

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



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA- BOUMERDES
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE



Département : Transport et Equipements des Hydrocarbures

LABORATOIRE : FIABILITE DES EQUIPEMENTS PETROLIERS ET MATERIAUX

MEMOIRE

Présenté par :

Mr. Sadek BRAHMI

EN VUE DE L'OBTENTION DU TITRE DE

MAGISTER EN GENIE MECANIQUE

Option : Fiabilité et Maintenance Industrielle

THEME

Etude de l'Influence de l'Intégrité de surface sur la résistance à la
fatigue des pièces usinées

Soutenu devant le jury :

K. Chaoui	Professeur (Université d'Annaba)	Président
M. Gaceb	Maître de Conférences (UMBB)	Rapporteur
B. Chemani	Maître de Conférences (UMBB)	Examineur
E. Bouali	Maître de Conférences (UMBB)	Examineur
N. Abdelbaki	Maître de Conférences (UMBB)	Examineur

Boumerdès 2009

Remerciements

Je remercie particulièrement mon promoteur monsieur Mohamed Gaceb pour son aide précieuse, sa patience et le temps qu'il m'a accordé malgré ses préoccupations au sein du département.

Ce travail a été réalisé principalement au sein du laboratoire de fiabilité des équipements pétroliers et matériaux du Département Transport et Equipements des Hydrocarbures de la Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie. Je tiens donc à remercier tous les membres du laboratoire qui ont contribué de près ou de loin à ce modeste travail.

Je tiens à remercier le personnel de centre de soudage et control de soudage CSC pour leur aide, et en particulier Mr Y. Yahmi.

Dédicaces

Je dédie ce travail

à mes parents

à ma famille

à mes amis

RESUME

On parle communément de la durabilité d'un matériau comme s'il s'agissait d'une propriété fondamentale définie comme la période de temps pendant laquelle le matériau accomplira une fonction utile. La vie utile d'un matériau en service dépend cependant toujours non seulement de la combinaison des facteurs de charge et d'environnement auxquels il est soumis mais aussi des facteurs d'intégrité dont l'état de surface constitue un facteur très important. Ainsi il faut toujours tenir compte des paramètres d'état des surfaces dès la mise en service lorsque l'on considère la durabilité, ou vie du matériau en service.

Cette dépendance est encore plus ressentie dans le cas des matériaux utilisés dans la confection de composants sollicités à la fatigue. Que ce soit en fatigue mécanique ou en fatigue de contact, les gradients de propriété au voisinage de la surface (microstructure, degré d'érouissage, contraintes résiduelles) et les imperfections superficielles apportées par les procédés de fabrication jouent un rôle primordial sur la tenue à la fatigue en service du composant.

La présente étude vise à établir l'influence des paramètres de surfaces réalisées par tournage sur la résistance à la fatigue d'un acier XC 48, en s'attachant plus particulièrement à identifier l'effet de la rugosité et du degré d'érouissage qui peuvent être produits sous différentes conditions d'usinage des surfaces. Pour ce faire, diverses éprouvettes, présentant des combinaisons variées d'état de surfaces, réalisées par tournage à différents paramètres de coupe ont été soumises à des essais de flexion rotative et l'effet sur la durée de vie et la limite de fatigue, pour divers conditions de chargement, a été évalué.

ABSTRACT

We commonly think about the durability of a material as a fundamental property defined as the period of time during which the material will achieve a useful function. The useful life of a material in service, however always depends not only on the combination of the environmental and load factors to which it is subjected but also on integrity factors amongst which the state of the surface constitutes a very important factor. Thus it is always necessary to take into account the surface state parameters as soon as the component is put into service whenever durability or service life of a material is considered.

This dependence is even more felt in the case of materials used in the manufacturing of components subjected to fatigue loading. Whether it is bulk or contact fatigue, the property gradients in the surface vicinity (microstructure, work hardening, residual stresses) and the surface imperfections brought about by the manufacturing process play a primordial role on the fatigue behavior of the component in service.

The present study aims at establishing the influence of the surface parameters of turned components on the fatigue strength of XC48 steel, while paying a particular attention to identifying the effects of the surface roughness and the work hardening which can be produced under various machining conditions of the surfaces. With this intention, various specimens, presenting different combinations of surface quality obtained by turning under various cutting conditions were subjected to rotative flexion tests and the effect on the lifespan and the fatigue limit, for various conditions of loading, was evaluated.

ملخص

يدور الحديث عادة عن استدامة المادة كأنها خاصية أساسية معرفة بالمدة الزمنية التي يقوم خلالها المعدن بوظيفة معينة.

الحياة المفيدة لمعدن ما في العمل مرتبطة دائماً ليس فقط بعاملَي التحميل و الوسط الذين يخضع لهما لكن ترتبط أيضاً بعامل التماسك و منه حالة السطح التي تعتبر عاملاً جدياً مهم. و بهذا وجب دائماً الأخذ بعين الاعتبار حالة السطح عند دراسة الخدمة المستدامة للمعدن .

هذا الارتباط يبرز أكثر في حالة المواد المستعملة في إعداد القطع الخاضعة للاجهادات المتغيرة. و هذا سواء في حالة الاجهادات المتغيرة الميكانيكية أو اجهادات التلامس, في حالة الخصائص و المكونات بجانب السطح (الإجهادات المتبقية, التصلب و البنية المجهرية) وفي حالة العيوب السطحية الناتجة أثناء التصنيع تلعب دوراً جدياً مهم في مقاومة الاجهادات المتغيرة لهذه المواد أثناء عمل القطعة.

هذه الدراسة تهدف إلى التحقيق في تأثير خصائص السطح المنتج عن طريق الخراطة على مقاومته للاجهادات المتغيرة بالنسبة للفولاذ XC48 و ذلك بالتركيز خصوصاً على معرفة تأثير الخشونة و التصلب اللذان يمكن أنتاجهما تحت عوامل تصنيع مختلفة للسطوح. لأجل تجسيد هذا أنجزت عدة عينات تمثل مزيج مختلف من حالة السطح عن طريق الخراطة بعوامل تشغيل مختلفة و أخضعت لتجارب الاجهادات المتغيرة ثم قيم التأثير على نهاية الاجهادات لمختلف ظروف التحميل.

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Résumé

Tables des matières

Introduction générale.....	4
Chapitre 1 : Usinage des matériaux	
1.1. Introduction.....	8
1.2 Description de l'opération d'usinage.....	8
1.3 Géométrie de coupe et terminologie.....	9
1.3.1 Approche énergétique : Modèle de Merchant.....	10
1.3.2 Approche mécanique.....	12
1.3.3 Approche thermo-mécanique.....	12
1.4 Classement des types de copeau.....	14
1.5 Mécanisme de Formation de la nouvelle surface	15
1.5.1 Génération de l'arête rapportée.....	16
1.5.2 Génération de chaleur.....	18
1.6 Conclusions.....	21
Chapitre 2 : Caractéristiques des surfaces usinées	
2.1 Introduction.....	23
2.2. Texture de la surface.....	24
2.2.1 Définitions des critères de rugosité (norme NF E 05-015).....	24
2.3. Défauts de la surface usinée	25
2.3.1 Écailles.....	25
2.3.2 Cavités.....	25
2.3.3 Microstries.....	26
2.3.4 Microfissures.....	26
2.4. Facteurs conditionnant l'état des surfaces tournées.....	27
2.4.1 Effet du régime de coupe sur la rugosité.....	27
2.4.1.1 Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants.....	29
2.4.1.2 Effet de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité	29
2.4.1.3 Effet de l'angle de coupe sur la rugosité	30
2.4.2 Influence du régime de coupe sur l'écrouissage superficiel	31
2.4.3 Influence des conditions de coupe sur les contraintes résiduelles.....	32
2.4.4 Effet des phénomènes dynamiques	33

2.4.5 Effet des déformations plastiques.....	34
2.4.6 Effet des changements de phase	36
Chapitre 3 : Etude de la fatigue	
3.1 Introduction.....	38
3.2. Aperçu sur le phénomène de fatigue.....	39
3.2.1 Endommagement par fatigue.....	39
3.2.2 Mécanisme de rupture par fatigue.....	39
3.2.2.1 Stade d'amorçage.....	39
3.2.2.2 Stade de propagation.....	41
3.2.2.3 Rupture brutale.....	41
3.2.3 Diagramme d'endurance.....	42
3.3 Évolution structurale en cours de la fatigue.....	43
3.4 Modifications superficielles en cours de fatigue.....	43
3.5. Facteurs influant la fatigue.....	43
3.5.1 Facteurs métallurgiques.....	44
3.5.1.1 Facteurs liés à l'élaboration de l'acier.....	44
3.5.1.2 Facteurs liés à la mise en forme	44
3.5.1.3. Facteurs liés aux traitements thermiques.....	45
3.5.2 Influence de la charge à la rupture en traction « Rr ».....	46
3.5.3 Facteurs géométriques.....	47
3.5.4 Influence du mode de sollicitation.....	47
3.5.5 Influence de la fréquence des sollicitations.....	47
3.5.6 Influence de la température.....	48
3.5.7 Influence de la corrosion.....	48
3.5.8 Facteurs liés à la nature des surfaces usinées.....	48
3.5.8.1 Influence de la rugosité.....	48
3.5.8.2 Influence des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue.....	49
3.5.9 Influence de la lubrification durant l'usinage.....	50
3.6. Faciès de rupture en fatigue.....	51
3.6.1 Rupture fragile.....	51
3.6.2 Rupture ductile.....	51
3.7 Conclusions.....	52

Chapitre 4 : Procédures expérimentaux

4.1. Introduction.....	54
4.2. Matériau étudié	54
4.3. Usinage des éprouvettes	55
4.3.1 Outil de coupe utilisé.....	55
4.4. Mesure de la rugosité.....	56
4.5 Mesure de la Microdureté	57
4.6 Micrographie des pièces usinées.....	57
4.6.1 Choix de plan du coupe	58
4.6.2 Découpe.....	58
4.6.3 Polissage mécanique.....	59
4.6.4 Attaque micrographique	59
4.7 Etude de la résistance à la fatigue.....	60
4.7.1 Préparation des éprouvettes de fatigue.....	60
4.7.2 Machine de fatigue en flexion rotative.....	60
4.8 Difficultés rencontrées.....	62

Chapitre 5 : Résultats expérimentaux

5.1 Introduction.....	65
5.2 Influence des conditions d'usinage sur l'intégrité de surface	65
5.2.1 Influence sur la rugosité de surface	65
5.2.1.1 Influence de la vitesse de coupe.....	65
5.2.1.2 Influence de avance	67
5.2.1.3 Influence de la profondeur de passe.....	69
5.2.2 Influence sur la microdureté	71
5.2.2.1 Influence de la vitesse de coupe.....	71
5.2.2.2 Influence de l'avance.....	72
5.2.2.3 Influence de la profondeur de passe.....	74
5.3 Comportement du matériau en fatigue.....	75
5.3.1 Influence de la vitesse de coupe.....	75
5.3.2 Influence de l'avance.....	76
5.3.3 Influence de la profondeur de passe.....	77
5.4 Conclusion.....	78
Conclusion générale	81

INTRODUCTION

La construction mécanique impose des conditions de plus en plus sévères. Aujourd'hui on ne saurait imaginer le fonctionnement correct des organes de machines sans assister d'une certaine qualité des surfaces, selon lesquelles elles s'assemblent. En service, l'endommagement des organes touche en premier lieu les couches superficielles du métal, ce qui laisse à présumer de l'importance que revêt la propreté de l'usinage à l'égard du fonctionnement et de la longévité d'un ensemble.

Un grand nombre d'expériences, [1-3], ont montré que la résistance à la fatigue des pièces usinées décroît de façon considérable lorsque leur surface présente des rayures ou stries, même microscopiques. Ces défauts superficiels provoquent des concentrations de contraintes présentant une source permanente de fissures, voir d'amorce de rupture.

Pour cette raison la connaissance la plus intime des relations empiriques entre l'influence des facteurs de base d'usinage par l'outil coupant, (propriétés du matériau travaillé, vitesse de coupe V_c , avance f , profondeur de passe a , géométrie de la partie active de l'outil, fluide réfrigérant et lubrifiant, etc....) et la qualité de la surface travaillée est recherchée.

Le contexte général de cette étude est la fabrication et la spécification des surfaces de pièces mécaniques soumises à des sollicitations de fatigue. En effet, les moyens et les conditions d'usinage sont en évolution constante pour assurer une productivité toujours croissante. Or la modification des gammes d'usinage entraîne une variation des propriétés de surface et pose donc la question de la qualité en service des pièces usinées [2]. La tenue en fatigue en est un des critères principaux. Il apparaît donc essentiel pour continuer à progresser en matière de productivité tout en garantissant une qualité connue des pièces, de fournir au concepteur les critères d'influence sur la tenue en fatigue des pièces liés au processus de fabrication. Cette étude présente les résultats d'essais de fatigue réalisés sur des éprouvettes usinées en tournage sur un acier XC 48 utilisé pour la fabrication des pièces mécaniques. Pour caractériser les états de surface obtenus, trois paramètres sont retenus :

- Un paramètre géométrique : la rugosité,
- Un paramètre mécanique : la microdureté,
- Un paramètre métallurgique : la microstructure.

Ces trois paramètres peuvent être variés dans un domaine restreint, par le choix des conditions d'usinage.

Le tour permet de réaliser des éprouvettes cylindriques destinées à explorer la fatigue en flexion rotative. Les mesures de rugosité, les mesures de microdureté et des observations métallographiques n'ont pas permis de mettre en évidence une évolution sensible de la microstructure au delà d'une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres correspondant à la résolution des méthodes utilisées. Cette problématique, est détaillée au chapitre 5.

L'objectif principal est de déterminer une relation globale des conditions de formation des surfaces de pièces avec leurs performances en service.

Le premier chapitre introductif concerne l'étude bibliographique. Il permet de rappeler les bases scientifiques du phénomène de la coupe des métaux et des mécanismes de formation du profil microgéométrique sur les surfaces usinées.

Dans le deuxième chapitre, nous indiquons tous les facteurs et paramètres conditionnant l'état de surfaces tournées dans cette étude et nous exposons l'influence des facteurs d'usinage de base sur la qualité de la surface travaillée.

