquide de trempe qui ne présente pas ces effets et en assumer les coûts (Figure 2.3) [12].

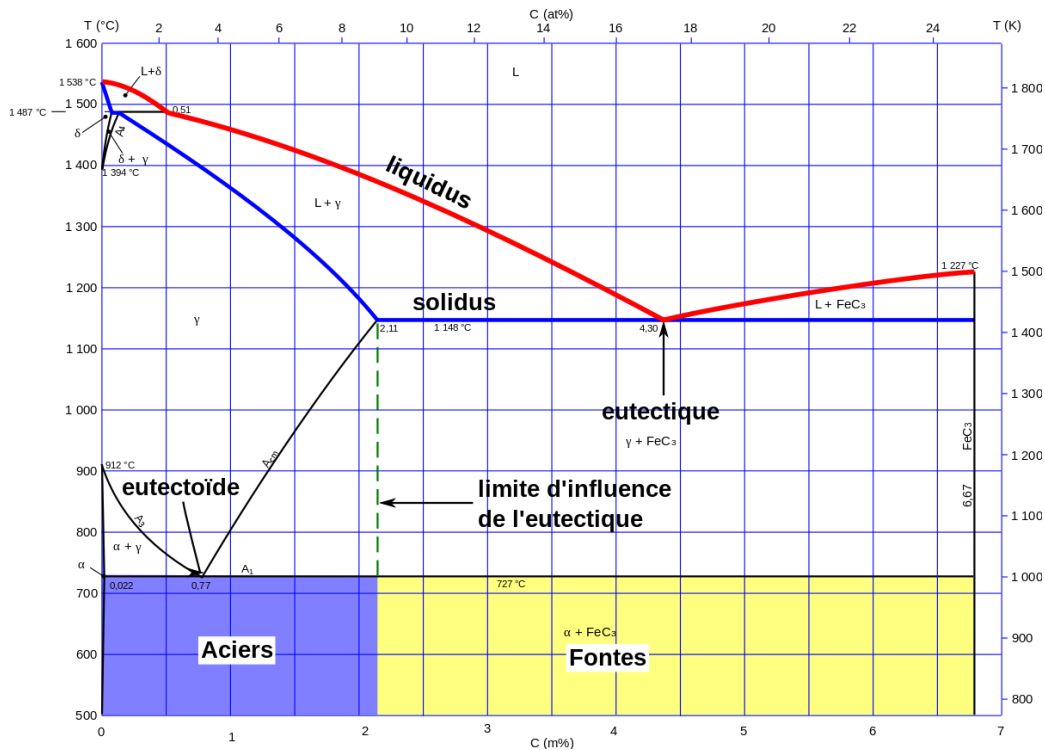


Figure 2.3 : Diagramme de phase Fer- cémentite

2.3.1 Trempe

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénites et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C. La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier (cf. essai Jominy).

Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans l'eau de 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérent à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente. Le refroidissement

Chapitre 2 : Traitement thermique

rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit.

Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion. Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de me un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion). Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille. L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation $\alpha - \gamma$. Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en Conditions isothermes, Température-Temps- taux de Transformation, Figure 2.4) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, voir Figure 2.5) dans le cas des trempes.

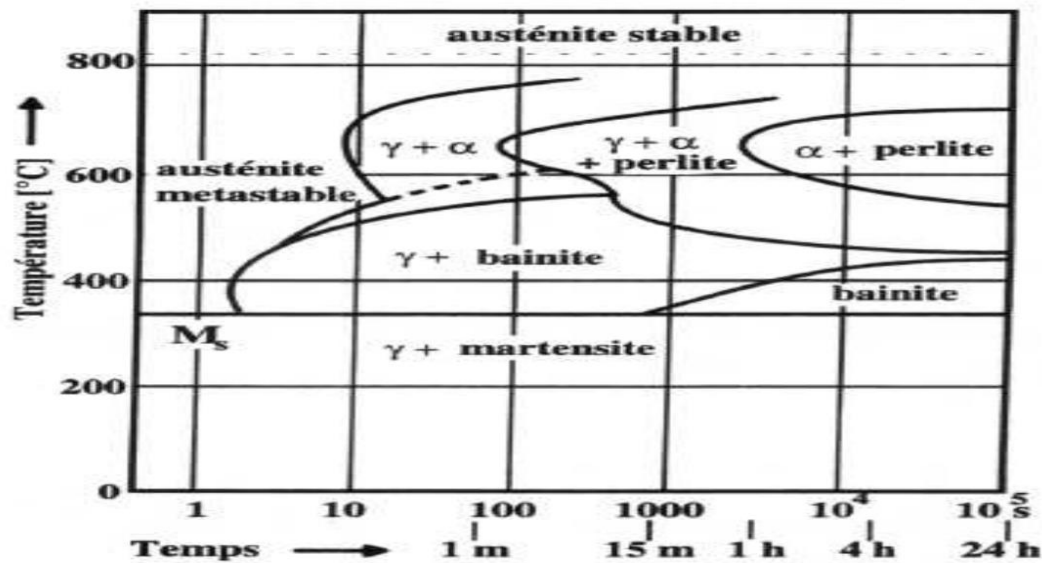


Figure 2.4 : Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C)

2.3.2 Revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe). D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

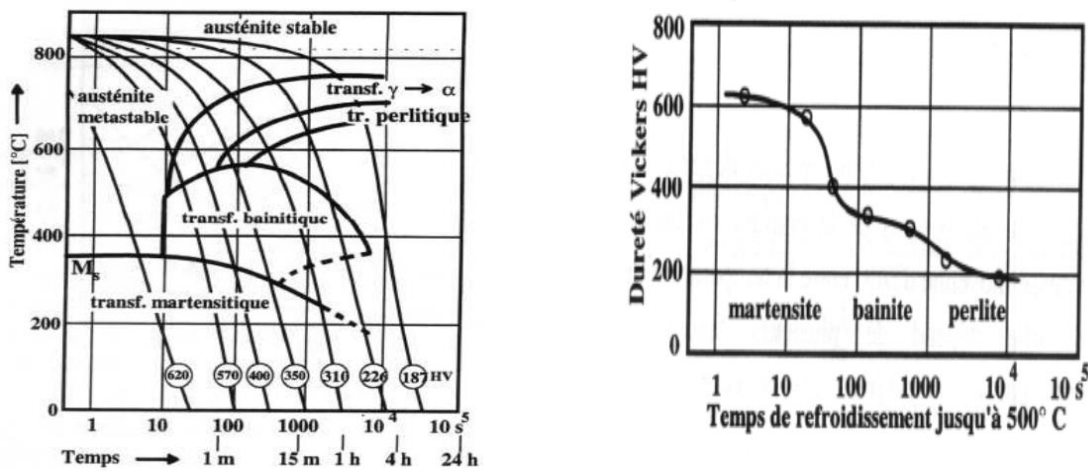


Figure 2.5 : Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement.

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la

Chapitre 2 : Traitement thermique

température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier.

Le diagramme montré en (Figure 2.6) correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation des pièces de construction fortement sollicitées (arbres, engrenages). En particulier il s'agit de l'acier 40NiCrMo6 qui a la composition : 0.4% C, 1.4% Ni, 0.8% Cr et 0.4% Mo.

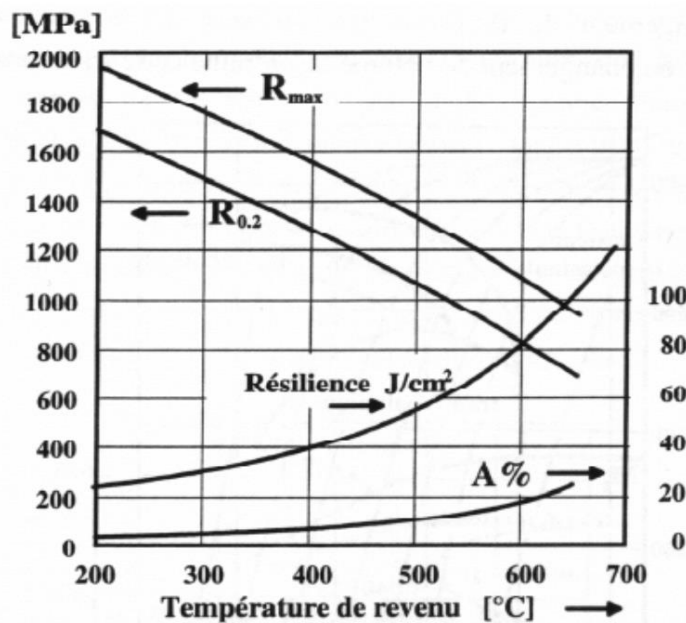


Figure 2.6: Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6

2.3.3 Recuit

Le terme de recuit comporte l'idée de réaliser un état stable à froid ou de tendre vers cet état s'il a été perturbé par des traitements thermiques ou thermomécanique antérieurs. L'état stable

à froid est constitué par un Mélange de ferrite de carbures dont la répartition varie suivant l'histoire thermomécanique antérieurs. En outre, du point de vue mécanique, l'état stable comporte l'absence de contraintes résiduelles. Suivant l'état structural ou mécanique de l'acier et l'objectif désiré, on peut distinguer plusieurs genres de recuit [13].