Le troisième chapitre introduit le phénomène de fatigue des matériaux, discute le comportement des pièces en fatigue en fonction des caractéristiques mécaniques de résistance en flexion rotative et de dureté des matériaux ainsi que les caractéristiques topographiques et métallurgiques de la surface et de la couche superficielle influencée durant l'usinage des pièces mécaniques.

Le quatrième chapitre concerne les procédures expérimentales et donne une description du matériau étudié, des moyens et des conditions des essais effectués ainsi que des difficultés rencontrées lors des essais.

Le cinquième chapitre, concerne l'étude expérimentale du comportement des pièces mécaniques en fatigue, avec différentes caractéristiques de la surface, selon deux exposés. Le premier consiste à trouver une relation entre les conditions d'usinage et l'état de la surface usinée (Rugosité, écrouissage et microstructure). Le deuxième consiste à établir une relation entre les propriétés de la surface usinée et la résistance à la rupture en fatigue.

Finalement, des conclusions de notre contribution sont formulées. En outre des justifications sont proposées sur l'influence des différents paramètres de coupe sur l'intégrité de

la surface et conséquemment sur la résistance à la fatigue des pièces usinées par enlèvement de la matière.

Chapitre 1

Usinage des matériaux

1.1. Introduction

La coupe des métaux, procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication. Malgré l'apparition de nouvelles techniques de fabrication au cours des dernières années, la fabrication par enlèvement de métal reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés.

La recherche d'une productivité toujours meilleure de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure. Cette amélioration permanente repose plus ou moins directement sur l'étude approfondie des mécanismes physiques et des lois régissant ce procédé. Celle-ci reste donc un objectif essentiel. Son intérêt ne peut être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'usinage ou de nouvelles techniques de commande et de programmation.

La mise en oeuvre rationnelle de ces techniques passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôlent.

1.2 Description de l'opération d'usinage

L'usinage est l'opération durant laquelle le matériau est enlevé de l'ébauche au moyen d'un outil dur qui se déplace relativement à la surface de l'ébauche pour produire une surface usinée (fig.1.1). Le matériau enlevé sous forme de ruban est appelé copeau. L'enlèvement du copeau peut être réalisé par une variété d'outils possédant une ou plusieurs arêtes de coupe.

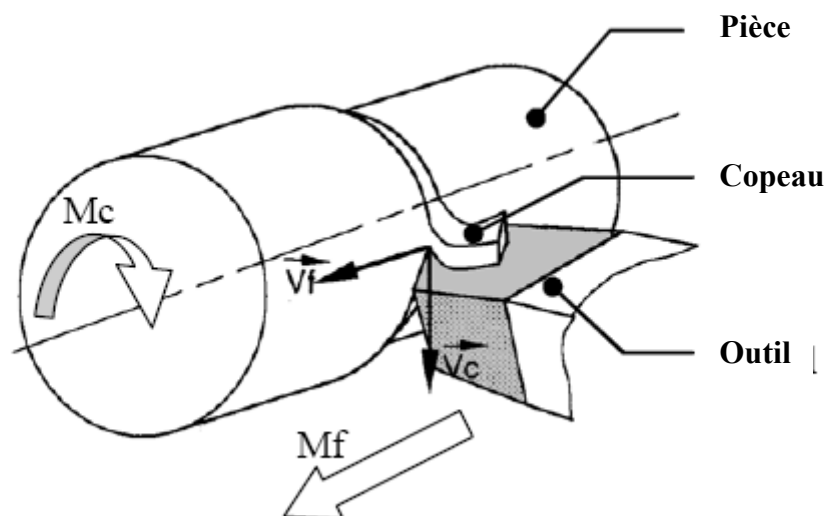


Figure 1.1 : Procédé d'usinage en tournage.

Toutefois les mécanismes de formation de copeau avec ces différents outils sont liés à ceux du cas élémentaire de l'usinage par une seule arête de coupe, avec les caractéristiques d'usinage orthogonal (figure.1.2) Dans ce cas l'arête de coupe est perpendiculaire à la direction de coupe. L'usinage orthogonal peut être réalisé aussi bien par tournage (fig.1.2.) que par rabotage où la largeur d'arête est plus grande que l'épaisseur de la surface usinée.

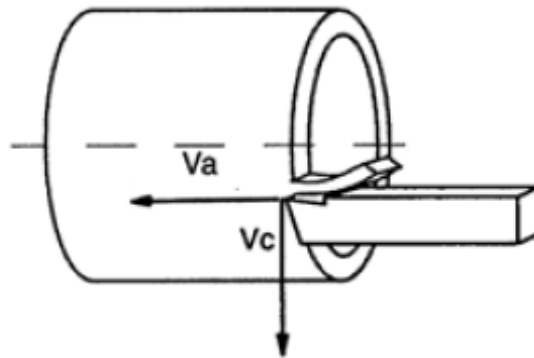


Figure 1.2: Usinage orthogonal

1.3 Géométrie de coupe et terminologie

La figure 1.3 montre une section de la zone de coupe. Dans ce procédé l'arête de l'outil est formée par l'intersection de deux faces. La face de coupe sur laquelle glisse le copeau, forme un angle de coupe « γ » avec la normale à la surface usinée et la deuxième est la face de dépouille qui forme un angle de dépouille « α » avec la surface usinée. Ce dernier angle permet d'éviter les frottements de l'outil avec la surface usinée.

Si la face de coupe fait un angle avec la surface usinée inférieur à 90° l'outil est dit à angle de coupe positif (fig.1.3a) dans l'autre cas l'outil est à angle négatif (fig.1.3b).

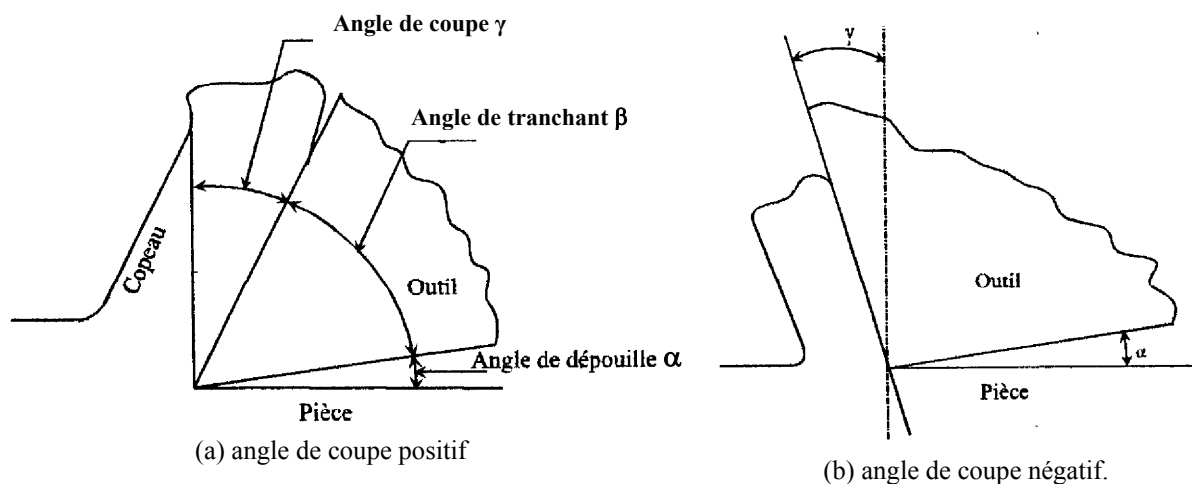


Figure 1.3 : Angle de coupe de l'outil

En pratique l'arête de coupe n'est jamais infiniment aiguë, même si elle est façonnée par les meilleures méthodes d'affûtage. L'arête est caractérisée par un arc reliant la face de coupe et la face de dépouille. La finesse de l'arête est donc définie par le rayon de courbure « r_ϵ » de cet arc (fig. 1.4).

Le rapport « $k=t_1/t_2$ » de l'épaisseur de copeau est appelé rapport de coupe ou aussi facteur de compression [4]. Les zones de contact entre le copeau et la face de coupe et entre la pièce et la face de dépouille sont appelées interfaces copeau - outil et pièce - outil.

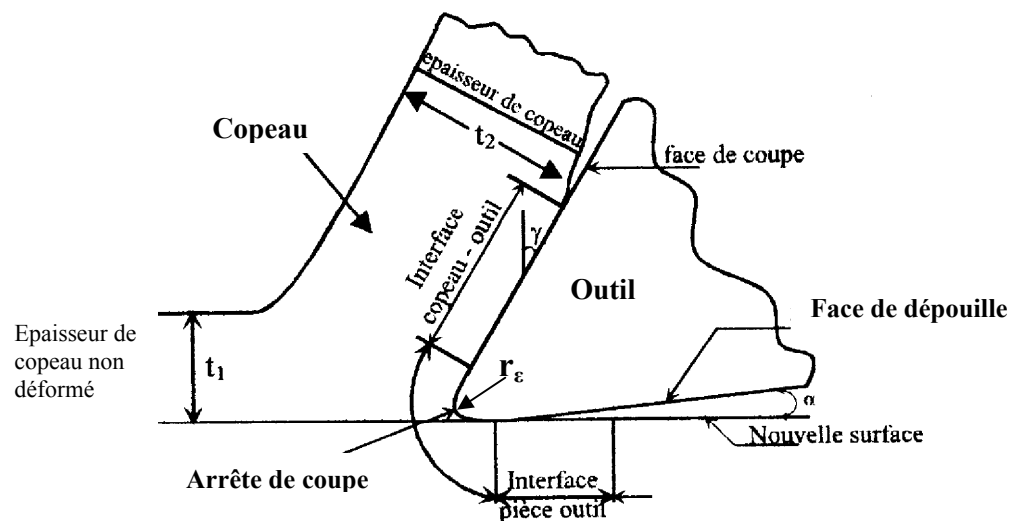


Figure 1.4 : Représentation schématique de la zone de coupe

L'usinage se fait par le déplacement de l'outil (fig.1.4) avec une vitesse de coupe « V_c » le long de la surface de l'ébauche, à une profondeur « t_1 » appelée épaisseur de copeau non déformé. L'épaisseur « t_2 » est l'épaisseur du copeau enlevé. En tournage la vitesse de coupe provient de la rotation de la pièce. Le déplacement de l'outil dans la direction de l'axe de rotation de la pièce est appelé avance de l'outil qui est donnée en millimètres par tour de la pièce. Trois approches pour l'étude du processus d'usinage ont été proposées.

1.3.1 Approche énergétique : Modèle de Merchant

Merchant a élaboré un premier modèle simple de l'écoulement d'un copeau sur un outil [5]. Ce modèle traite principalement des copeaux obtenus à faibles vitesses et d'aspects peu dentelés. La zone de cisaillement principal est assimilée à un plan faisant un angle Φ avec la surface usinée appelé angle de cisaillement. L'effort de coupe « F » peut être

décomposé en deux composantes « F_t » parallèle à la face de coupe et « F_n » normale à cette face (fig.1.5).

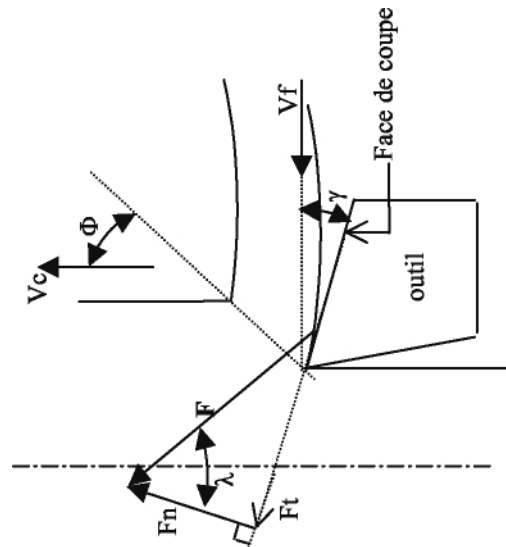


Fig. 1.5 : Décomposition de l'effort de coupe.

Cas du modèle de Merchant [6]

On admet que la face de coupe est le siège d'un frottement de Coulomb. Appelons λ l'angle tel que $\operatorname{tg} \lambda = \frac{F_t}{F_n}$. L'angle ϕ d'orientation du plan de cisaillement par rapport à V_c peut être déterminé à partir des valeurs des angles λ et γ (angle de coupe (fig.1.5)) en faisant l'hypothèse que le plan de cisaillement est incliné de telle façon que la puissance totale dissipée plastiquement soit minimale. Si l'on admet que le matériau est parfaitement plastique [6] :

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\lambda - \gamma}{2} \quad (1.1)$$

Les valeurs des efforts de coupe et de l'épaisseur du copeau peuvent être calculées à partir de cette relation. Merchant a pu observer que la relation liant l'angle « ϕ » et les deux angles λ et γ était rarement vérifiée. Il perfectionna son modèle en admettant, d'après la théorie de Caquot-Bridgman que la résistance au cisaillement dans le plan de cisaillement est une fonction linéaire de la contrainte normale au plan de cisaillement. Il en déduisit une relation plus générale liant l'angle ϕ et les angles λ et γ :

$$\phi = C - \frac{\lambda - \gamma}{2} \quad (1.2)$$

Avec C constante supérieure ou égale à $\pi/4$.

D'autres auteurs ont cherché à améliorer ce modèle. Albrecht [6] a par exemple développé une théorie de refoulement pour rendre compte des variations apparentes du rapport F_t/F_n en attirant l'attention sur les perturbations dues au rayon de défaut d'acuité d'arête r_ϵ .

1.3.2 Approche mécanique

LEE et SCHAFFER furent les premiers en 1951 à tenter de tirer parti des méthodes de champ de lignes de glissement. KUDO proposa ultérieurement une modélisation qui tient compte en particulier de la courbure du copeau. Plus tard, DEWHUQST a proposé un modèle qui rend assez bien compte des effets connus des paramètres géométriques de l'outil [6].

En dépit des progrès accomplis, il apparaît que les modèles purement mécaniques ne peuvent donner que des informations imprécises. Des progrès ne peuvent être obtenus qu'en intégrant les effets thermiques.