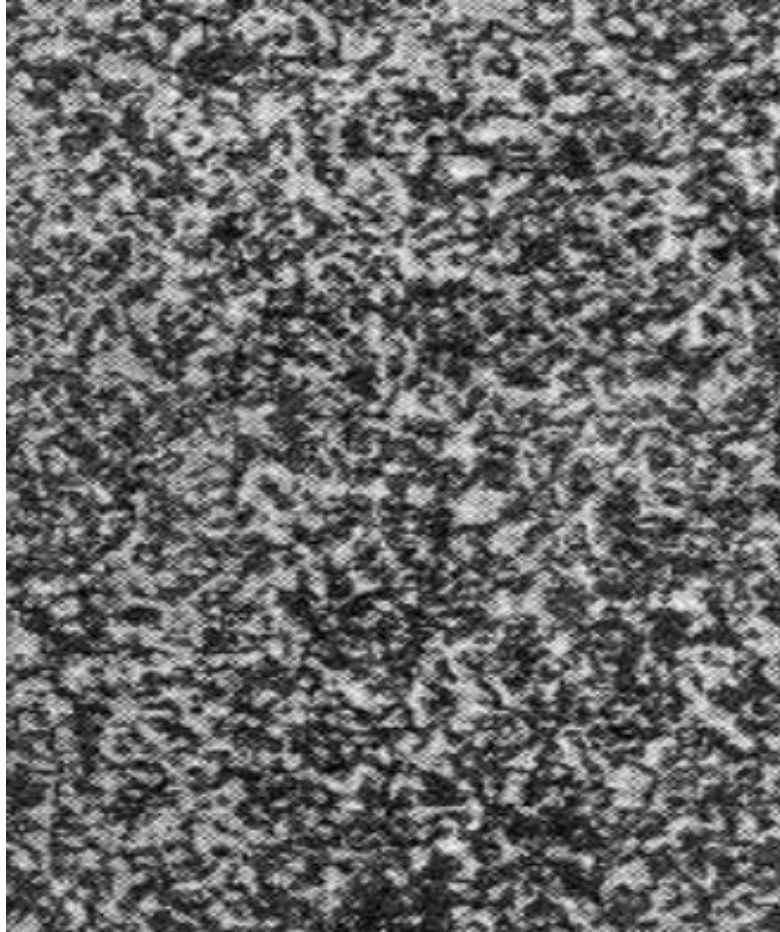


Figure 2.7 : Acier rapide déformé et recuit 500X

2.4 Essai de trempabilité par trempe en bout (Essai Jominy)

Les courbes de refroidissement (figure 2.8) montrent que la vitesse de refroidissement diminue très rapidement vers l'intérieur de l'éprouvette. Pour les aciers au carbone qui ont des courbes TRC ayant le nez du début de la transformation polémique déjà à environ une seconde (0.4 s pour 0,15% C jusqu'à 4 s pour 1% C), une trempe à l'eau ne provoque la formation de la

Chapitre 2 : Traitement thermique

martensite que sur une couche de 1 à 2 mm en dessous de la surface. On parle d'une mauvaise trempabilité.

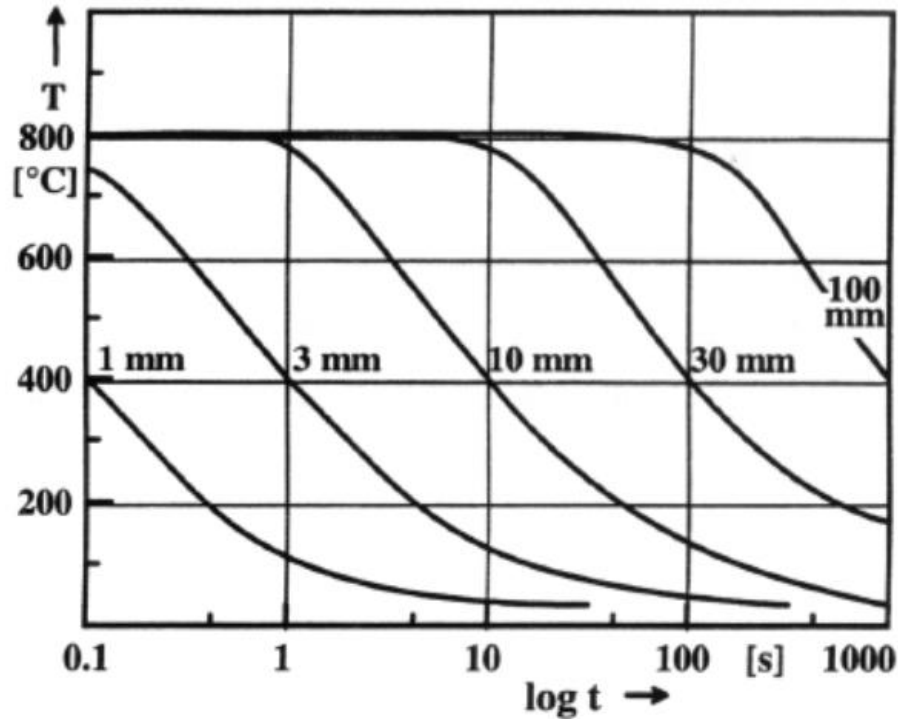


Figure 2.8 : Courbe de refroidissement à différentes profondeurs x de l'éprouvette Jominy

Pour remédier à cette insuffisance des aciers au carbone, on ajoute un faible pourcentage (0,5 - 5%) d'autres éléments, notamment Mn, Ni, Cr, Mo, V etc. (acier faiblement allié). A l'exception du Co et de l'Al, presque tous les éléments retardent la décomposition eutectoïdes et par conséquent la vitesse de transformation. Ceci a comme effet de déplacer les courbes TRC vers la droite (temps plus élevé) et d'augmenter la trempabilité. Par exemple, Pour l'acier de composition chimique Fe- 0,8% C- 0.6% Cr- 0.4% Mo le nez de la transformation se situe à 400 s. Un acier de bonne trempabilité ne permet pas seulement la réalisation d'une trempe à cœur mais permet d'effectuer la trempe dans l'huile au lieu de l'eau. La trempe à l'huile est un traitement moins brutal que la trempe à l'eau qui peut provoquer des fissures de trempe en raison des fortes contraintes thermomécaniques.

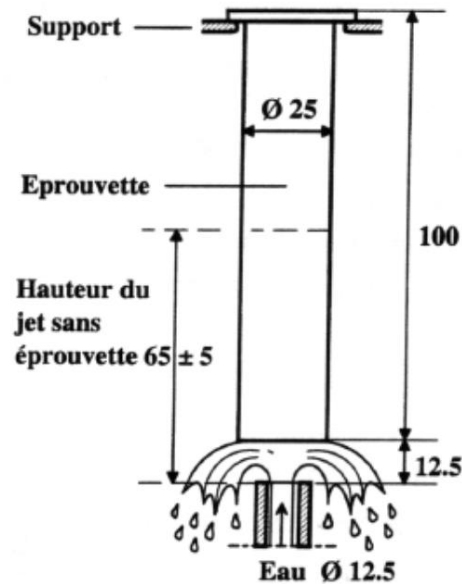


Figure 2.9 : Appareils de trempe selon Jominy

L'essai Jominy sert à mettre en évidence de façon simple et directe la trempabilité d'un acier. Par rapport aux diagrammes TRC, la méthode ne nécessite qu'une seule éprouvette par acier. Cette éprouvette en forme de barre d'une longueur de 100 mm et d'un diamètre de 25 mm, est d'abord chauffée et maintenue pendant 30 minutes à la température d'austénitisation. Après l'austénitisation, la barre est rapidement portée dans le dispositif de trempe (Figure **) où elle est suspendue verticalement au-dessus d'une buse, débitant de l'eau froide à pression fixe.

Après le refroidissement, qui doit durer au moins 10 min, on retire l'éprouvette pour la refroidir complètement à l'eau et meulage (sans échauffement) un plat le long d'une génératrice de la surface cylindrique.

Pour évaluer l'effet des différentes vitesses de refroidissement, on détermine la dureté en fonction de la distance x mesurée à partir du bout refroidi (Figure 2.9).

2.5 Défaut de traitement thermique

Aux températures élevées, l'erreur de mesure de la température augmente et par conséquent les risques de surchauffe ou de brûlure augmentent également. La brûlure correspond à une

Chapitre 2 : Traitement thermique

température supérieure à celle de la surchauffe. Après trempe, la température est estimée en fonction de la grosseur de grain. Après revenu, comme il est difficile de voir avec précision le contour des grains, la température est estimée en fonction de la grosseur des carbures et de leurs dispersions.

Plus la température de trempe est élevée et plus la dispersion des carbures est meilleure après revenu. Les températures de trempe élevée sont nécessaires pour assurer une meilleure dissolution des carbures secondaires pour obtenir une austénite hautement alliée au Cr, Mo, V. ceci assure après trempe l'obtention d'une martensite à stabilité élevée au revenu, c'est-à-dire de la tenue à chaud. Cependant même avec un chauffage très poussé, il n'y a qu'une partie des carbures qui est dissoute. Plus la température de trempe est élevée, plus les températures de transformation martensitiques (MF et Ms) sont basses. Plus la longueur des aiguilles de martensite est importante, plus la quantité de carbures dissous dans l'austénite est importante et plus la quantité d'austénite résiduelle est importante.

Une deuxième trempe, sans risque d'apparition de fissure, n'est réalisable, qu'après un recuit complet, qui ramènera la structure à son état d'équilibre physico-chimique qui correspond à une dureté à inférieure à 250 HB. Un recuit complet, avant une deuxième trempe, est également nécessaires afin d'éviter la formation d'une structure fragile et à gros grain.

Les éléments d'addition carburigènes empêchent le grossissement des grains à des températures élevées le maintien des grains fins à des températures élevées croît avec la teneur des éléments carburigènes.

La grosseur des grains de l'acier HS 18-0-1 varie de la classe 10-11 pour une température de chauffage de 1270-1285°C, la grosseur des grains de la structure de recuit étant la classe 12. Pour une température de chauffage supérieure à 1285°C, la grosseur des grains sera supérieure

à la classe 10, la classe 9 étant obtenue pour une température supérieure ou égale à 1300°C [14].

2.6 Défauts de matière

2.6.1 Cémentite en lamelle (lamellaire)

La cémentite est une structure de recuit qui se présente dans les aciers à outils, de dureté très élevée et difficilement usinable.

Les aciers à outils subissent, avant livraison, au niveau de l'aciérie, un recuit de coalescence pour rendre la perlite globulaire et faciliter ainsi l'usinage. La classe de la perlite globulaire après le recuit doit être inférieure à 5, afin d'assurer une structure facilement usinable.

2.6.2 Carbure en réseau

Les carbures en réseau se forment lors de l'élaboration de la matière. Leur présence dans les aciers à outils, rend la matière très fragile. Les carbures en réseaux sont difficilement observables dans une structure formée essentiellement de perlite globulaire. Pour les mettre en évidence, il faut effectuer spécialement une trempe suivie d'un revenu. Lors de l'attaque chimique de la structure trempée et revenu, la seconde cémentite n'est pas attaquée, celle-ci est observée sur un fond noir. La classe du réseau de carbure, ne doit pas dépasser la classe 3.