1.3.3 Approche thermo-mécanique

OXLEY fut le premier à introduire avec HASTINGS et MATHEW une description minutieuse de la loi de comportement du matériau, qui tenait compte des vitesses effectives de déformation et des températures estimées dans les zones de cisaillement I et II de la figure 1.6 [6] Plus récemment GILORMINI [7] a développé deux modèles intéressants. Le premier utilise les performances des méthodes des différences finies pour tracer des cartes détaillées des champs de vitesses, des températures et des déformations dans la racine du copeau. La connaissance des lois d'endommagement d'un matériau au voisinage des inclusions, dans les conditions thermiques et mécaniques de la coupe est sans doute encore trop imprécise pour que le modèle de GILORMINI permette de tracer des cartes d'endommagement et de rendre compte de l'influence des paramètres métallurgiques du matériau usiné tel que les inclusions de sulfures de manganèse. Un tel modèle n'est pas en outre totalement prédictif car il nécessite la connaissance préalable de la géométrie du copeau. Le second modèle de

GILORMINI est une modélisation thermomécanique, basée sur un champ de vitesses réaliste dans les deux zones de déformations I et II de la fig.1.6. Dans le cas des vitesses conventionnelles, l'observation de la formation du copeau permet de mettre en évidence deux zones de frottement.

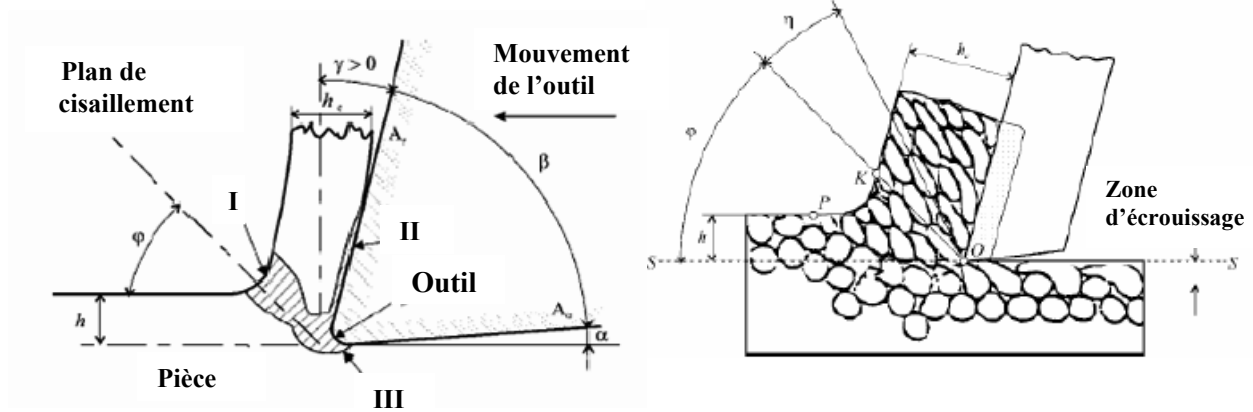


Figure 1.6 : Zone déformation lors de formation du copeau

Zone de cisaillement primaire (I) : Elle s'étend de l'arête de coupe jusqu'à la surface libre du copeau. Cette zone de cisaillement fait un angle ϕ (angle de cisaillement) avec la surface usinée. Les très fortes déformations à très grande vitesse subies par le matériau dans cette zone engendrent un auto-échauffement de la matière très violent.

Zone de cisaillement secondaire (II) : Elle est aussi appelée zone d'écroutissage du copeau, et se situe à l'interface de l'outil et du copeau. C'est une zone de frottement et de glissement qui est responsable entre autres de l'usure en cratère sur l'outil et d'une forte génération de chaleur.

Zone tertiaire (III) ou d'écroutissage de la pièce : C'est une zone de frottement et de glissement entre la face de dépouille et la surface usinée. Elle donne naissance à l'usure en dépouille sur l'outil et engendre des modifications microstructurales en surface de la pièce (écroutissage, contraintes résiduelles) dues au frottement et à la génération de chaleur qui en découle.

L'étude de la formation du copeau est assez délicate car la zone d'étude est très petite (quelques dizaines de millimètres carrés) et les phénomènes thermomécaniques sont extrêmement violents, et localisés sur des bandes de quelques micromètres. B. Changeux [8]

estime le taux de déformation dans la zone primaire (I) supérieur à 2 unités avec des vitesses de déformation de 10^4 à 10^6 s⁻¹. Il estime à plus de 400 °C l'échauffement dans cette zone dû au cisaillement intense de la matière et à plus de 800 °C l'échauffement de la zone secondaire (II) dû au frottement outil / copeau. Ces conditions extrêmes rendent donc les mesures extrêmement délicates à réaliser et beaucoup d'inconnues persistent.

Pendant la coupe, seules des valeurs macroscopiques comme les trois composantes de l'effort de coupe, la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance par tour peuvent être mesurées assez simplement. L'aspect thermique peut être estimé en mesurant le flux thermique dans l'outil [9-10] et en utilisant des caméras thermiques proches infrarouges qui permettent d'estimer le champ de température de la zone de coupe [11-13].

L'étude de l'intégrité de surface de la pièce (rugosité, contraintes résiduelles, écrouissage...), du copeau (morphologie, transformations microstructurales...) et l'outil (usure, dépôt métallique...) donne des indications supplémentaires sur la formation du copeau.

1.4 Classement des types de copeau

La formation de copeau est le phénomène d'enlèvement de matière de la pièce sous forme de ruban ou de petits segments, appelé copeau. Selon la classification de Komanduri et Brown [14] il existe trois types de copeau :

1. Copeau continu (fig.1.7.a) sans arête rapportée : produit en usinant les matériaux ductiles (Acier, Aluminium) avec des grandes vitesses de coupe, l'usinage dans ce cas est considéré comme régulier.

2. Copeau continu avec une arête de coupe rapportée (fig.1.7.b) : est généralement produit par l'usinage des matériaux très ductiles et à des vitesses de coupe moyennes. Ce type de copeau est très important, car il se produit avec plusieurs matériaux et différentes conditions de coupe.

3. Copeau discontinu (fig.1.7.c) : produit au cours de l'usinage des matériaux fragiles (fontes, bronze, etc.) et par l'usinage à faibles vitesses de coupe.

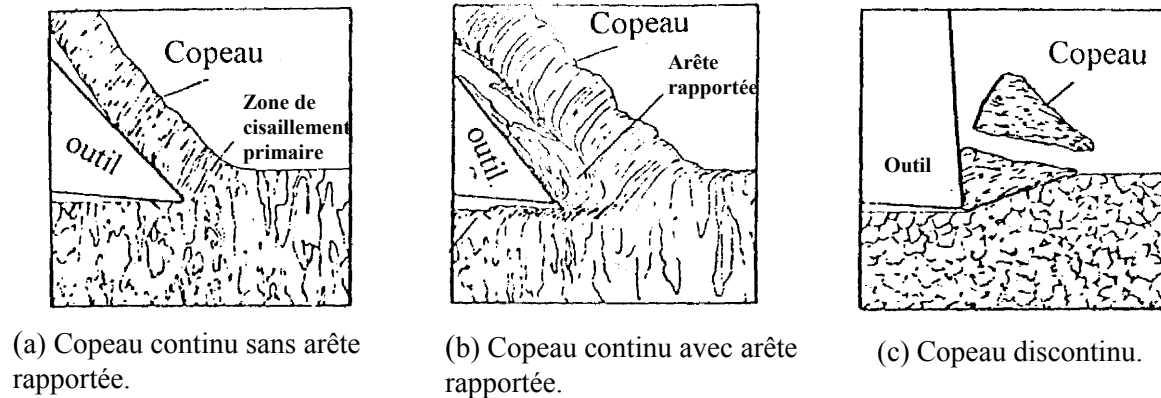


Figure 1.7 : Type de copeau [4]

1.5 Mécanisme de Formation de la nouvelle surface :

Lors de l'usinage une partie du matériau déformé dans la zone primaire (fig.1.8) s'écoule sous l'arête de l'outil vers la surface de la pièce, après séparation du copeau, et forme la couche superficielle influencée. La déformation dans cette couche et les caractéristiques microstructurales résultantes découlent du comportement plastique du matériau dans la zone primaire. L'écoulement plastique dans des champs de déformation et de températures complexes à l'intérieure de cette zone, peut être considéré comme une combinaison de deux types de déformation. Une déformation progressive en compression et en cisaillement à l'approche de l'outil suivie d'un cisaillement intense de ce matériau déformé. La propagation de bandes de cisaillement du bec de l'outil vers la surface libre conduit à la séparation du copeau.

Plusieurs études ont abordé l'usure des outils. Cependant peu de travaux effectués ont porté sur l'aspect de la formation de la surface usinée. Les observations expérimentales ont montré que la formation de la surface est étroitement reliée au type de formation de copeau [15]. Selon Gillibrand [4] la formation de la surface avec sa topographie dépend de la géométrie de l'outil, des conditions de coupe, et du matériau travaillé. La surface usinée est affectée par la nature de contact à l'interface pièce-outil, de la présence de l'arête rapportée et de l'utilisation d'un outil aigu ou usé.

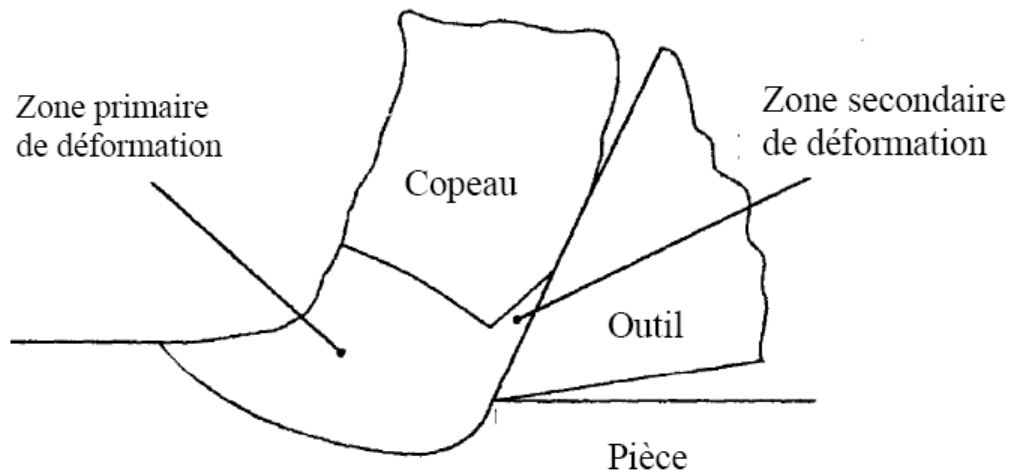


Figure 1.8 : Modélisation de la zone de cisaillement dans l'usinage

1.5.1 Génération de l'arête rapportée

Parmi les multiples facteurs de coupe, certains peuvent prendre une importance de premier plan ou devenir secondaire pour la génération de l'état de surface. Les niveaux d'influence dépendent cependant des conditions de travail.

L'arête rapportée est un amas de matériau adhérent à la face de copeau de l'outil sous des conditions de température et de pression élevée qui favorisent l'adhésion de petites couches du métal travaillé sur l'outil. Les caractéristiques de l'arête de coupe rapportée sont indiquées sur la figure 1.9 où :

- s : est la saillie de l'arête rapportée,

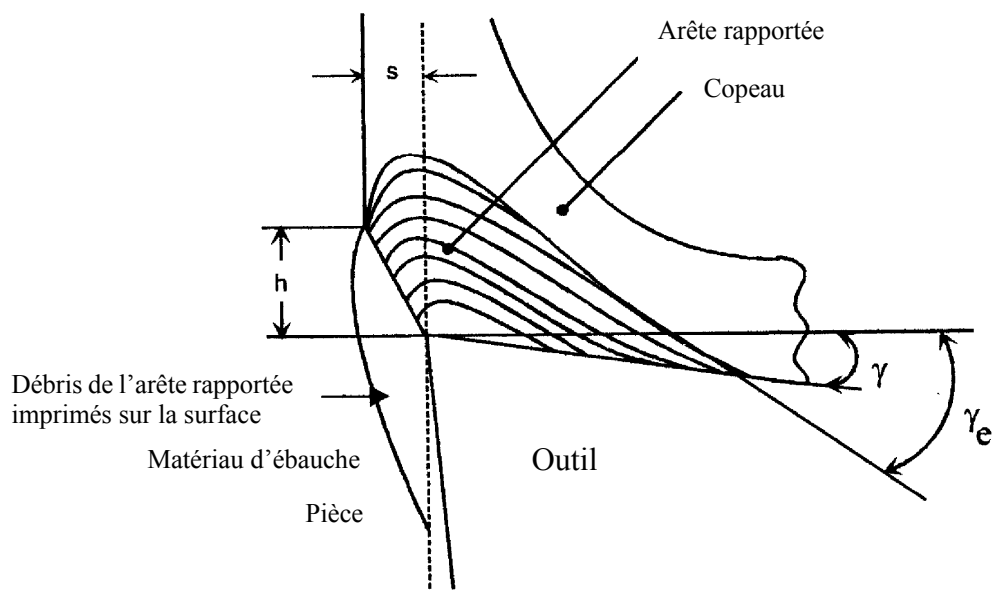


Figure 1.9 : Caractéristiques géométriques de l'arête rapportée [4]

- h : la hauteur de l'arête de coupe,
- γ et γ_e sont respectivement l'angle de coupe nominal et l'angle de coupe effectif.

Cette arête est formée quand les frottements outil - copeau augmentent à un degré où la force nécessaire pour le glissement est plus grande que la résistance au cisaillement du matériau de copeau. Il en résulte des fissures au dessous de la face en dépouille et auprès de la zone en contact outil - copeau (fig.1.10).

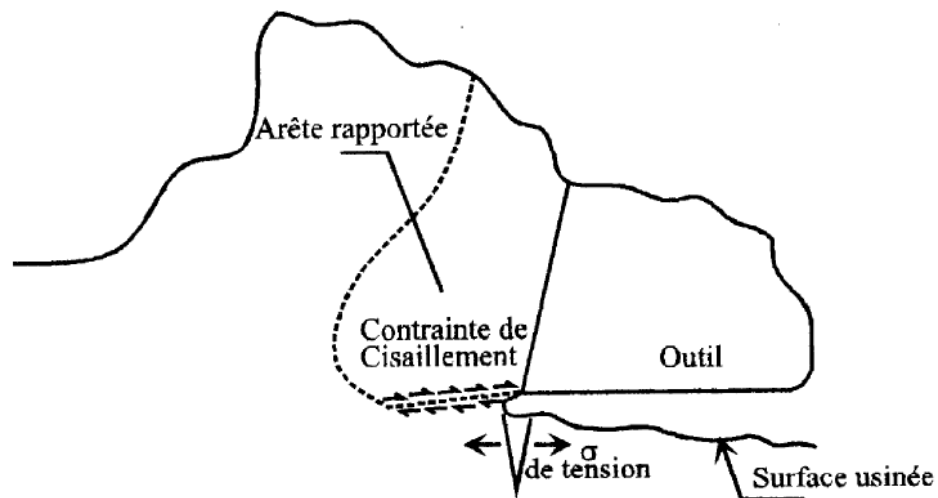


Figure 1.10 : Effet de l'arête rapportée sur le cisaillement de la couche superficielle [4]

Ernst et Martelotti [4] ont conduit des travaux sur les facteurs influant la taille de l'arête rapportée, et ont trouvé que cette taille diminue avec :

- la diminution de l'épaisseur de copeau,
- l'augmentation de l'angle de coupe,
- l'augmentation de la finesse de l'outil,
- la lubrification.

Ceci a été confirmé récemment par le travail de Schwerd [4] sur l'influence de la vitesse de coupe sur la formation de l'arête rapportée. Par ailleurs, les observations de Williams et Rollason [16] ont montré qu'une augmentation de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance et de la température de la pièce entraînent une diminution de la taille de

l'arête rapportée. Pour les aciers à bas et moyen carbone, il se trouve que l'arête rapportée disparaît à une vitesse comprise entre 90 et 100 m/min. [4].

Une des conséquences de la formation de l'arête rapportée est qu'elle assume le rôle de l'arête coupante de l'outil (fig.1.9). Elle modifie non seulement le processus de formation de copeau, mais aussi, ce qui est le plus important, elle change les dimensions de la pièce et modifie les caractéristiques topographiques, mécaniques et métallurgiques de la surface usinée. D'une manière plus précise, l'arête rapportée peut changer l'angle effectif de coupe et le rayon de courbure du bec de l'outil autour duquel le matériau, s'écoule. Cependant les frottements entre le matériau écoulé et le matériau stationnaire et la température augmentent avec l'augmentation de la taille de l'arête rapportée.

D'autre part sous des conditions de coupe favorables à la formation de l'arête rapportée, cette arête se développe en taille et devient instable jusqu'à la rupture, une partie s'adhère à la surface usinée et s'ajoute aux aspérités de la surface usinée. Par conséquent cette instabilité produit une surface très rugueuse.

1.5.2 Génération de chaleur

En coupe, la chaleur est générée par le travail fait par la déformation plastique dans la zone de cisaillement et par les frottements de glissement à l'interface copeau-outil et entre la surface usinée et la face de dépouille de l'outil. La distribution de la température joue un rôle important au cours de la coupe dans son influence sur les propriétés des pièces usinées et sur le bon déroulement du processus d'usinage.

Plusieurs chercheurs ont essayé de déterminer la distribution de la température au cours de la coupe [17,18] en utilisant les modèles de cisaillement plan et par éléments finis.

Il existe aussi d'autres essais expérimentaux ou théoriques de mesure de la température au voisinage de la région de coupe. Des travaux récents de recherche dans ce domaine ont utilisé la méthode des éléments finis (fig.1.11) pour illustrer la distribution de la température dans le système outil - copeau - pièce.

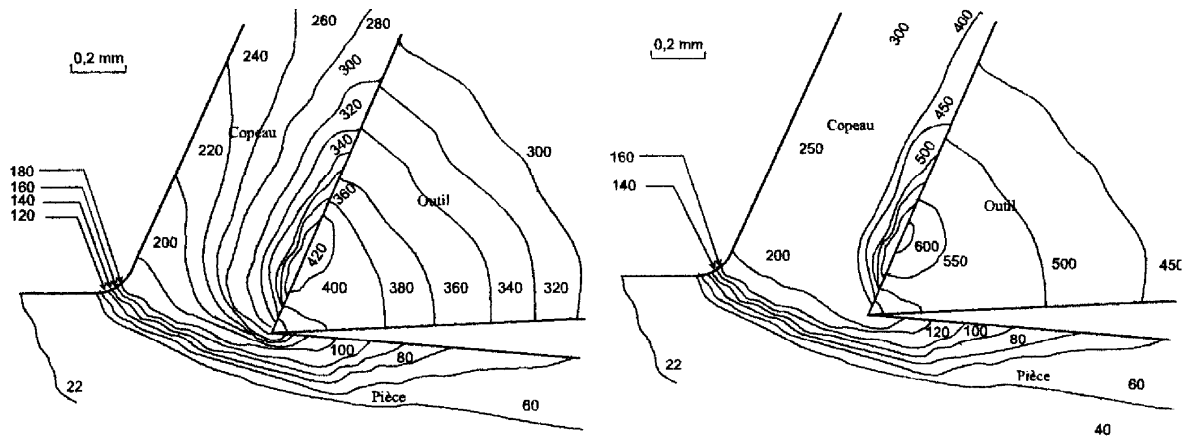
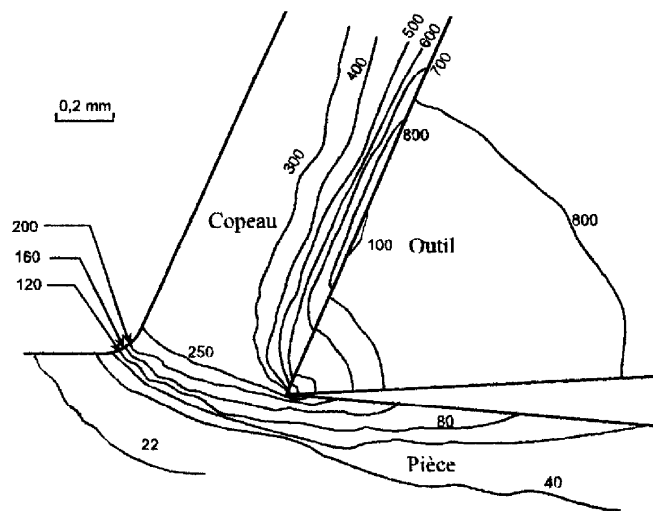
(a) Vitesse de coupe $V= 29,6$ m/min(b) Vitesse de coupe $V= 78,6$ m/min(c) Vitesse de coupe $V= 155,4$ m/min

Figure 1.11 : Distribution de la température [17]

Les travaux réalisés par TAY et al [17], et MURARKA [18] permettent de conclure que :

- Il y a une augmentation rapide de la température, le long de la face de dépouille pour une courte distance suivie par une diminution régulière (fig.1.11).
- La température dans la zone primaire de déformation augmente le long des sections parallèles jusqu'à la face de coupe à partir des frontières du matériau non - cisailé, jusqu'aux frontières du copeau.

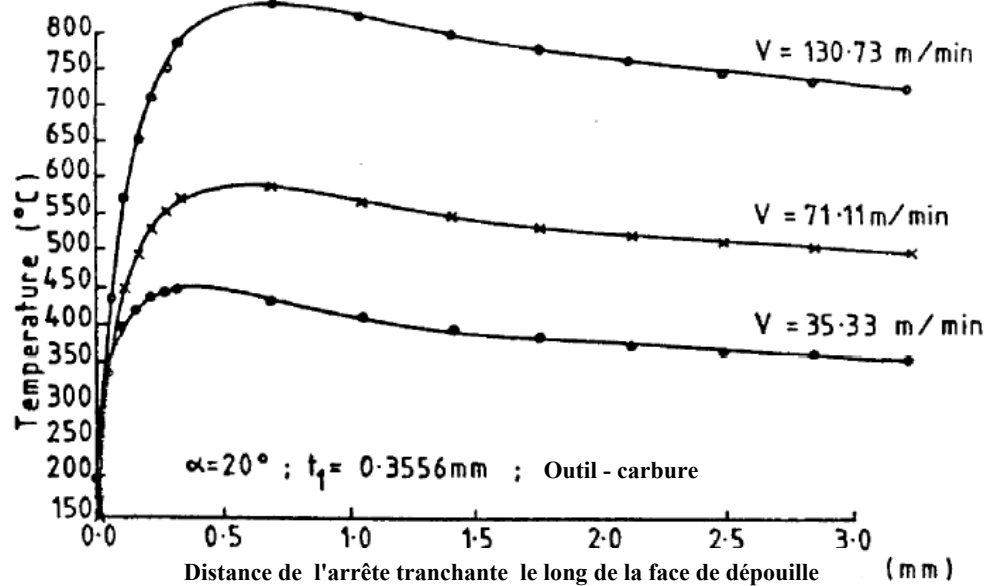


Figure 1.12 Effet de la vitesse de coupe sur la température de la face de dépouille [4]

c) Les autres températures augmentent avec l'augmentation de la vitesse de coupe et/ou l'avance (fig. 1.12 et 1.13).

d) Il existe un angle de coupe optimal pour une température minimale [4].

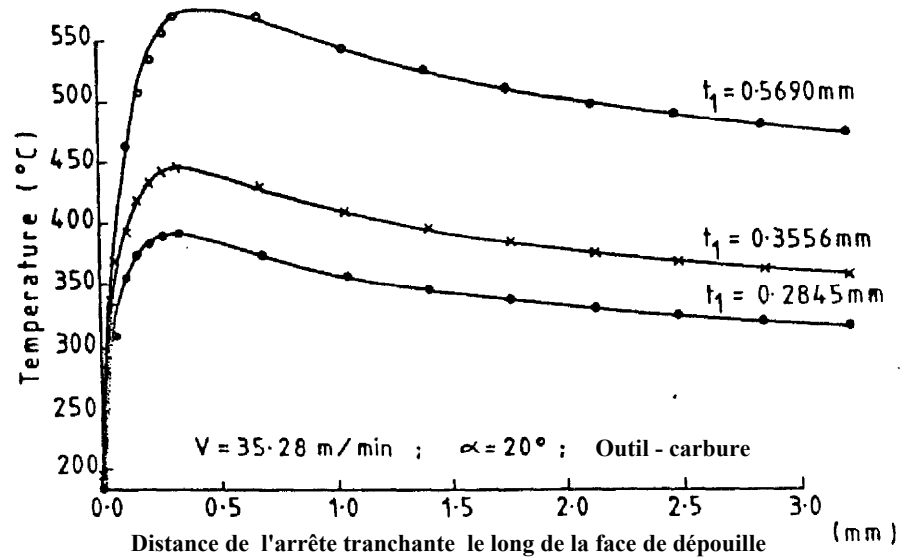


Figure 1.13 Effet de l'avance sur la température de la face de dépouille [4]

Le travail fourni pour créer un copeau est intégralement transformé en chaleur ; celle-ci est évacuée par :

- le copeau ;

- la pièce ;
- l'outil et le porte outil.

1.6 Conclusions

Le processus de formation de copeau est un phénomène difficile à comprendre dans lequel les phénomènes physiques de base sont peu à peu intégrés afin d'améliorer la qualité des prévisions. Cependant la prévision du processus de déformation à partir des propriétés du matériau et des conditions de coupe est compliquée. En effet, le calcul théorique des forces d'usinage et de l'angle de cisaillement nécessite par exemple la connaissance des conditions des déformations. Les déformations sont affectées par la distribution de la température durant l'usinage qui peut affecter la ductilité du matériau travaillé. La température est un paramètre important qui affecte le processus d'usinage et l'état de la surface usinée. Comme conséquence des déformations produites durant l'usinage, il devient important de considérer la surface usinée, non seulement comme un problème topographique (profile géométrique), mais aussi comme l'ensemble de toutes les altérations produites par l'usinage dans la couche superficielle. Le concept unifiant la topographie et ces altérations dans la couche superficielle est connu par le terme Intégrité de surface, et sera discuté dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

Caractéristiques des surfaces usinées

2.1 Introduction

A première vue, la génération d'une surface usinée fait intervenir autant la forme que les traces laissées par le tranchant au contact de la pièce pendant leur mouvement relatif. La coupe donne lieu à bon nombre de phénomènes [15], tels que :

a) Les déformations élastiques et plastiques du matériau travaillé.

b) L'apparition dans certaines conditions, d'une «arête rapportée», dépôt naissant sur l'arête tranchante de l'outil;

c) Les effets dynamiques qui se manifestent par des vibrations du système mécanique (machine-outil / outil / pièce) de frottements entre le copeau et la face de dégagement ainsi qu'au contact entre facette d'usure sur plan de dépouille et pièce usinée.

L'existence de ces phénomènes justifie l'affirmation que les traces (défauts microgéométriques) laissées par l'outil coupant lors de son passage sur la surface qu'il engendre différeront du tout au tout de celles que l'on aurait pu attendre en limitant l'analyse à la seule action des parties tranchantes de l'outil.

Les principales altérations dans la couche superficielle [1,19-21] concernent :

- La texture de la surface (rugosité et défauts de la surface),
- Le changement de la dureté superficielle (micro dureté),
- La distribution des contraintes résiduelles,
- La déformation plastique,
- Les transformations de phase,

Les causes principales de ces altérations sont [15]:

- Les hautes températures ainsi que les grands gradients de température,
- La déformation plastique,
- Les réactions chimiques et l'absorption chimique dans la nouvelle surface.

En conclusion, les propriétés physico-mécaniques de la couche superficielle ainsi que son aspect microgéométrique (rugosité) mettent en jeu l'action concomitante de tous les facteurs évoqués précédemment

2.2. Texture de la surface

2.2.1 Définitions des critères de rugosité (norme NF E 05-015)

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (fig.2.1) :

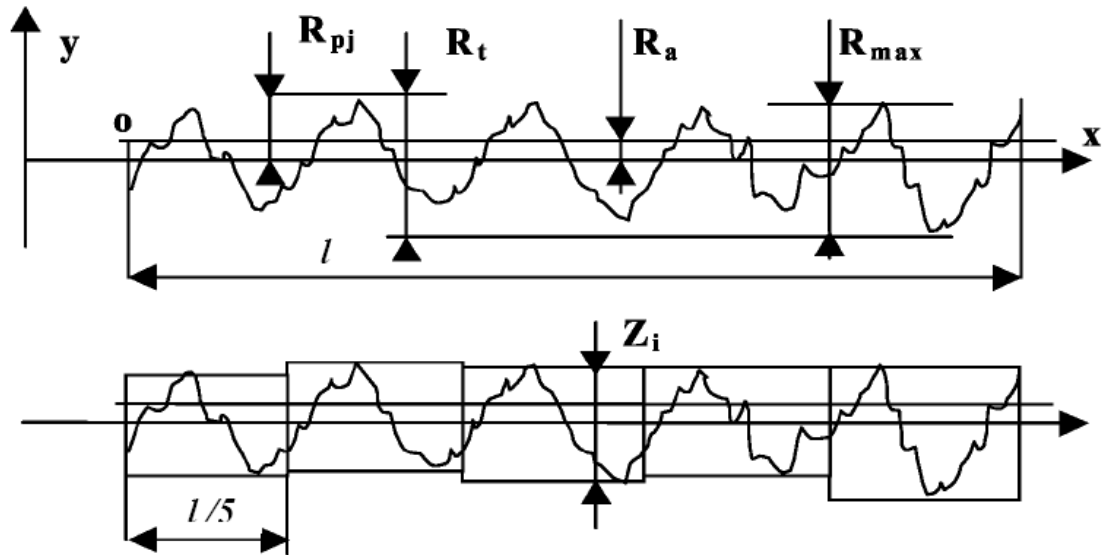


Figure 2.1: Paramètres de rugosité

Soit OX la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^l y dx = 0 \quad (2.1)$$

Où l est la longueur de palpement.