2.6.3 Graphitisation

Ce phénomène se produit dans les aciers à outils au carbone. Les éléments non carburigènes ou empêchant la formation de carbures, favorisent la graphitisation. Par conséquent, l'acier trempé a une faible dureté. Ce phénomène peut être mis en évidence, par l'essai de cassure, qui

fait apparaître des points noirs. Ce défaut n'est toléré que pour une faible quantité de graphite globulaire

2.6.4 Carbures eutectiques en bande et en réseau

Ces carbures sont issus de la lédéburite, lors de l'élaboration de l'acier rapide la lédéburite est un mélange intime d'austénite et de carbures qui est un produit de la transformation eutectique de l'acier rapide liquide. Pour éliminer la lédéburite dont les propriétés sont mauvaises, l'aciérie recourt au forgeage à chaud, afin de briser la lédéburite en la transformation en carbures eutectiques en bande ou bien en réseau ces carbures, suivant leurs répartitions et leurs quantités, influent négativement sur la valeur de la résilience de l'acier. Puisqu'ils sont inévitables, ils sont donc tolérés pour les classes (Bande ≤ 5) et (Réseau ≤ 6).

2.6.5 structure non homogène :

Les aciers à outils coupants, doivent posséder une structure homogène et une répartition grains de la structure de recuit étant la classe 12. Pour une température de chauffage supérieure à 1285°C, la grosseur des grains sera supérieure à la classe 10, la classe 9 étant obtenue pour une température supérieure ou égale à 1300°C.

Chapitre 3

**Gamme d'usinage d'un
outil de tour
coudé droit**

3. Gamme d'usinage

3.1.1 Introduction

Le mode est en évolution perpétuelle et par conséquent le domaine de la fabrication mécanique n'échappe pas à l'exception. Les procédés de fabrication par enlèvement de matière par ses nouveaux techniques et techniques d'usinage ont permis de prendre le pas avec les autres domaines de fabrications comme : la déformation à froid, la déformation à chaud, le moulage, l'ajout de matière, etc.).

L'enlèvement de matière nécessite l'emploi d'un élément physique permettant d'extraire de la matière d'un volume de base appelé brut (bloc, barre, plaque, ...) dans le but d'obtenir une pièce finie ou semi-finie. Dans cette catégorie d'opérations se trouve plusieurs techniques comme le tournage, le fraisage, la rectification, l'électro-érosion...etc. [16].

3.1.2 Gamme d'usinage d'un outil à charioter coudé

cet outil permet de faire du chariotage, du dressage et du chan freinage.

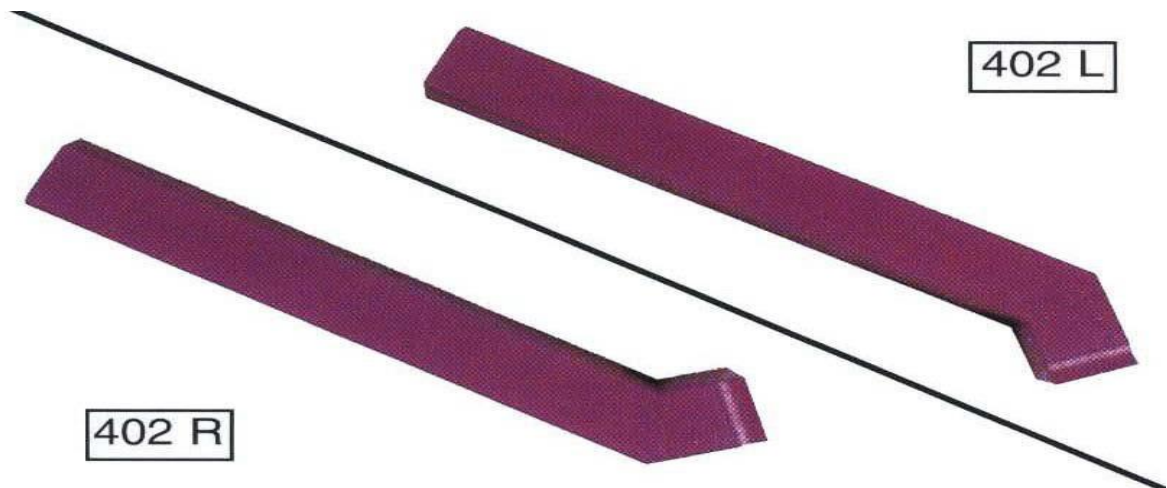


Figure 3.1 : Outil coudé à charioter

1. Etapes de réalisation d'un outil

(1) 1^e Etape :

Couper les deux matières (morceaux) :

- **Partie active** : Acier rapide (ARS) ;
- **Queue** : Acier au carbone selon le dessin.

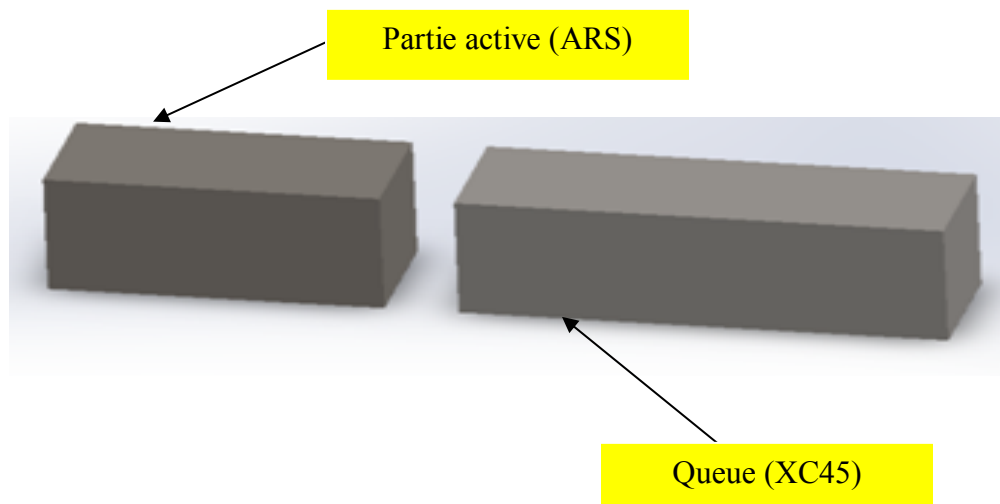


Figure 3.2: Débitage de la matière première (en HSS +X45).

(2) 2^e Etape : Soudage en bout

Souder les deux matériaux acier rapide et acier au carbone (HSS + X45).

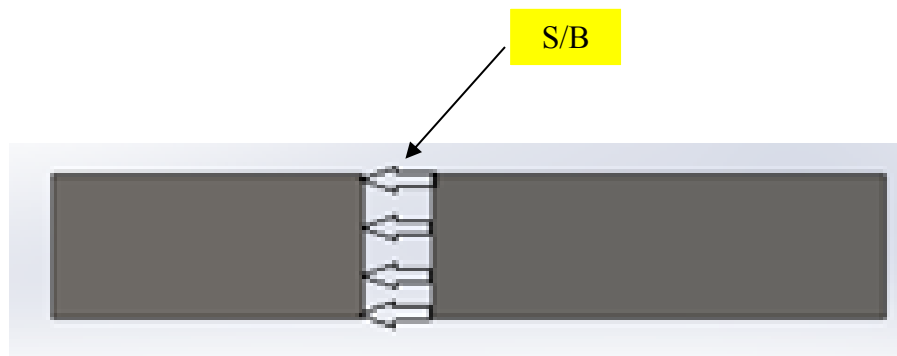


Figure3.3: Soudage en bout de deux morceaux.

Gamme d'usinage d'un outil de tour coudé droit

3^e Etape : Fraisage plan

Fraisage selon le dessin de définition :

- Longueur totale : 160mm ;
- Partie active : 66mm ;
- La queue : 106mm.

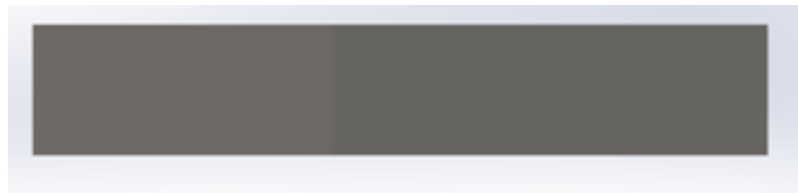


Figure 3.4 : Fraisage plan .

(3) 4^e Etape : Fraisage des angles (angle taillant – de coupe – de dépouille)

- Angle de coupe : 9° ;
- Angle de dépouille : 10° ;
- Angle taillant : 71°

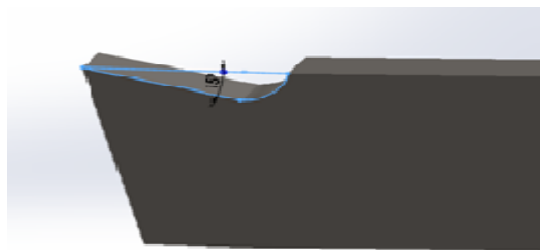


Figure 3.5 : Fraisage des angles.

5^e Etape : Contrôle de dimensions réalisées

Contrôler les angles réalisés par les opération de fraisag

Gamme d'usinage d'un outil de tour coudé droit

6^e Etape : Traitement thermique :

- Partie active : 62 à 66 HRC.
- Queue : 38 à 42 HRC.

(4) 7^e Etape : Contrôle de dureté des deux parties de l'outil :

- **Partie active** : 62 à 66 HRC ;
- **La queue** : 32 à 38HRC.

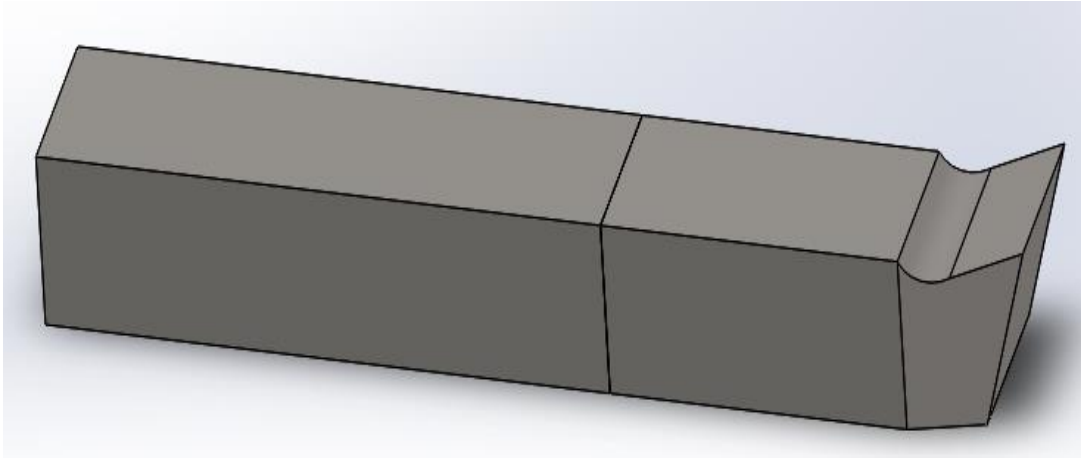


Figure 3.6 : Contrôle de dureté

9^e Etape : Affutage des angles de coupe, de taillant et inclinaison.