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, soit

Rugosité moyenne arithmétique R_a dite C.L.A. (Center Line Average), R_a représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à ox :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.2)$$

Rugosité moyenne quadratique R_q , dite R.M.S (Root Mean Square). Ce critère (non normalisé en France) représente l'écart moyen quadratique par rapport à ox :

$$R_q = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

Rugosité max. R_{max} , elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité

Rugosité totale R_t représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur de palpage l .

Rugosité R_z , représente la rugosité totale moyenne.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_1^5 Z_i \quad (2.4) \quad (\text{Voir fig.2.1})$$

2.3. Défauts de la surface usinée

2.3.1 Écailles

La formation des écailles est généralement attribuée à la présence d'une arête rapportée instable [15]. Lors de la croissance d'une arête rapportée instable une fissure se forme dans la Zone secondaire et une autre sous le bec de l'outil [4]. Cette dernière se propage sous la surface dans la zone primaire de déformations. Lors de la disparition de l'arête de coupe rapportée, un débris contenant cette fissure est laissée à la surface de la pièce et forme les écailles. Selon [22] ces fissures pénètrent d'autant plus profondément que l'angle d'attaque est petit et la profondeur de coupe est grande. Le nombre et la taille d'écaille sont très sensibles à la formation de l'arête rapportée. Dans le cas du tournage de l'alliage d'Aluminium 7075 à l'état trempé avec une avance par tour de 0,18 mm un grand nombre d'écailles de grandes tailles sont formées à cause de la grande taille de l'arête rapportée. Le tournage du même alliage mais à l'état revenu présente une diminution de la taille de l'arête rapportée et de ce fait entraîne la formation d'écailles de petite taille. La présence d'écailles de grande dimension présente des modifications locales de rugosité liées à la formation temporaire de l'arête rapportée [23].

2.3.2 Cavités

La formation des cavités est liée à un arrachement de matière consécutif à la propagation de fissures en dessous du niveau de la surface dans la région du bec de l'outil, en présence d'une arête rapportée. Les cavités sont moins bien définies et souvent plus grandes lors de la formation de l'arête rapportée. Il a été proposé [22] que la

propagation des fissures entre le constituant et la matrice conduit à des instabilités locales de l'arête rapportée. La propagation de fissures dans la région du bec de l'outil est une des caractéristiques de la formation de l'arête rapportée instable pour les matériaux contenant des phases secondaires. L'arrachement du constituant, combiné avec déformation des écailles crée les cavités moins bien définies, ou uniquement des écailles.

2.3.3 Microstries

Les défauts de petites tailles sont principalement dus aux interactions entre l'arête de coupe et la surface. Le labourage de la surface par des aspérités sur l'arête de coupe forme des stries bien définies. Les stries moins définies sont provoquées par des micros arêtes de coupe rapportées. Les plus grandes aspérités peuvent former des micro-copeaux qui restent parfois attachés à la surface, au bout de la strie. Des fragments qui se détachent de l'outil ont été observés à la fin d'une strie, derrière le copeau qu'ils ont créé [19].

2.3.4 Microfissures

La présence de microfissures dans les surfaces usinées on été mis en évidence par un certain nombre de chercheurs [4]. Les microfissures sont produites lorsque le matériau subit des déformations sévères et causent des concentrations de microcontraintes qui conduisent à des fractures locales. La microfissuration est le processus qui passe par deux étapes. La naissance et coalescence des microfissures voisines.

Les microfissures sont produites durant l'usinage de plusieurs matériaux et avec une variété de conditions de coupe. Les microfissures ont été observées dans les zones de déformation dans le cas de l'usinage d'un matériau à deux phases. La densité des microfissures est grande au voisinage de l'arête de coupe et diminue vers la surface libre de copeau

L'usinage en présence de l'arête rapportée produit des microfissures dans la zone secondaire de déformation entre l'arête rapportée stationnaire et le copeau [4]. Il est possible cependant qu'un certain nombre de microfissures naissent dans la zone primaire de déformation passent en dessous de l'outil et apparaissent dans la surface usinée. Gillibrand [4] a propose notamment que les microfissures sont associés avec les cavités dans les surfaces usinées et qu'elles se forment aux joints entre les phases dures et ductiles du matériau comme par exemple entre la ferrite et la perlite dans les aciers.

Il est donc évident que les microfissures existent dans les surfaces usinées et qu'elles influencent les propriétés fonctionnelles des pièces usinées. A la preuve que plusieurs études ont traité le problème de fatigue en présence de courtes fissures [4]. Cependant les microfissures sont considérées comme un paramètre important de l'intégrité de surface et qui ont attiré beaucoup d'attention [4].

En conclusion de ce qui précède il semble que les écailles, les cavités et les microfissures sont dues à la formation d'un copeau discontinu ou d'une arête rapportée. La présence de ces défauts est directement liée au processus de formation de copeau donc aux paramètres de coupe.

2.4. Facteurs conditionnant l'état des surfaces tournées

On peut classer les facteurs conditionnant l'état des surfaces usinées d'après Enache [15] comme suit:

- a) Propriétés physico-mécaniques du matériau travaillé;
- b) Paramètres définissant le régime de coupe;
- c) Paramètres géométriques liés à la partie active de l'outil;
- d) Microgéométrie et usure de l'outil;
- e) Fluides de refroidissement et de lubrification

2.4.1 Effet du régime de coupe sur la rugosité

Pour des vitesses de coupe importantes (fig.2.2), le profil de la pièce est très voisin de l'enveloppe théorique de l'outil. L'état de surface s'améliore avec une augmentation de la vitesse de coupe. On observe une vitesse optimale pour divers couples outils matériau travaillé [15]. Pour des vitesses inférieures, il se produit des adhérences de copeaux, le détachement se produit de façon irrégulière et diminue la qualité de la surface obtenue [24].

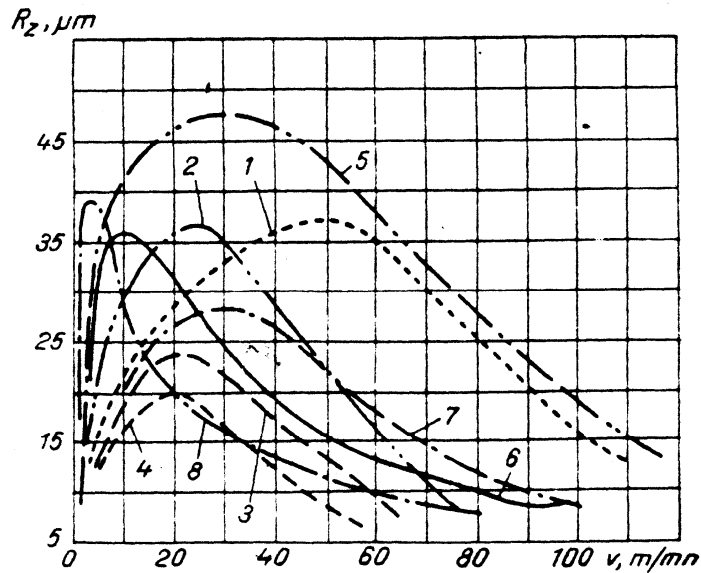


Figure 2.2 : Variation des hauteurs d'aspérités avec la vitesse de coupe pour des aciers à diverses teneurs en carbone. [15]

Aciers à teneur moyenne en carbone: 1) ferrite et perlite lamellaire; 2) perlite globulaire; 3) sorbite très dure; 4) troostite et sorbite.
 Aciers à faible teneur en carbone; 5) ferrite et perlite lamellaire 6) ferrite et perlite globulaire.
 Aciers à forte teneur en carbone; 7) perlite lamellaire; 8) perlite globulaire.

Tous les rapports d'expériences montrent que l'état de la surface usiné s'améliore avec la vitesse de coupe. La figure 2.3 illustre ces observations pour différentes vitesses de coupe. Les états pratiques mesurés sont très voisins de la rugosité théorique calculée avec la géométrie de l'outil et de l'avance [1,6].

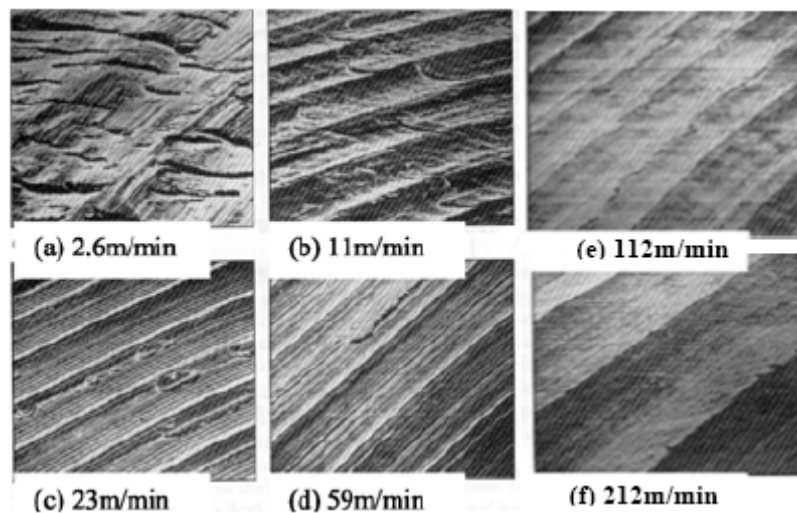


Fig.2.3 Microgéométrie de surface pour diverses vitesses de coupe [6]

2.4.1.1 Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants

L'influence des fluides réfrigérants se traduit par une diminution de la rugosité de la surface accompagnée d'un écrouissage supplémentaire des couches superficielles du matériau travaillé.

La figure 2.4 nous mène à formuler les commentaires suivants:

1. Il y'a une diminution nette de la rugosité par rapport à l'usinage à « sec », tout particulièrement avec des fluides activés maintenant les déformations plastiques à des niveaux relativement bas, réduisant les efforts de coupe et de frottement, la température, et prévenant la formation du copeau adhérent [15].

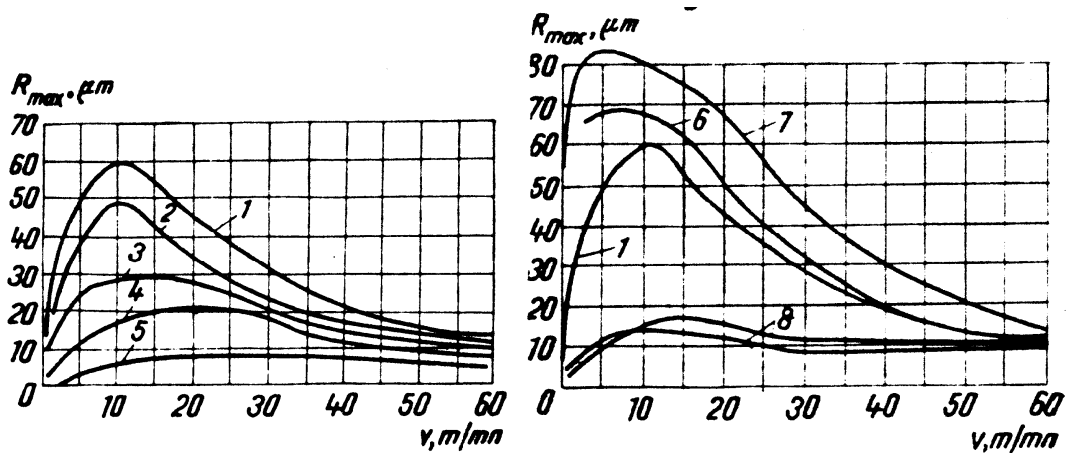


Fig. 2.4 : Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants sur les états de surfaces usinées en tournage [15]

- 1) air, 2) huile légère ; 3) pétrole sulfoné ; 4) pétrole lampant ;
5) tétrachlorure de carbone CCl₄ .6) hydrogène ;
7) azote ; 8) oxygène

2. Si l'on crée une atmosphère neutre autour de la coupe (azote liquide, hydrogène gazeux), la rugosité augmente [15]. Ce mode de travail favorise considérablement la formation du copeau adhérent. Des états de surface remarquables ont été obtenus par refroidissement à l'oxygène; la formation de pellicules d'oxydes métalliques entraîne une diminution spectaculaire des frottements et des déformations plastiques. C'est par cet artifice que l'on obtient les rugosités les plus faibles.

2.4.1.2 Effet de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité

L'épaisseur de copeau non déformé ou encore appelé avance par tour influe considérablement sur la rugosité des surfaces usinées avec de faible vitesse de coupe comme il est montré sur la figure 2.5 Dans cette figure la rugosité augmente avec

l'augmentation de l'épaisseur de copeau non déformé. Alors que, relative à l'influence de l'épaisseur du copeau non déformé sur la rugosité montrent que la rugosité parallèle à la direction de la coupe diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de copeau non déformé, alors que la rugosité normale varie dans l'autre sens [4]. Les résultats expérimentaux [25] permettent de considérer que la profondeur de passe n'influe pas sur la rugosité et que le taux et la profondeur d'écroûissage ne changent pas avec la profondeur de coupe.