Gamme d'usinage d'un outil de tour coudé droit

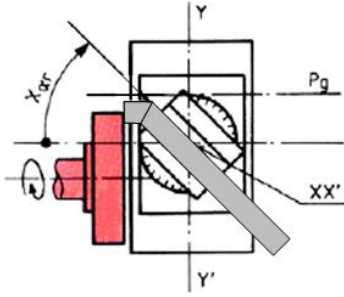
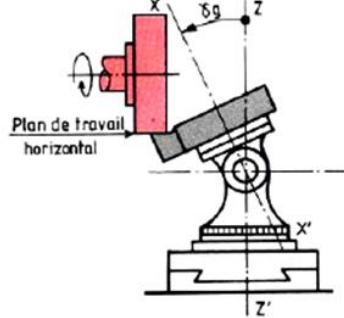
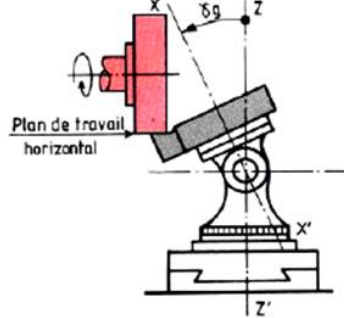
Opérations	Nature de l'opération	Justification	Schémas
1	Monter l'outil dans le porte outil, direction du corps \perp à yy' (yy' est \perp à l'axe de la meule)	Position de départ	
2	Orienter l'outil autour de l'axe xx' d'un angle: $\alpha_{\gamma r} = 70^\circ$ Rappel: Quand $\lambda_s = 0$ $\alpha_{\gamma r} = K_r$	L'intersection de la face de coupe A_γ avec la face d'appui (P_{r1}) est parallèle à l'axe de rotation yy' .	
3	Orienter autour de l'axe yy' de la valeur de l'angle γ_g $\gamma_g = 20^\circ$ Rappel: Quand $\lambda_s = 0$ $\gamma_g = \gamma_0$.	La face de coupe A_γ est dans le plan horizontal de travail de la meule.	

Tableau 3.1 : usinage de la face de coupe (Plan de travail horizontal)

Gamme d'usinage d'un outil de tour coudé droit

Opérations	Nature de l'opération	Justification	Schémas
1	Monter l'outil dans le porte outil, direction du corps \perp à yy'	Position de départ	
2	Orienter l'outil autour de l'axe xx' d'un angle: $\chi_{ar}=70^\circ$ Rappel: Quand $\lambda_s = 0$ $\chi_{ar}=K_r$.	L'intersection de la face de dépouille avec la face d'appui (P_{r1}) est parallèle à l'axe de rotation yy' .	
3	Orienter autour de l'axe yy' de la valeur de l'angle α_r $\alpha_r = 20^\circ 44'$ Rappel: Quand $\lambda_s = 0$ $\alpha_b = \alpha_0$.	La face de coupe A_α est dans le plan vertical de travail de la meule.	

Tableau 3.2 : usinage de la face de dépouille (Plan de travail vertical)

Gamme d'usinage d'un outil de tour coudé droit

Opérations	Nature de l'opération	Justification	Schémas
1	Monter l'outil dans le porte outil, direction du corps \perp à yy'	Position de départ	
2	Orienter l'outil autour de l'axe xx' d'un angle: $\alpha_{ar} = 83^{\circ} 26'$ Rappel: Quand $\lambda_s = 0$ $\alpha_{ar} = K_r$.	L'intersection de la face de dépouille avec la face d'appui est parallèle à l'axe de rotation yy' . $(P_y \perp yy')$	
3	Orienter autour de l'axe yy' de la valeur de l'angle γ_g $\gamma_g = 20^{\circ} 44'$	La face de coupe A_c est dans le plan horizontal de travail de la meule.	
4	Amener la limite arrière de la face de coupe parallèle au mouvement de translation de la table par une rotation de l'axe zz'	Cette rotation permet un affûtage de la face de coupe sur toute la superficie	Vue de dessus de l'outil

3Tableau 3.3 : usinage de la face de coupe

10^e Etape : Contrôle finale de l'outil.

(5) **11^e Etape :** Emballage avec certificat de qualité (livraison).

3 .2. Dessin (solidWorks)

3.2.1. Introduction

Le logiciel de conception mécanique SolidWorks est un outil de modélisation volumique paramétré, basée sur des fonctions, qui tire partie des fonctionnalités de Windows, connu pour sa convivialité. Vous pouvez créer des modèles volumiques 3D entièrement intégrés avec ou sans contraintes tout en utilisant des relations automatiques ou définies par l'utilisateur pour saisir l'intention de conception.

Un modèle SolidWorks est entièrement intégré par rapport aux mises en plan et aux assemblages qui le référencent. Les changements introduits dans le modèle sont entièrement reflétés dans les mises en plan et les assemblages qui lui sont associés. Inversement si vous effectuez des changements dans le contexte d'une mise en plan ou d'un assemblage, ces changements sont reflétés dans le modèle.

Les relations géométriques telles que les relations parallèles, perpendiculaires, horizontales, verticales, concentriques et coïncidentes sont des exemples des contraintes supportées par SolidWorks.

Des équations peuvent également être utilisées pour établir des relations mathématiques entre les paramètres. [17].

3.2.2 Outil de tour réalisé par solidWorks

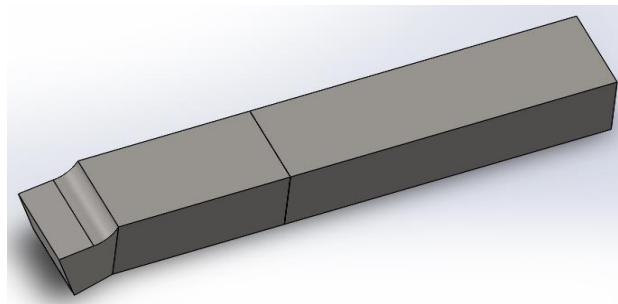


Figure 3.7 :

3.2.3 Mise en plan

- Longueur totale = 150 mm ;
- La partie active = 60 mm ;
- Partie de fixation = 90 mm ;
- Angle de coupe $\Omega = 9^\circ$;
- Angle de dépouille $\alpha = 15^\circ$;
- Angle taillant $\beta = 66^\circ$.

3.3 Caractéristiques d'un outil de tour

La matière de l'outil

- Partie active : acier rapide **HSS** (60mm) ;
- Partie de fixation : acier au carbone **X 45** (90mm) ;
- Module de Young = 21000 ;

Coefficient de poisson = 0.

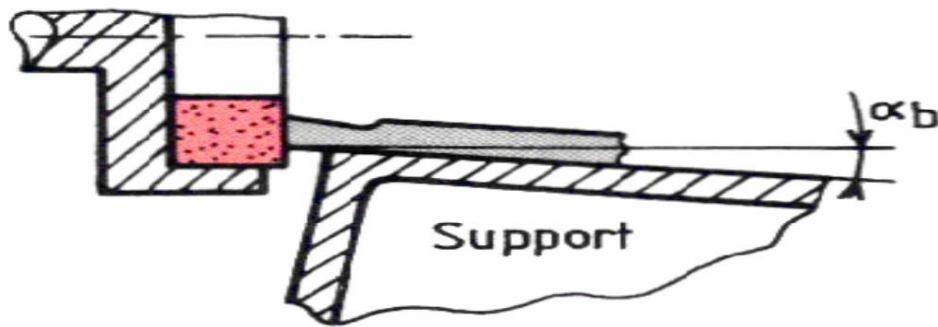


Figure 3.8 : mise en position de l'outil

Chapitre 4

Simulation du comportement dynamique d'usinage

Simulation du comportement dynamique d'usinage

4.1 Introduction

L'application de la simulation numérique à l'usinage peut fournir un outil intéressant pour la prévision de l'apparition d'instabilités ainsi que pour la prédiction de l'état final de la surface usinée. Pour ce faire, l'interaction outil/pièce doit être étudiée avec finesse et un modèle de représentation mécanique suffisamment fidèle de l'ensemble Pièce/Outil doit être construit. La pièce est généralement la partie la plus variable du système : modification consécutive à l'usinage en cours ou plus simplement changement de pièce. L'élaboration du modèle associé à cette dernière dépend de ses caractéristiques propres (géométrie, masse et raideur) ainsi que de la nature des sollicitations qui lui sont appliquées. L'idéal est de construire un modèle suffisamment représentatif induisant des coûts numériques minimaux.

La complexité de modélisation de l'usinage est due à certains phénomènes physiques mis en jeu dans la zone de coupe, à la complexité du comportement dynamique de l'ensemble Pièce/Outil/Machine et à l'interdépendance avec le contrôle du procédé [16]. Pour faire face à cette complexité, l'étude de l'usinage est souvent abordée à l'aide d'une approche multi-échelles. Ceci permet de séparer les difficultés en limitant le nombre de phénomènes à prendre en compte et la taille du modèle à une échelle donnée. Trois échelles d'analyse peuvent ainsi être distinguées : échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique. L'échelle microscopique se situe plutôt au niveau du matériau et des grains et s'intéresse aux aspects métallurgiques, l'échelle mésoscopique considère de façon détaillée l'interaction outil/pièce en analysant les phénomènes thermomécaniques qui apparaissent lors de la formation du copeau (viscoplasticité, frottement, grandes déformations, production de chaleur, transferts thermiques, etc.). [18].

4.2 Modélisation et Approches Numériques

Le comportement vibratoire du système est considéré au voisinage d'une configuration de la machine (positions relatives des différents organes variant peu) de façon à pouvoir modéliser la partie machine + outil par des matrices constantes. Ces matrices peuvent provenir d'une discrétisation par éléments finis (EF) ou par une identification expérimentale. Celles-ci doivent être actualisées si la passe est trop longue pour pouvoir négliger leurs variations. Nous allons à présent décrire l'équation d'équilibre dynamique du système Pièce/Outil ainsi que les différents modèles qu'il faut introduire pour y aboutir.

4.2.1 Equation d'équilibre dynamique

Une discrétisation du champ de déplacement du système Pièce/Outil permet d'écrire l'équation fondamentale de la dynamique sous forme matricielle (1) en décrivant le mouvement par l'intermédiaire des paramètres cinématiques q . Les composantes de q sont les inconnues du problème. Elles comprennent les déplacements généralisés associés aux noeuds de la pièce, de l'outil et de la machine. Leur variation en fonction du temps est obtenue [2] pas à pas en mettant en place un schéma aux différences finies, par exemple le schéma de NEWMARK. La solution étant connue à l'instant t , elle est obtenue à l'instant $t + \Delta t$ façon itérative en réalisant de façon approchée la satisfaction de (1). En effet le second membre $Q_{coupe}(q, \dot{q}, \partial\Omega_{coupe})_{t+\Delta t}$, qui provient des efforts de coupe, dépend, via la loi de coupe des positions et vitesses relatives des points de la zone de contact outil/pièce ainsi que de la surface de contact entre l'outil et la pièce, $\partial\Omega_{coupe}(t + \Delta t)$, à l'instant considéré. [19].

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \left\{ Q_{coupe}(q, \dot{q}, \partial\Omega_{coupe}) \right\} \quad (1)$$

$[M]$: La matrice masse.

$[K]$: La matrice de rigidité.

$[C]$: La matrice d'amortissement.

$\{q\}$: Vecteur des déplacements généralisés.

Simulation du comportement dynamique d'usinage

$\{Q_{coupe}\}$: Vecteur force (second membre).

4.2.2 Le modèle géométrique

La prédiction des efforts de coupe, et du comportement dynamique du système Pièce/outil, passent ainsi par l'utilisation d'un modèle géométrique de la pièce et de sa surface usinée qui évolue au cours de temps et d'un modèle éléments finis de la pièce et du reste du système Pièce/outil.

Lorsque la pièce ne peut être considérée comme rigide, un modèle éléments finis vient compléter sa description mécanique. Ici la pièce est modélisée par des éléments briques. Le reste du système Pièce/outil ne pose pas de problème spécifique. Il est généralement modélisé de façon simplifiée.

Malgré l'enlèvement de matière, dans de nombreux cas les matrices de masse et de rigidité peuvent être considérées comme constantes sur un intervalle de temps très largement supérieur au pas de temps retenu dans le schéma incrémental de résolution. La résolution de (1) est obtenue en utilisant un schéma (implicite) de Newmark utilisant un pas de temps constant Δt (Coffignal et al., 1997).

Le second membre Q_{coupe} , qui provient des efforts de coupe, introduit un terme non linéaire dans (1). Ceci conduit à la mise en place d'un schéma itératif de résolution sur chaque incrément de temps. Q_{coupe} est obtenu à partir du modèle d'interaction outil/pièce utilisé

La formulation éléments finis permet d'en déduire Q_{coupe} à chaque instant et la position "d'équilibre" associée, qui est donnée par q . Ce modèle d'interaction outil/pièce, relativement simple où les aspects thermomécaniques de la coupe ne sont pas explicitement pris en compte, permet de générer une évolution réaliste de la surface usinée et des efforts de coupe (Jayarama et al., 2001, Atabey et al., 2003)

Lorsqu'elles ne sont pas négligeables, les conséquences des pertes de masse et de rigidité sont prises en compte de façon simplifiée en utilisant la connaissance a priori que l'on a de la

Simulation du comportement dynamique d'usinage

trajectoire "théorique outil-pièce". Ceci conduit à un schéma de résolution qui ne nécessite la mise à jour des matrices de rigidité et de masse qu'au passage de certains piquets de temps T_j définis à l'avance en utilisant une interpolation linéaire de l'inverse de l'opérateur de Newmark entre deux piquets. Les différents modèles éléments finis de la pièce associés à chaque piquet de temps retenu pour les changements de matrices peuvent être construits et les matrices calculées et stockées avant le lancement de la simulation. [20].

4.3 Simulation de tournage sous ABAQUS

Plusieurs paramètres influent sur les résultats de la simulation d'usinage comme le frottement, modèle des matériaux les modèles de température... etc. Ces paramètres sont liés entre eux par relations internes complexes. Le modèle du matériau et le contact sont les plus pertinents. Dans notre simulation les effets thermiques n'ont pas été considérés afin de simplifier le modèle et réduire le temps de calcul.

4.3.1 Géométrie et maillage

Un modèle géométrique de la partie active de l'outil a été établi et discrétisé avec des éléments briques linéaires (C3D8R), le maillage est raffiné sur l'arrête de coupe afin de capturer la concentration des contraintes.

Simulation du comportement dynamique d'usinage

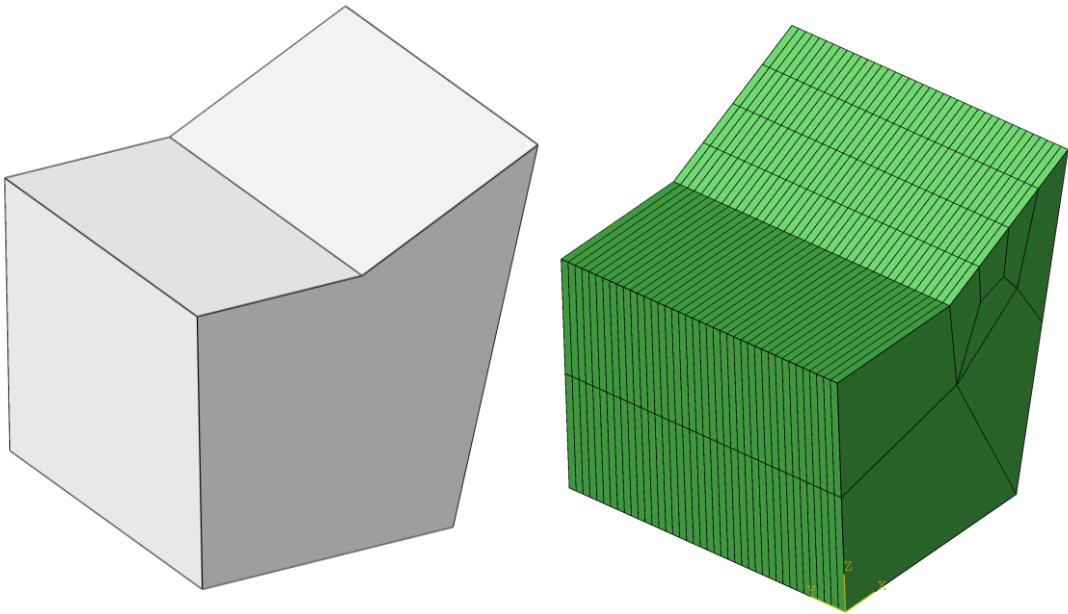


Figure 4.1 : Géométrie et maillage de l'outil

Pour la pièce la géométrie a été discrétisée par des éléments briques linéaires (C3D8R) avec l'option de suppression de l'élément pour modéliser l'enlèvement de la matière. Le maillage est raffiné dans la zone de coupe.

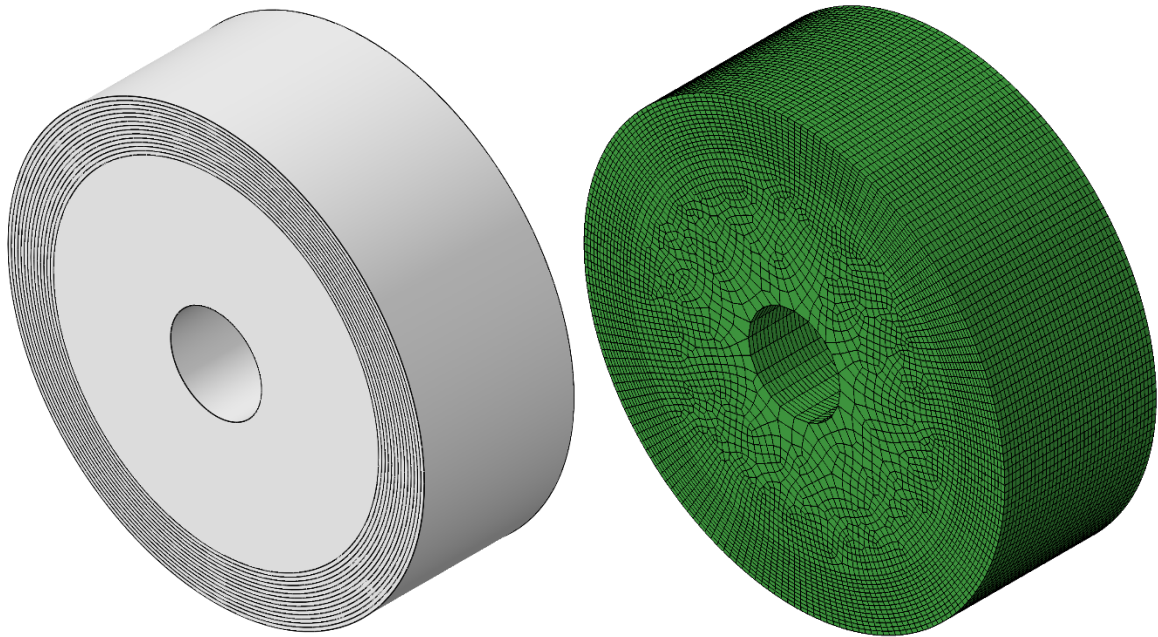


Figure 4.2 : Géométrie et maillage de la pièce

Simulation du comportement dynamique d'usinage

4.3.2 Propriétés des matériaux

Le comportement des matériaux de la pièce et l'outil a été modélisé de façon que l'outil ne subisse qu'une déformation élastique (pas d'usure) et la pièce subira des déformations élastiques, plastique et endommagement (rupture).