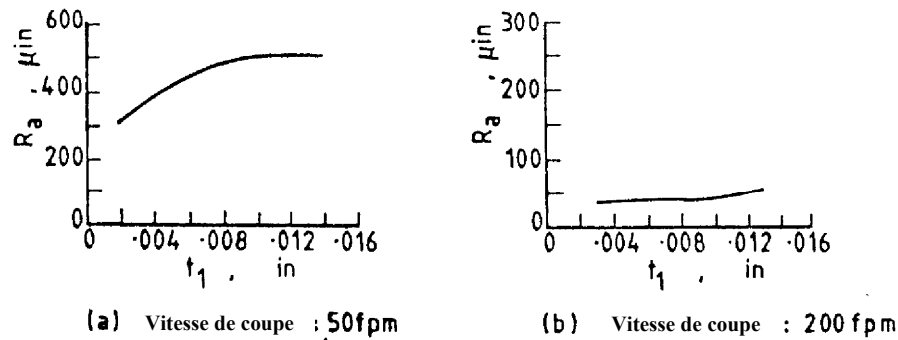


Fig. 2.5 Effet de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité [4]

2.4.1.3 Effet de l'angle de coupe sur la rugosité

La rugosité des surfaces usinées diminue avec l'augmentation de l'angle de coupe durant l'usinage du cuivre [4]. Les défauts de surface sont les plus nombreux pour l'alliage d'Aluminium 7075 usiné après revenu avec un angle de coupe +30°, mais la rugosité est inférieure à celle obtenue avec un angle de coupe -8° et il est de même pour

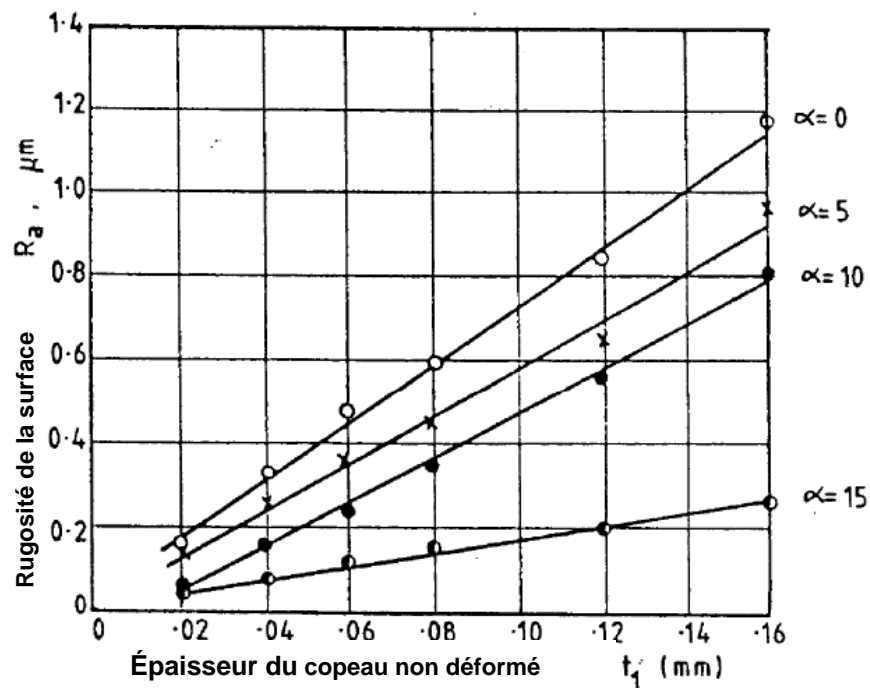


Figure 2.6 : Effet de l'angle de coupe et de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité [4].

l'alliage d'Aluminium 2024 [23]. Les résultats présentés sur la figure 2.6 montrent la diminution de la rugosité avec l'augmentation de l'angle de coupe, cet effet est beaucoup plus accentué pour des grandes valeurs de l'épaisseur du copeau non déformé.

2.4.2 Influence du régime de coupe sur l'écroissage superficiel

Dans la plus part des opérations d'usinage, la couche superficielle de la pièce subit des changements de la dureté, mesurée par les techniques de dureté (e.g. Vickers, Knoop) [26].

En fonction des conditions de coupe et de la matière d'oeuvre, la couche superficielle est soit durcie soit adoucie [4]. Le durcissement est associé avec les déformations plastiques et/ou les transformations de phase [15]. L'adoucissement est associé avec les transformations de phase et/ou avec le vieillissement.

Plusieurs travaux [1,15] ont étudié l'influence de l'usinage sur le phénomène d'écroissage, ces travaux ont montrés que la dureté maximale se trouve à la surface et diminue rapidement avec la profondeur au dessous de la surface. L'écroissage de la surface durant l'usinage augmente avec:

- L'augmentation de l'épaisseur de copeau non déformé,
- La diminution de l'angle de coupe,
- La diminution de l'angle de dépouille,
- L'augmentation de l'usure de la surface de dépouille,
- La diminution de la vitesse de coupe.

Sur la figure 2.7 apparaît la profondeur d'écroissage h , en fonction de la vitesse de coupe, pour l'acier XC45 travaillé à sec avec une avance transversale $f = 0,05$ mm/tr, avec un outil dont la pente effective de coupe $\gamma = 10^\circ$ et l'angle de dépouille $\alpha = 8^\circ$.

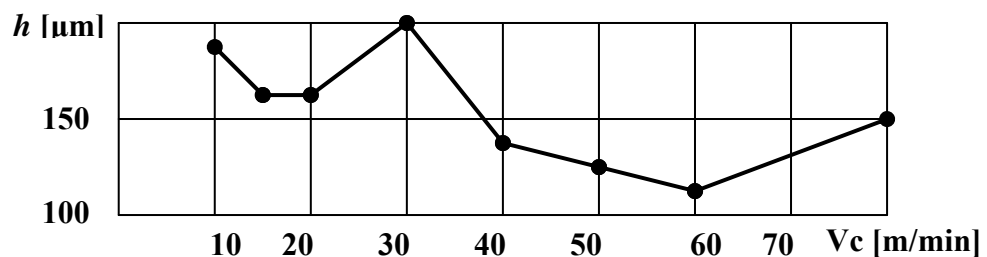


Fig. 2.7 : Profondeur écroie en fonction de la vitesse de coupe d'un acier XC45 [15].

La figure 2.8 traduit la variation d'épaisseur écrouie en fonction du régime de coupe pour le tournage de l'acier XC45.

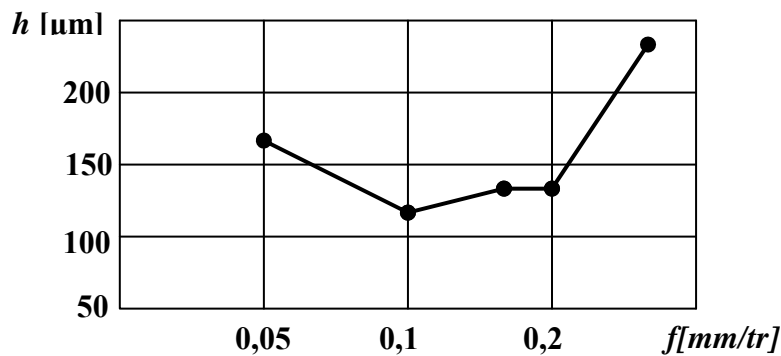


Fig. 2.8 : Variation du taux et de la profondeur d'écrouissage superficiel en fonction de l'avance du tournage d'un l'acier XC 45 [15].

La profondeur de passe (ou profondeur de coupe) est de peu d'importance pour l'écrouissage de la surface usinée; celui-ci est engendré par la pointe de l'outil, et l'on conçoit qu'augmenter la profondeur de passe ne puisse agir directement sur lui.

2.4.3 Influence des conditions de coupe sur les contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont les contraintes qui existent en l'absence de toute sollicitation extérieure. Les processus de fabrication sont souvent à l'origine de ces contraintes résiduelles. Les effets de ces contraintes sont souvent préjudiciables. Leurs effets peuvent s'ajouter ou se retrancher aux contraintes de service selon leur amplitude, leur signe et leur répartition.

Elles constituent donc un facteur d'endommagement et de mauvaise tenue des pièces à la fatigue.

Une augmentation des vitesses peut conduire à la production de contraintes résiduelles importantes en liaison avec les contraintes mécaniques élevées générées sur les surfaces lors de l'usinage. De plus, les forces transversales augmentent avec l'usure des outils. Les températures associées au frottement augmentent en provoquant une contrainte de traction résiduelle au voisinage de la surface de la pièce usinée et des contraintes de compression dans la zone la plus profonde de la surface.

La figure 2.9 confirme l'effet de l'usure sur les contraintes résiduelles dans la surface usinée en tournage d'un acier allié. On observe ici une couche trempée de 20 µm pour un outil vierge et de 30 µm pour un outil ayant subi une usure correspondante à

l'usure en dépouille de l'outil de $VB=0.2\text{mm}$.

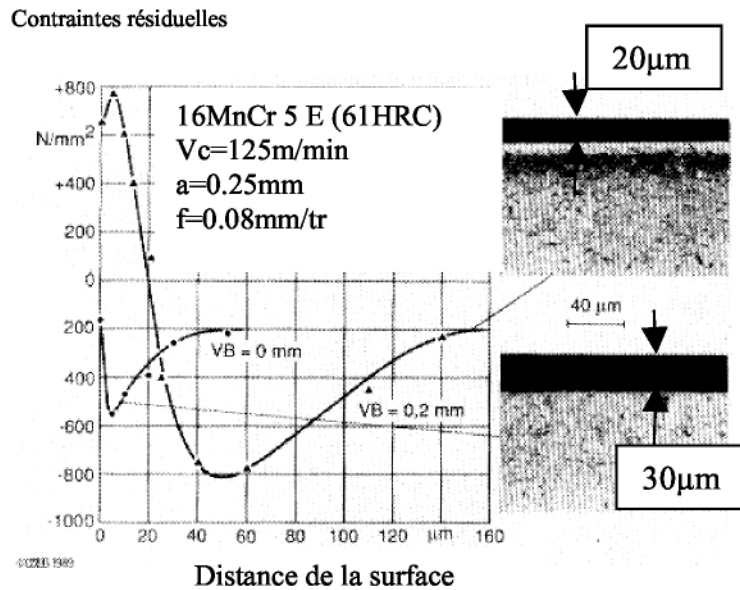


Fig.2.9 : Contraintes résiduelles en sous couches [6]

2.4.4 Effet des phénomènes dynamiques

L'usinage des métaux est accompagné dans certain cas par de violentes vibrations entre l'outil et la pièce usinée sous l'action des efforts de coupe. Ce phénomène de vibrations s'appelle aussi le broutement ou le broutage qui est dû en grande partie à plusieurs paramètres intervenant et interférant, tels que les paramètres de coupe lors d'un usinage. Ceci entraîne un mauvais état de surface des pièces usinées et une réduction de la durée de vie de l'outil de coupe.

Les vibrations du système pièce outil machine [27], dégradent la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et des organes de la machine et provoquent ainsi une altération des conditions d'usinage nominales. Un broutement important diminue la productivité et parfois rend impossible l'opération d'usinage sur une machine-outil. Il en existe deux types, les vibrations forcées et les vibrations auto-excitées.

Les vibrations forcées apparaissent sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par [27]:

- La variation des forces qui s'exercent sur le système qui sont dues à la coupe discontinue tel que le tournage d'un arbre rainuré longitudinalement par exemple ou la coupe avec une surépaisseur variable ;

- Les forces centrifuges d'inertie dues au manque d'équilibre des masses en rotation (mandrin, poulies, ...etc.) ;
- Les chocs dus aux incidents ou à la précision insuffisante des surfaces actives des pièces, des organes de transmission (usure des pièces d'un mécanisme, manque de précision des engrenages), aux engagements et aux changements de régimes brusques, etc.

Les vibrations auto-excitées sont un phénomène plus complexe et bien plus fréquent dans la coupe des métaux. Ses causes essentielles sont :

- La variation de la force de frottement du copeau glissant sur la face de coupe de l'outil ;
- L'écroûissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur ;
- Les variations dimensionnelles de l'arête rapportée qui modifient en cours d'usinage, l'angle de coupe et la section du copeau.
- L'amplitude des vibrations auto-excitées varie en fonction de la dureté du matériau usiné, du régime de coupe, de la géométrie de l'outil de coupe et de la rigidité du système pièce outil machine. Les vibrations sont plus importantes pour les aciers à ténacité élevée que pour les fontes. Elles diminuent avec l'augmentation de la dureté et de la résistance à la traction (R_t) du métal usiné ; et augmentent avec un allongement et une striction plus importants. Dès que la vitesse de coupe croît au tournage, les vibrations augmentent d'abord puis diminuent. La valeur de la vitesse de coupe qui définit la diminution des vibrations est d'autant plus faible que l'avance est grande. Dans le cas du chariotage, les vibrations augmentent avec la profondeur de passe. Les vibrations sont moins influencées par l'avance que par la vitesse et la profondeur de passe. L'augmentation de l'avance diminue les vibrations (lorsque l'avance est plus faible que la profondeur). Lorsque l'avance est plus grande que la profondeur, les vibrations augmentent avec l'augmentation de l'avance [27].

2.4.5 Effet des déformations plastiques

Les surfaces usinées sont généralement déformées plastiquement. La couche déformée dans la surface usinée est la partie du matériau de la pièce qui traverse la zone primaire de cisaillement où elle fait l'objet des contraintes résultantes des efforts appliqués par la face de dépouille de l'outil. Un modèle simple de déformation de la

surface est montré sur la figure 2.10

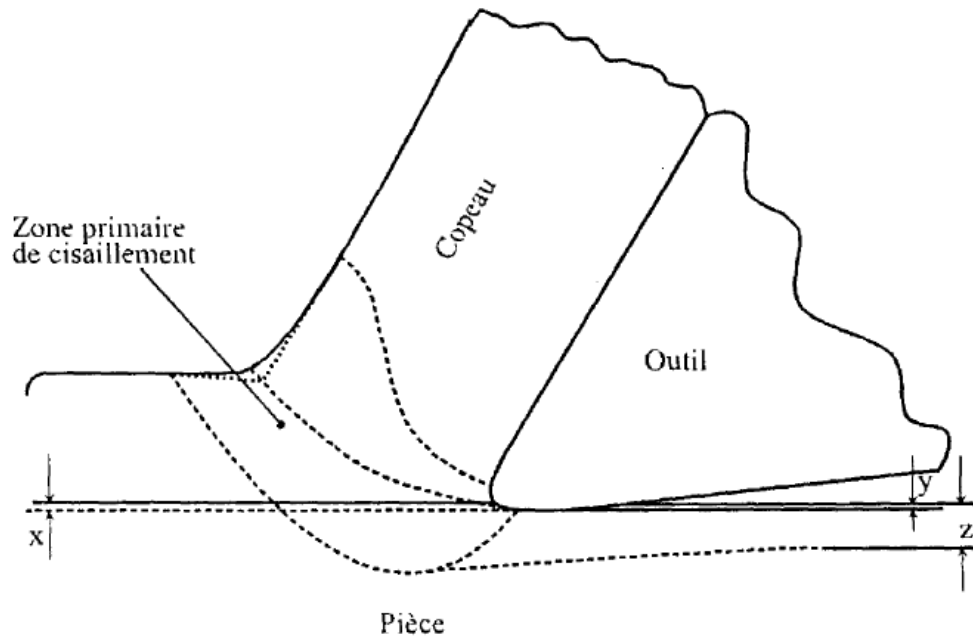


Figure 2.10 : Modèle de formation de surface [4].

Dans cette figure, la zone primaire de déformation pénètre en dessous du bec de l'outil à une profondeur "Z". L'arête tranchante est façonnée avec un rayon d'arrondi, une partie du copeau non déformé est déformée plastiquement dans la zone primaire de déformation et pressée par une quantité "X" au dessous de l'outil ajoutée à la compression plastique de la couche superficielle. Après le passage de l'outil, la surface revient à la hauteur « y ». Selon cette description, la déformation plastique et la profondeur de la couche déformée dépendent des contraintes dans la zone primaire et des facteurs qui les influent.

Jeelani et Ramakrishnan [4] ont trouvé dans le cas de l'usinage d'un alliage de titane et d'un acier maraging que le degré de déformation et sa profondeur augmentent avec :

- L'augmentation de la vitesse de coupe, sans déformation à faible vitesse de coupe,
- L'augmentation de l'usure de l'outil à toutes les vitesses de coupe,
- L'usinage sans lubrification.

2.4.6 Effet des changements de phase

Les changements de phase jouent un rôle important dans l'élaboration d'un état de surface. C'est ainsi que lorsqu'on usine un métal, l'échauffement des couches superficielles a non seulement comme conséquence leurs variations volumiques mais aussi une évolution qualitative par changement de phase, elle aussi source de variations de volume. Un échauffement intense de l'acier trempé tel qu'il apparaîtra aux grandes vitesses de coupe peut opérer des revenus et des trempes locales successives consécutives à la transmission rapide de la chaleur générée au voisinage de la coupe en l'absence de refroidissement ou, au contraire, par l'évacuation brutale de celle-ci au contact du liquide réfrigérant. Dans la mesure où la température dans la couche superficielle varie de façon continue selon la profondeur, il en résulte que sous l'effet des diverses températures de revenu les couches de métal prennent des structures différentes et avec elles des propriétés mécaniques et des densités différentes lorsqu'on pénètre de la surface vers le coeur de la pièce

En conclusion, les changements de phase survenant pendant la coupe au gré de l'échauffement des couches superficielles donnent naissance à des structures différentes de la structure initiale du métal, ce qui se traduit par des variations de propriétés mécaniques et de volume suivant la profondeur. Ces variations de volume ne sont uniformément réparties ni suivant la longueur, ni suivant la profondeur, et l'on assiste à des déformations élasto- plastiques conduisant à une augmentation ou à une diminution des dénivellations de contraintes existant sur la surface usinée.

Chapitre 3

Etude de la fatigue

3.1 Introduction

Les propriétés fonctionnelles en fatigue des pièces usinées sont très sensibles aux caractéristiques de leurs surfaces et de leur couche superficielle influencée [28,29], car les fissures s'initient généralement dans cette surface [22,30]. Les paramètres de l'intégrité de surface telle que la rugosité et les défauts de la surface, la microstructure et les propriétés physico mécaniques de la couche superficielle influencée, déterminent principalement l'amorçage et le début de la propagation des fissures. Le choix des paramètres de coupe et de l'état métallurgique du matériau lors de l'usinage est par conséquent important, vu qu'il détermine le processus de formation de copeau déterminant la qualité de la surface.

La géométrie de la surface usinée et ses altérations sont importantes pour l'amorçage des fissures. Field [29] a remarqué que peu de travaux ont été effectués pour déterminer la relation entre la rugosité et le comportement en fatigue [4,22,30] Toutefois une rugosité importante est préjudiciable, de plus l'influence des contraintes résiduelles à la surface et dans la couche superficielle jouent un rôle important dans le comportement en fatigue. Ceci peut être montré par les mesures des contraintes résiduelles ou la texture et la dureté ne sont pas changées [26].

La présence des microfissures dans la surface usinée joue un rôle important dans la rupture des pièces, vu que le stade d'amorçage est déjà consommé, ces microfissures constituent un stade avancé de l'amorçage de la rupture. De plus la présence des microfissures est observée après l'usinage de plusieurs matériaux avec une large gamme de conditions de coupe [4].

Les travaux menés par Gaceb [4] ont permis d'établir l'influence des conditions de coupe et l'état métallurgique sur la formation des microfissures durant l'usinage d'un acier spécial à moyen carbone (similaire à l'acier étudié). Étant donné que la présence des microfissures indique que le stade d'amorçage est déjà partiellement ou totalement consommé, la présence des microfissures représente probablement le paramètre qui a le plus d'influence sur la résistance à la fatigue des pièces usinées.

Le comportement relatif en fatigue des pièces dépendra principalement [22] de :

1. La texture de la surface,
2. La métallurgie de la couche superficielle,
3. Les contraintes résiduelles.

Il est toutefois difficile de séparer l'influence de la rugosité [22,30], des modifications microstructurales et des contraintes résiduelles du point de vue influence sur le comportement en fatigue [22,29,30]. Il est proposé que la présence des microfissures et les contraintes résiduelles dans la surface usinée jouent le rôle d'influence le plus important sur la résistance à la fatigue des pièces [4]. L'endommagement de toute pièce mécanique durant son chargement normal sous l'action d'efforts cycliques est la cause d'un phénomène de fatigue.

3.2. Aperçu sur le phénomène de fatigue

3.2.1 L'endommagement par fatigue

Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte qui varie périodiquement avec le temps, la rupture peut se produire pour une valeur de la contrainte maximale bien inférieure à la charge de rupture (R_r) et même à la limite élastique (R_e). Une telle rupture est dite de fatigue. Elle peut être définie comme étant la détérioration irréversible des propriétés des matériaux avec l'application de cycles d'efforts variables dans le temps [31]. L'importance technologique de la fatigue est considérable, du fait que de très nombreuses pièces sont soumises en service à des sollicitations cycliques. En général la fatigue se produit sans déformation plastique d'ensemble mais avec une déformation très localisée d'abord autour des défauts, au fond d'une entaille ou en surface ensuite à l'extrémité de la fissure une fois initiée.

La nature de la fissuration est progressive, la rupture finale apparaît brutalement, raison pour laquelle l'estimation de la durée de vie d'une pièce est importante, déterminant la capacité de résistance à la fatigue des pièces appelée « endurance ».

3.2.2 Mécanisme de rupture par fatigue

L'endommagement par fatigue mené jusqu'à la ruine de la pièce comprend trois stades d'importance variant suivant les matériaux et le système de sollicitation [31] ces stades sont

- Le stade de germination ou période d'amorçage,
- Le stade de propagation,
- Le stade de rupture brutale.

3.2.2.1 Stade d'amorçage

Il est considéré comme étant le stade le plus important engendrant la durée de vie des pièces mécaniques. Dans de nombreux cas mécaniques ce stade peut occuper jusqu'à 90% de la durée de vie totale d'une pièce [31]. Dans une pièce (éprouvette) lisse soumise à une charge

cyclique, il a été observé en surface des glissements localisés qui donnent naissance à des microlanguettes appelées extrusions ainsi qu'à des intrusions. Ces intrusions constituent en fait de petites microfissures qui peuvent éventuellement se développer. En générale l'amorçage des fissures résulte de la concentration de contrainte par suite des irrégularités de surface et des inclusions (fig. 3.1c), de la décohésion de l'interface matrice-inclusion, de la rupture de l'inclusion elle même et de la jonction de joint de grains (fig. 3.1b). L'amorçage des fissures se produit principalement à la surface car :

- Les dislocations sont plus mobiles à la surface qu'à coeur (fig.3.1a),
- La surface est soumise à l'agressivité de l'environnement,
- Les défauts des traitements thermiques sont situés à la surface (tapures de trempe, etc...).

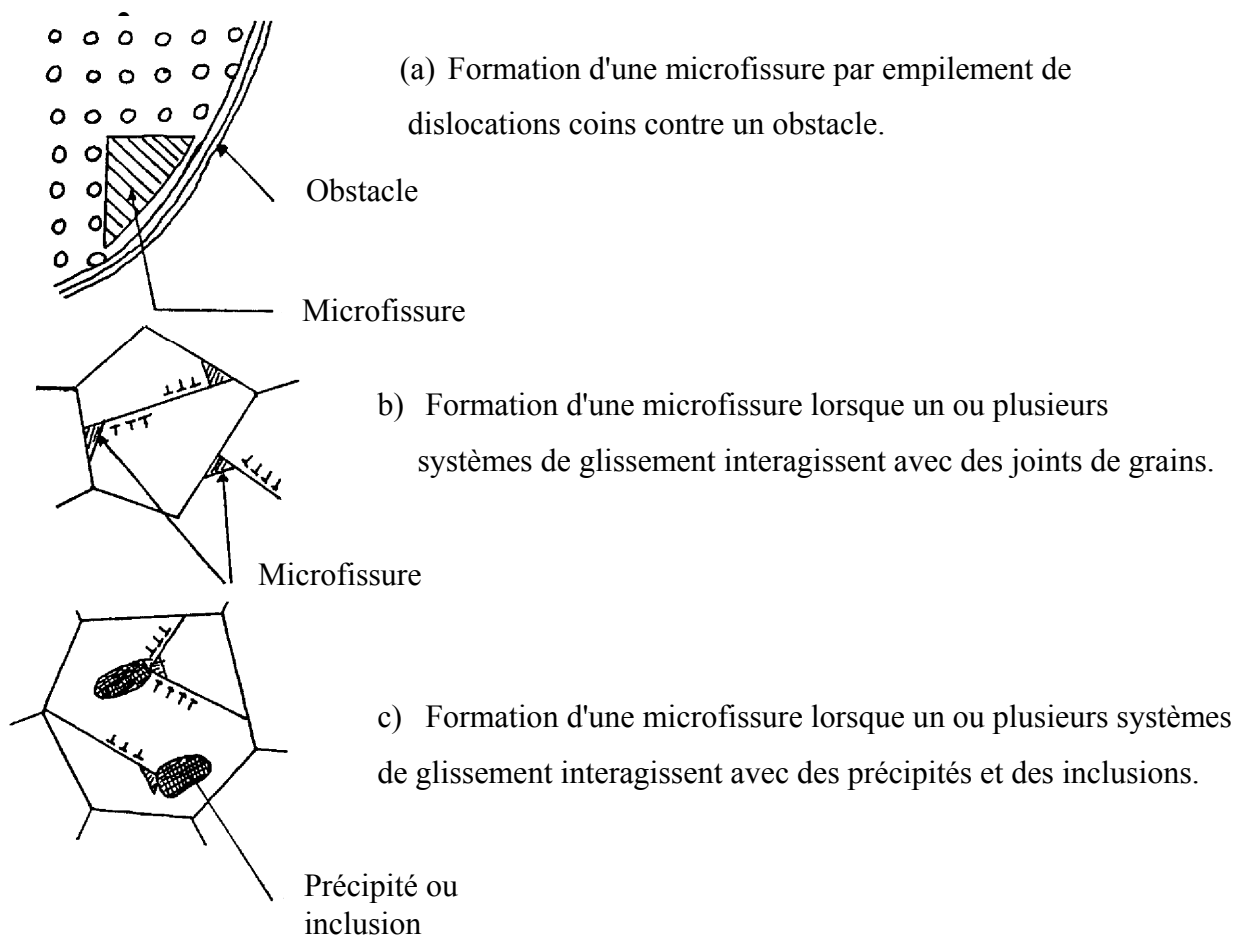


Figure 3.1 Amorce des fissures par fatigue [31]

D'autre part le va et vient des dislocations dans les bandes persistantes produit des défauts ponctuels qui provoquent du glissement en surface sous forme d'extrusions et d'intrusions.

3.2.2.2 Stade de propagation

Les microfissures formées pourront avancer graduellement au cours de chaque cycle, en s'ouvrant durant l'augmentation de la charge et en se renfermant partiellement par déformation plastique. Ce stade de progression de la fissure est composé de deux stades [31].

Dans le premier stade (stade I), les microfissures formées sont dans le prolongement d'une intrusion, soit dans un creux le long d'une ligne de glissement. Selon le matériau, elles progressent en restant dans le plan de glissement initial où elles sont apparues jusqu'à une certaine profondeur qui dépend surtout de la dimension des grains. Au delà, on observe un changement de direction et lors du franchissement des joints de grains, les fissures quittent le plan de scission maximale pour le plan de contrainte normale de tension maximale (stade II). Ceci est la conséquence du changement de régime des contraintes, car le rapport des contraintes de cisaillement aux contraintes de traction diminue progressivement de la périphérie vers le centre par suite de la présence des contraintes résiduelles. Dans le premier stade, la fissure progresse par scission selon un plan incliné de 45° par rapport à l'axe de traction, par contre dans le deuxième stade, la fissure progresse en première approximation selon une section droite (pour une sollicitation axiale [31]). Seules, quelques fissures atteignent le premier stade de propagation. En effet dès qu'une fissure dépasse suffisamment ses voisines elle empêche leur progression, du fait de la diminution de la concentration de contrainte qu'elle provoque derrière elle.

3.2.2.3 Rupture brutale

Lorsque la longueur de fissure atteint une dimension critique, la rupture de la pièce intervient. Les deux parties de la cassure correspondant au stade II se distinguent bien par les techniques visuelles d'examination.