Outil	
Densité	7870 kg/m ³
Module de Young	200 GPa
Coefficient de poisson	0.29
Pièce	
Densité	2700 kg/m ³
Module de Young	70 GPa
Coefficient de poisson	0.33
Plasticité (Model Johnson-Cook)	
A	324100000
B	113800000
N	0.42
Endommagement (Ductile)	
Fracture strain	1.508
Stress triaxiality	0.133
Strain rate	250 s ⁻¹
Evolution d'endommagement	
Déplacement	5.10 ⁻⁵ m

Tableau 4.1 : Propriétés des matériaux (Outil, Pièce)

4.3.3 Définition du contact

Simulation du comportement dynamique d'usinage

Le contact est une forme de non-linéarité extrêmement discontinue, ABAQUS/Explicit offre la possibilité de résoudre des problèmes de contact compliqués, très généraux et tridimensionnelles avec des corps déformables. ABAQUS/Explicit offre deux algorithmes de modélisation de contact, contact général (General Contact) et contact des paires (Contact pairs). Le contact général vous permet de définir un contact entre tous les régions du model avec mais il ne contient pas la possibilité d'inclure les surface internes du maillage comme le cas d'usinage ou les surfaces internes sont exposées en cours du processus.

Dans notre cas le contact s'effectuera sur les surfaces externes et internes pour les régions qui peuvent s'éroder due à l'enlèvement de la matière. Donc on doit créer une surface (surface-set) basés sur le maillage qui inclure tous les faciès internes et externe des éléments de la pièce à usinée. [21].

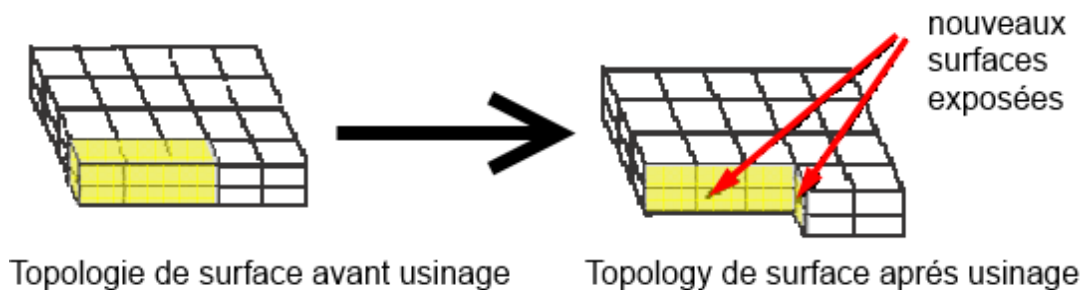


Figure 4.3 : Définition des surfaces de contact

Simulation du comportement dynamique d'usinage

4.3.3.1 Propriétés du contact :

Par défaut le contact sous ABAQUS\Explicit considère qu'il n'y a pas de frottement et ni d'amortissement. Afin d'améliorer la modélisation du contact on peut introduire les propriétés du contact comme le frottement.

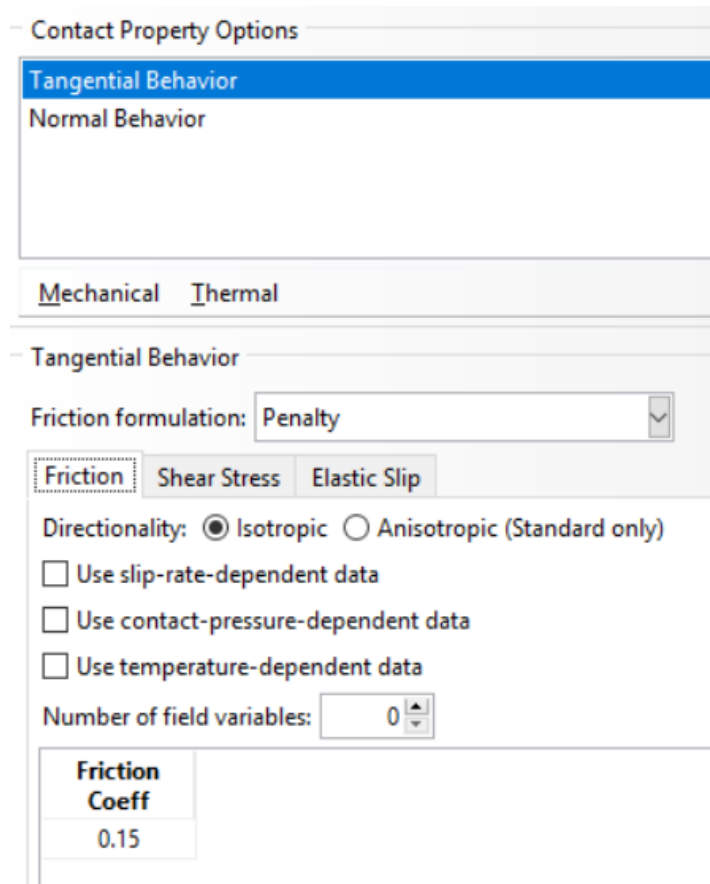


Figure 4.4 : Propriétés du contact

Simulation du comportement dynamique d'usinage

4.3.4 Définitions des conditions aux limites

Pour appliquer les conditions aux limites comme vitesse de rotation de la pièce et l'avance de l'outil, on doit d'abord définir deux points de référence, le premier point est lié à quelques surfaces de l'outil, le deuxième point est lié à l'axe de rotation de la pièce. Ces points servent à simplifier la définition des mouvements de la pièce et l'outil.

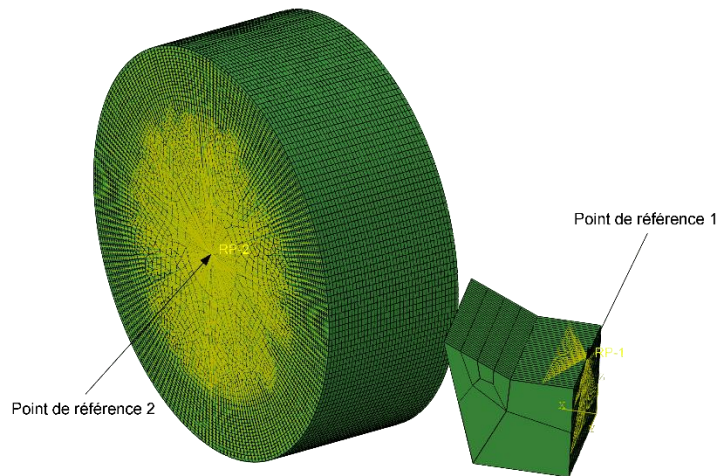


Figure 4.5 : Définition des deux points de référence pour appliquer les conditions aux limites

Maintenant les conditions aux limites peuvent être définies comme suit :

Point de référence 1 subit un déplacement rectiligne uniforme définie comme suit :

- $U_1 = 0.004$ (déplacement suivant x)
- $U_2 = 0$ (déplacement suivant y)
- $U_3 = -0.004$ (déplacement suivant z)
- $UR_1 = 0$ (Rotation autour de x)
- $UR_2 = 0$ (Rotation autour de y)
- $UR_3 = 0$ (Rotation autour de z)

Point de référence 2 subit une rotation à vitesse constante autour de l'axe z définie comme suit :

- $V_1 = 0$ (vitesse suivant x)
- $V_2 = 0$ (vitesse suivant y)

Simulation du comportement dynamique d'usinage

- $V_3 = 0$ (vitesse suivant y)
- $VR_1 = 0$ (vitesse de rotation autour de x)
- $VR_2 = 0$ (vitesse de rotation autour de y)
- $VR_3 = -4$ tr/s (vitesse rotation autour de z)

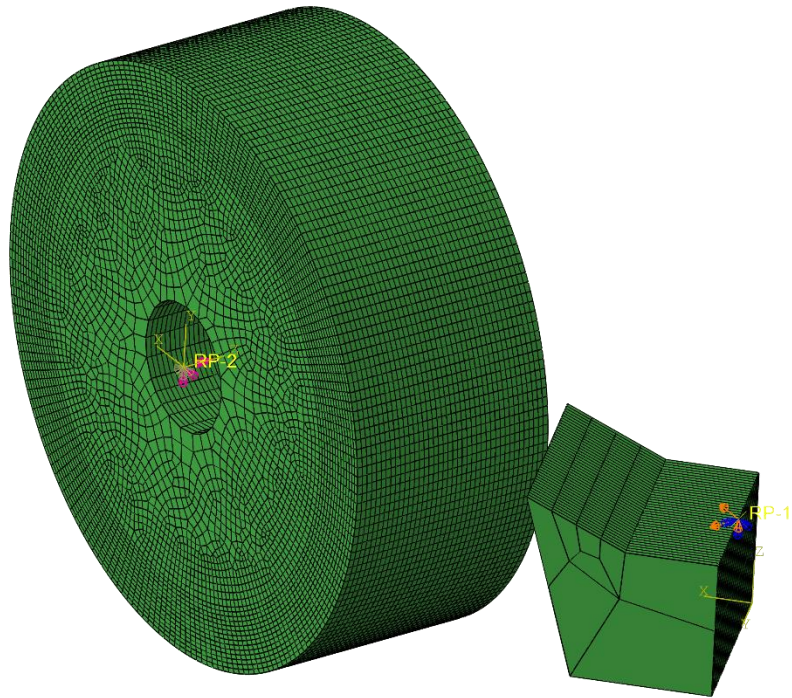


Figure 4.6 : Application des conditions aux limites

4.3.5 Résultats de simulation

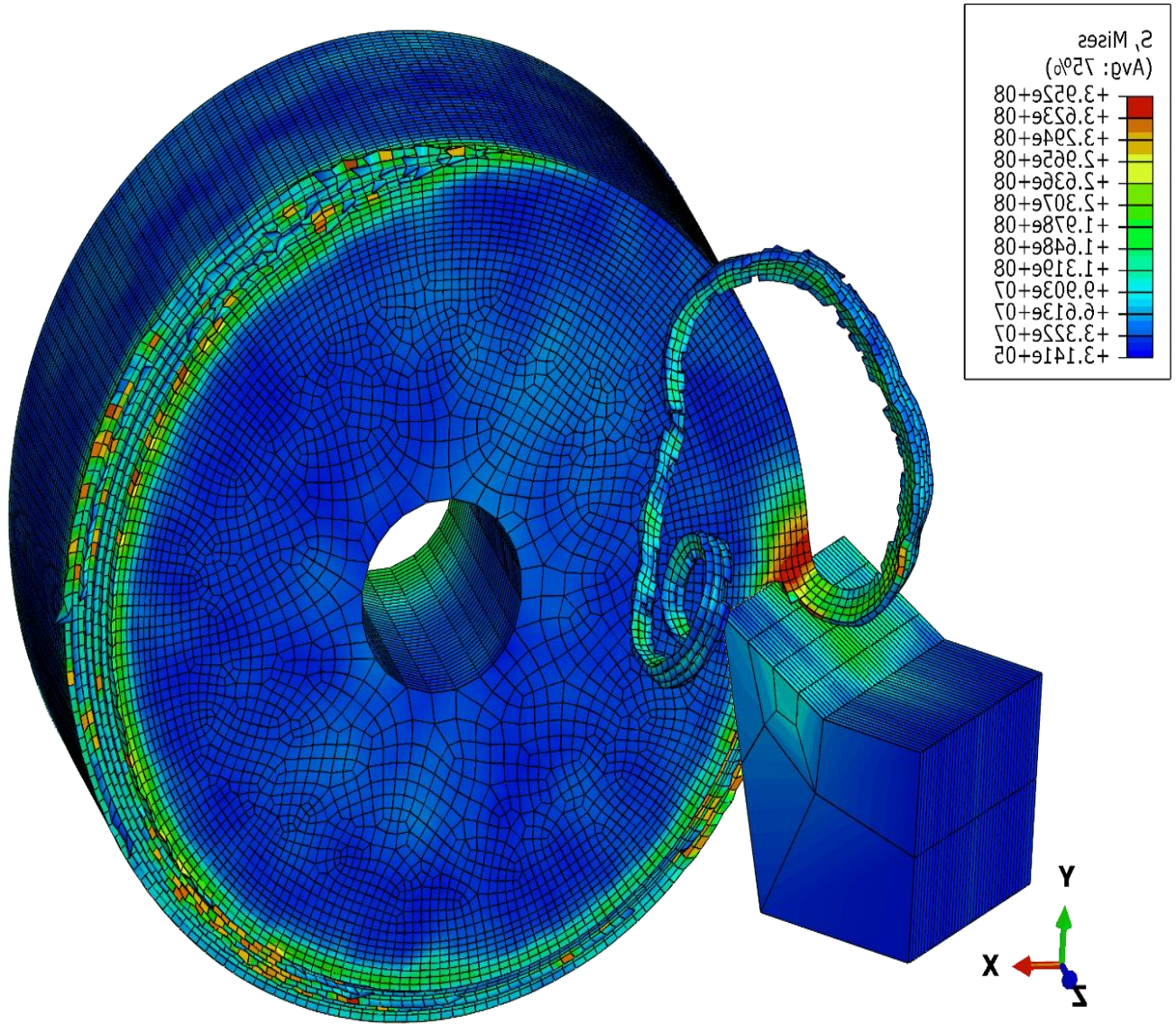


Figure 4.7 : formation de copeau et distribution de contrainte Von Mises

Simulation du comportement dynamique d'usinage

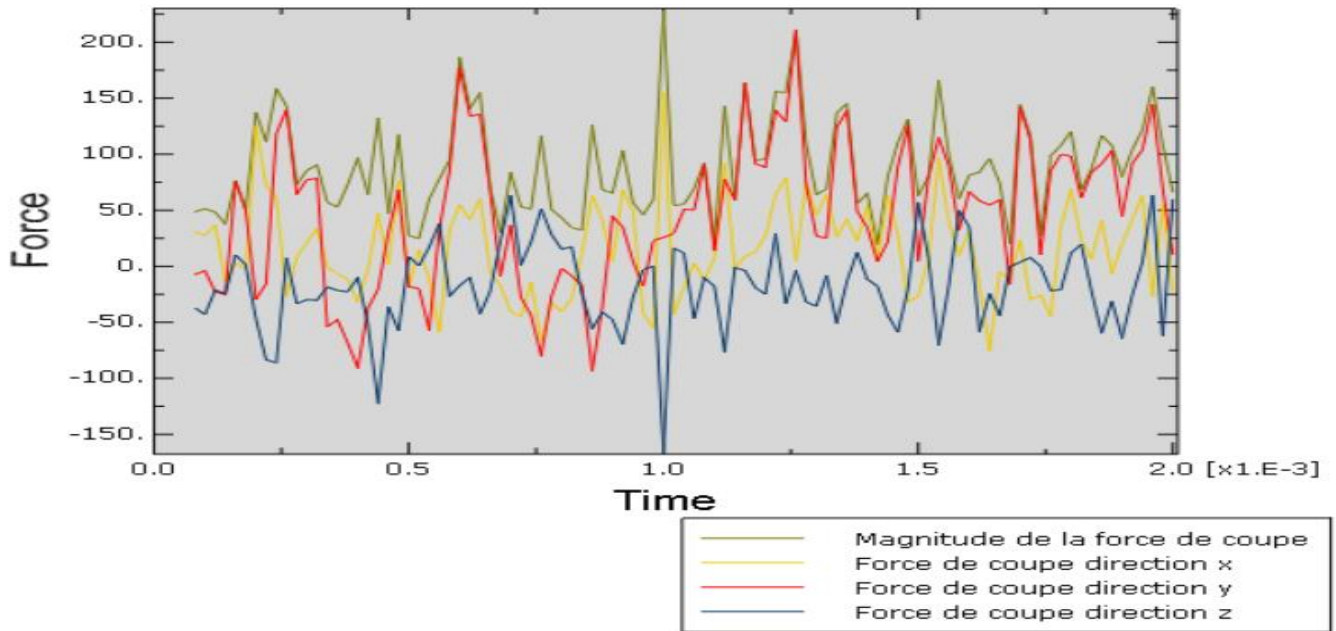


Figure 4.8 : Evolution de des composantes de l'effort de coupe en fonction du temps

4.4 Modélisation d'un outil de tour coudé droit

4.4.1 Phases de mises en données

Pour les applications courantes, on peut distinguer 4 phases dans la mise en données :

- Phase 1 : Génération du maillage (nœuds, éléments) ;
- Phase 2 : Propriétés des matériaux (mécanique, physique, thermique) ;
- Phase 3 : Condition aux limites ;
- Phase 4 : Etape de calcul (chargement, définition des résultats).

4.4.2. Réalisation de la mise en données d'un problème

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules :

- Part, Proprety, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job (pour lancer le calcul).
- Type d'analyse : déformation ou contraintes planes, axisymétrie, série de forie ; etc...

Simulation du comportement dynamique d'usinage

- Formulation : mécanique, thermique, etc...
- Comportement du matériau : élastique (isotrope, orthotrope,...), plastique (isotrope, parfait,...). etc...

4.4.3 Maillage

L'objet du maillage est de discrétiser géométriquement le domaine d'analyse de manière à pouvoir ultérieurement associer une formulation éléments finis au support géométrique.

Concrètement cette discrétisation s'effectue par la création d'objets de type maillage (points, lignes, surfaces, volumes) à l'aide des opérateurs géométriques.

La technique à suivre est presque toujours la même :

- Construction des points ;
- Construction des lignes à partir des points ;
- Construction des surfaces à partir des lignes ;
- Construction des volumes à partir des surfaces.

4.4.4 Serrage d'outil

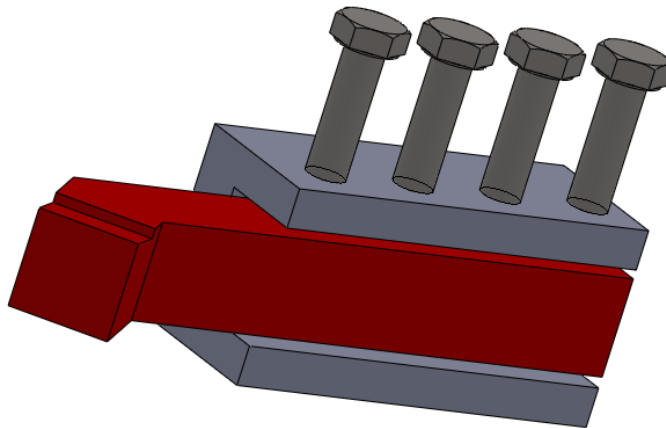


Fig.4.9 : Porte –outil.

Simulation du comportement dynamique d'usinage

4.4.5 Contraintes de Von mises

Sur les figures illustrées ci-dessous, nous avons montré les contraintes de Von mises sur l'arrête tranchante de l'outil. Cette dernière a subi des efforts de coupe au cours d'usinage. La zone rouge s'use avant les autres zones et cette usure vient après réalisation d'un nombre de pièces prescrites dans la gamme d'usinage. Nous devons éviter les angles vifs. [22].

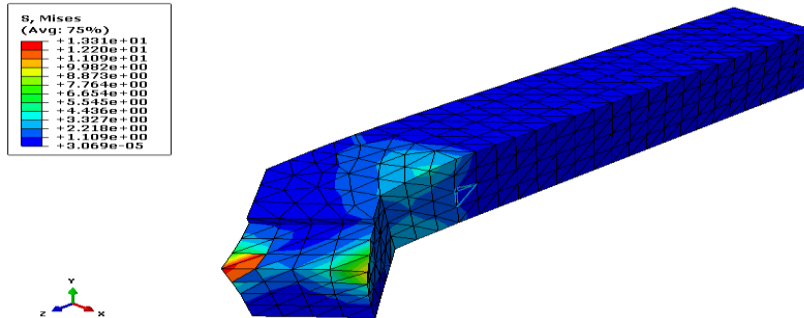


Fig.4.10 : Contraintes de Von mises.

4.4.6 Contraintes selon ZZ

Nous avons fait une coupe selon l'axe ZZ, pour montrer les zones dangereuses sur l'arrête de coupe. la zone la plus dangereuse est indiquée sur l'arrête (zone rouge). Cet endroit à éviter, on doit l'arrondir ou éviter l'angle vif, pour diminuer l'intensité de contraintes dans cette zone.

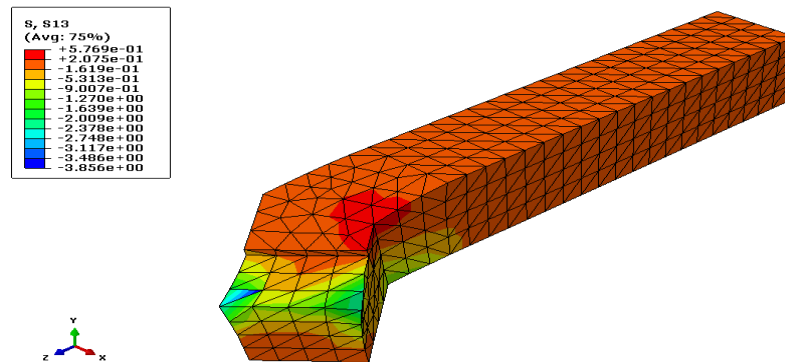


Fig.4.11 : Contraintes selon l'axe ZZ.

Simulation du comportement dynamique d'usinage

4.4.7 Contraintes selon XX

La zone dangereuse se sur l'arrête de coupe, se trouve sur l'extrémité de l'outil , C'est pour cette raison nous devons prendre en considération ces zones pendant le traitement thermique.

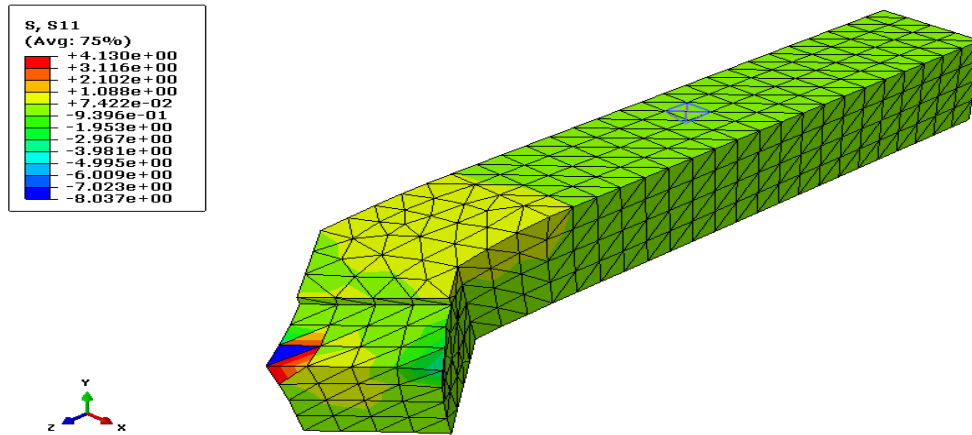


Fig.4.12 : Contraintes selon l'axe XX.

4.4.8 Contraintes selon YY

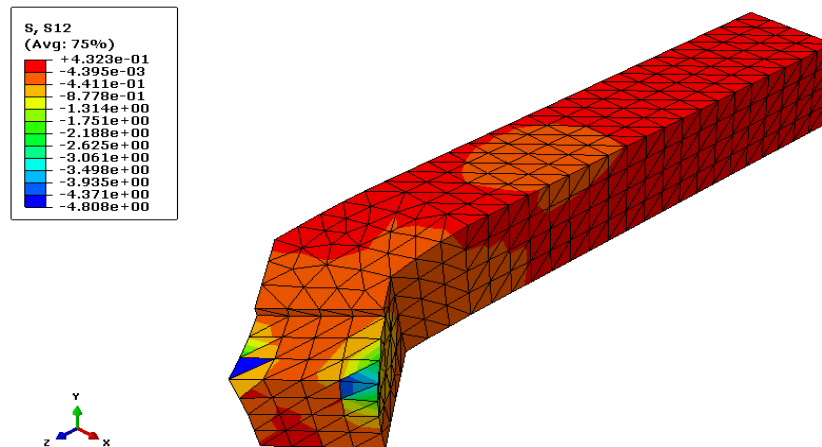


Fig.4.13 : Contraintes selon l'axe YY.

Simulation du comportement dynamique d'usinage

4.4.9 Contraintes selon XY

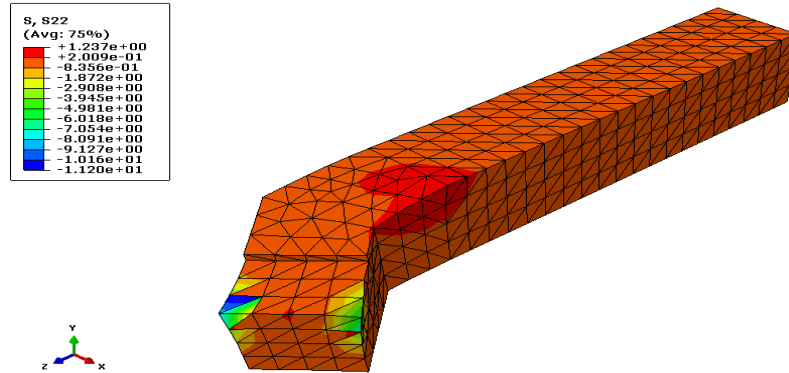


Fig.4.14 : Contraintes selon l'axe XY.

4.4.10 Contraintes selon XZ

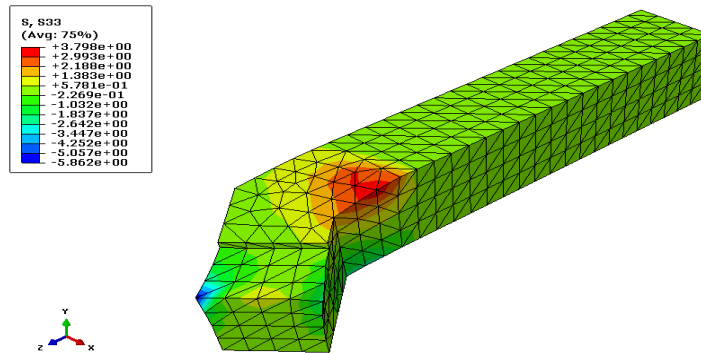


Fig.4.15 : Contraintes selon l'axe XZ.

4.4.11 Contraintes selon YZ

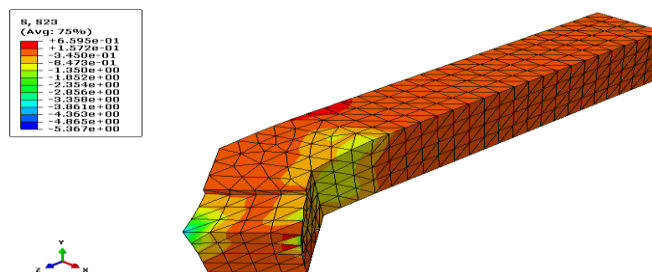


Fig.4.16 : Contraintes selon l'axe YZ.

Simulation du comportement dynamique d'usinage

Conclusion

Dans le domaine de simulation d'usinage, le couplage entre le processus de coupe et le comportement dynamique du système outil/pièce devient plus en plus un grand challenge. Les interactions entre la machine et le processus de coupe peuvent introduire des oscillations qui influent sur la finition de la pièce, l'usure de l'outil et la stabilité du processus de coupe.

L'approche pour simuler le tournage avec un outil coudé à charioter en utilisant ABAQUS/Explicit par la méthode des éléments finis, nous a montré qu'il est nécessaire d'analyser non seulement l'influence des paramètres de processus de coupe comme la vitesse de coupe, l'avance ou la géométrie de l'outil mais aussi l'influence des paramètres de modélisation comme le raffinement de maillage, le model d'endommagement du matériau...etc. Il est nécessaire de mentionner que dans ce travail les effets thermiques n'ont pas été incluse.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé est une étude sur la fabrication d'un outil de tour coudé à charioter droit. Une recherche bibliographique a permis d'identifier les différents processus de coupe, les types d'outils, les matériaux de coupe et les traitements thermiques nécessaires pour améliorer les performances d'un outil de coupe.

Une étude théorique consiste à établir un modèle CAO par Solidworks, et définir les différentes étapes de fabrication d'un outil de tour coudé droite à charioter en introduisant sa gamme d'usinage.

Une étude par la méthode des éléments finis par le logiciel ABAQUS/Explicit du comportement dynamique du système pièce/outil a été réalisée. L'étude détaillée, par simulation numérique, d'une opération d'enlèvement de matière par outil coupant est délicate. Ceci est principalement dû aux phénomènes physiques mis en jeu dans la zone de coupe, à la complexité du comportement dynamique de l'ensemble Pièce/Outil.

Bibliographie

- [1] Guy Murry. : *Technique de l'Ingénieur, M300*, Traité Métallurgique, 2000.
- [2] A. Castel, : *Technologie Professionnelle Général*, Paris, 1980.
- [3] Passerov Aliain, : *Technique de l'Ingénieur* , Traité Génie Mécanique,BM7, 2000.
- [4] I. Lakhtine, : *Métallographie et Traitements Thermiques des Métaux*, Edition Mir, Moscou, 1982, p62.
- [5] Alexeyv Sverdlin and Arnold R. : *Fundamental Concepts in Steel Heat Treatment*, Ness, Braddely University, 2000.
- [6] R. Mourier, : *Traitement Thermique dans Domaine de l'Austenite Métastable*, Technique de l'Ingénieur, M1130.
- [7] G. Murry, : *Introduction Traitements Thermiques dans la Masse des Aciers*, M1125, Traité Matériaux Métalliques, Juin 2000.
- [8] P. Corneiller, : *Les Traitements Thermiques des Aciers Spéciaux*, Lavoisier, Techniques et Documentations, 1997.
- [9] R. Leveque, : *Traitements Thermiques dans la Masse des Aciers à Outils*, Traité Matériaux Métalliques ,M1134.
- [10] Altena, H., et Chatterjee, R., : *Procèdes Moderne de Traitement Thermique*, 1991.
- [11] Rabey, A., *Base de Choix des Aciers à Outils*, 1979.
- [12] Pickering, B., *Materials Science and Technology*, Vol 71992.
- [13] Kalpatian, S., *Tool and Difailures Source Book*, American Soc.for, Edition 1982.
- [14] Boutin, F., : *Ecrouissage et Recuit*, M230, Traité Matériaux Métalliques, 1999.

Bibliographie

- [15] Alexandre Toumine, « *Cours d'usinage* », Groupe conception production, INSA de Lyon, France.
- [16] Marek Balazinski, « *Fabrication mécanique avancée, MEC 4530* », Ecole Polytechnique de Monreale, CANADA.
- [17] BENNEGADI, M.E., *Coupe des Métaux en Fabrication Mécanique et Productique*, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2016.
- [18] C. Le Calvez, *Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone*, Thèse de doctorat de l'ENSAM – Paris, 1995.
- [19] V.P. Astakhov, *Geometry of Single-point Turning Tools and Drills / fundamentals and practical applications*, Springer-Verlag – London, 2010.
- [20] John Wiley & Sons, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 2nd edition Inc. M. P. Groover, 2002.
- [21] BELLOUFI, *Cours procédés de fabrication – Master / Maintenance industrielle*, Université Kasdi MERBAH Ouargla – Algérie, 2010.
- [22] P. DEPEYRE, *Fabrication mécanique, Licence de Technologie et Mécanique*, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la Réunion – France, 2005.