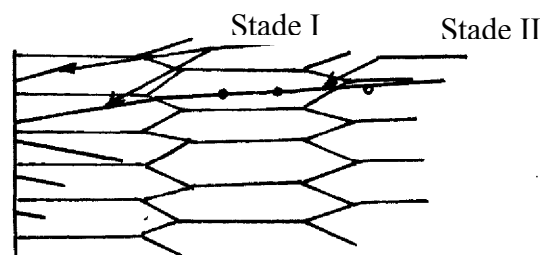


Figure 3.2 schéma de propagation de la fissure

3.2.3 Diagramme d'endurance

La durée de vie d'une pièce (ou d'une éprouvette) est caractérisée par le nombre de cycles à la rupture (N). La courbe de Whöhler représente la variation des contraintes dynamiques en fonction du nombre de cycles à la rupture, on porte en ordonnées les contraintes appliquées et en abscisse le logarithme décimal du nombre moyen de cycles à la rupture. Cette courbe divise le plan de coordonnées en trois domaines comme il est montré sur la figure 3.3, où le domaine de fatigue oligocyclique, sous fortes contraintes où les ruptures surviennent après un petit nombre de cycles $N_r \leq 10^5$ cycles, le domaine d'endurance limitée, les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycles croissant avec la réduction de la contrainte $10^5 \leq N_r < 5 \cdot 10^6$ à 10^7 , et le domaine d'endurance illimitée sous faibles contraintes pour les quelles la rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles (10^7 , $3 \cdot 10^7$, et même 10^8 et 10^9) supérieure à la durée de vie envisagée de la pièce. Ce domaine présente un plateau qui détermine la limite d'endurance en dessous de la quelle il n'y a pas de rupture par fatigue. Pour des contraintes maximales inférieures à σ_D c'est à dire inférieure à (1/2 ou 1/3) de σ_D , la dimension des microfissures n'atteint pas la taille critique, après un nombre de cycles correspondant au troisième domaine de la courbe de Wöhler.

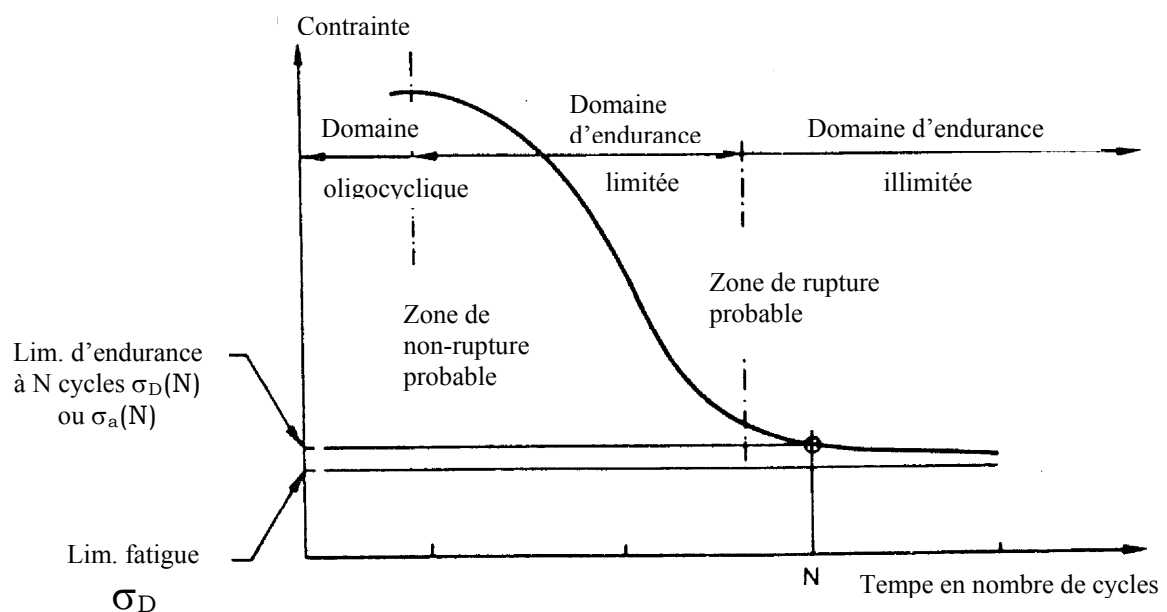


Figure 3.3 diagramme d'endurance ou courbe de Whöhler

3.3 Évolution structurale en cours de la fatigue

Depuis quelques années les possibilités de la microscopie électronique ont permis des progrès considérables dans la connaissance des phénomènes liés à la fatigue des métaux. Ce fut d'abord la possibilité d'observer par microscope optique les surfaces de rupture. Plus récemment c'est l'examen au microscope électronique à transmission de lame mince qui a permis de suivre l'arrangement des dislocations dans le métal. Finalement l'apparition du microscope électronique à balayage a offert de nouvelle facilité pour l'examen direct des surfaces.

3.4 Modifications superficielles en cours de fatigue

Les premiers cycles de déformation conduisent à la formation superficielle des bandes de glissement, c'est une déformation unidirectionnelle au début. Si on poursuit la déformation des bandes de glissement se multiplient et se renforcent, entraînant la naissance des bandes persistantes qui ne disparaissent pas par un simple polissage. Ces bandes persistantes sont caractéristiques de la fatigue et leur rôle est essentiel dans l'endommagement par fatigue des métaux. En effet, au début de la déformation, les bandes de glissement qui sont apparus peuvent être éliminés par polissage. A l'intérieur d'une bande de glissement, il existe des lignes de glissement correspondantes au plan de glissement du cristal considéré. Si l'énergie de défaut d'empilement du métal n'est pas trop faible on remarque l'existence de nombreux glissements déviés qui permettent de rattraper la différence d'orientation entre la bande et les lignes de glissement. Le faible durcissement qui accompagne les déformations cycliques permet aux bandes de glissement de traverser les joints des grains. Dans le cas où les lignes de glissement sont très rectilignes, leurs directions ne coïncident pas avec celles des bandes de glissement, d'où la formation des microfissures le long des lignes de glissement. Lorsque la déformation plastique se fait par maclage, des microreliefs et des bosses apparaissent ce qui conduit à la formation des microfissures.

3.5. Facteurs influant la fatigue

L'endurance des pièces est la résultante de plusieurs phénomènes compétitifs, l'existence des concentrations locales de contrainte entraîne des déformations plastiques, par conséquent entraînant aussi l'endommagement progressif du matériau, et de l'irréversibilité des glissements au cours des cycles successifs [31].

3.5.1 Facteurs métallurgiques

La réalisation d'une pièce passe toujours par des opérations mécaniques et thermiques, qui agissent sur l'état métallurgique du matériau utilisé donc sur ses caractéristiques mécaniques d'utilisation. On peut ranger dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure métallographique), à son élaboration et à sa mise en forme (inclusions, défauts, fibrage), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique et caractéristiques mécaniques subis par le matériau de la pièce). Afin d'évaluer l'influence des différentes opérations mécaniques et thermiques, qui conduisent à l'obtention des caractéristiques mécaniques finales de la pièce sur la tenue en fatigue, on peut raisonner à partir de la microstructure de la pièce finale. Les défauts éventuels qui peuvent apparaître lors de ces opérations sont susceptibles de se retrouver au stade final, et de jouer sur la tenue en fatigue.

3.5.1.1 Facteurs liés à l'élaboration de l'acier

Le type d'élaboration utilisé pour la fabrication de l'acier influe sur la tenue en fatigue du matériau, dans la mesure où il agit sur sa propriété inclusionnaire. Les méthodes sidérurgiques les plus fines permettent l'obtention des faibles taux d'inclusion, telles que les refusions sous vide ou sous laitier conduisent à des hautes caractéristiques de fatigue

(Tab. 3.1).

Tableau 3.1 Influence de certaines méthodes sidérurgiques sur l'endurance de l'acier 16CD17 [32].

Acier 16CD17	Rm (N/mm ²)	Endurance (N/mm ²)
Avant refusions	1450	482
Refondu sous laitier	1450	549
Refondu sous vide	1450	629

3.5.1.2 Facteurs liés à la mise en forme

Lors de la mise en forme à froid, l'acier subit un écrouissage qui a pour effet de morceler les grains et d'engendrer des sous-grains invisibles au microscope optique, ce qui conduit généralement à une augmentation de la charge de rupture et des caractéristiques de fatigue. La comparaison des rapports d'endurance de l'état recuit à l'état étiré permet de déduire que l'augmentation de la tenue en fatigue est liée à l'augmentation de la charge à la rupture [32].

3.5.1.3. Facteurs liés aux traitements thermiques

Les traitements thermiques permettent la réalisation de la structure finale demandée. Pour les basses valeurs de résistance à la fatigue, on pourra utiliser des aciers à l'état recuit. Alors que pour des grandes valeurs un traitement de durcissement devient nécessaire [32].

a) Acier à l'état recuit

Dans cet état de traitement, l'acier sera, selon sa composition, soit ferritique (pour les basses teneurs en carbone), soit ferrito-perlitique ou encore composé de perlite et de cémentite (pour les teneurs élevées en carbone). Lorsque ces divers constituants sont mélangés, le rapport d'endurance est intermédiaire à celui des constituants isolés [33]. Ainsi globalement la tenue en fatigue croît avec l'augmentation de la teneur en carbone des aciers. De plus la forme de la perlite a également une influence importante sur l'endurance. Pour des niveaux de résistance égaux, la perlite sous forme globulaire sera préférable à la perlite lamellaire [32,34].

b) Acier à l'état trempé - revenu

Dans cet état, la tenue en fatigue sur des éprouvettes lisses est sensiblement proportionnelle à la résistance à la rupture (fig. 3.4).

La trempe permet d'obtenir une structure martensitique, et de provoquer des contraintes internes importantes. La trempe augmente la densité des défauts dans le réseau, ce qui rend le mouvement des dislocations difficile. Ces derniers dès qu'elles s'amorcent, elles deviennent instables, car la martensite et l'austénite résiduelle sont très fragiles, ce qui diminue l'endurance [34].

Le revenu à des températures entre (150° à 350° C) permet d'obtenir une meilleure résistance à la rupture ce qui diminue la susceptibilité à la rupture fragile, cela est due aux précipitations des carbures à partir de la martensite qui s'appauvrit en carbone.

Le revenu à des températures entre (350° à 400° C) permet de supprimer la cohésion carbure-martensite et l'isolation de ces derniers ce qui provoque une chute de la charge à la rupture d'où la diminution de la limite d'endurance [34].

Le revenu à des températures entre (500° à 680° C) permet l'obtention d'une structure de sorbite granulaire [34], qui est caractérisée par la coalescence entre les carbures qui est due aux migrations d'atomes de carbone provoquant un grossissement des particules de cémentite d'où la chute de la charge à la rupture et de la tenue en fatigue [34].

Pour l'état trempé, on doit tenir compte de la structure de l'acier après trempe et en particulier la présence de constituants autres que la martensite revenue tels que la perlite, par exemple, provenant d'une trempe incomplète ou austénite résiduelle qui peut abaisser le rapport d'endurance dans des proportions importantes [32].

Les contraintes introduites par l'opération de traitement thermique jouent également un rôle important, en particulier sur les structures martensitiques non revenues ou revenues à basses températures [32]

3.5.2 Influence de la charge à la rupture en traction « R_r »

Il est connu que la limite d'endurance d'un acier peut être appréciée à partir des caractéristiques mécaniques simples telles que la charge à la rupture R_r . Un nombre important que présentent les diagrammes reliant la limite d'endurance à la charge à la rupture (fig.3.4).

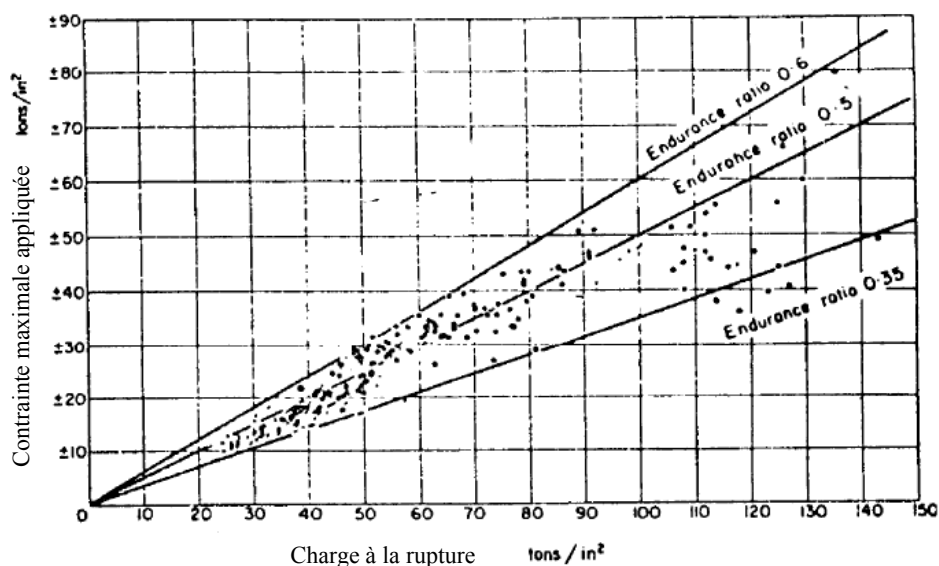


Figure 3.4 Relation entre la limite d'endurance σ_D et la charge à la rupture R_r en flexion rotative [32]

Lors de la mise en forme à froid (étirage, emboutissage, etc.), l'acier subit un écrouissage ce qui conduit généralement à une augmentation de la charge de rupture et des caractéristiques de fatigue. Les travaux cités dans [32] montrent qu'avec une barre d'acier XC45 recuit puis étirée donne une limite de fatigue supérieure à celle d'une barre en acier recuit seulement. La comparaison des rapports d'endurance (0.50 à l'état recuit et 0.48 à l'état étiré) permet à l'auteur de déduire que l'augmentation de la tenue en fatigue est surtout liée à l'augmentation de la charge de rupture de l'acier.

3.5.3 Facteurs géométriques

L'influence de ces facteurs géométriques intervient à travers les dimensions des pièces (effet d'échelle) et surtout leurs formes (effet d'entaille). Les origines de l'effet d'échelle sont principalement mécaniques, statistiques ou encore technologiques. Pour tenir compte de l'effet d'échelle, il faut introduire le coefficient K_c rapport de la limite d'endurance σ_D . Le coefficient K_c peut être déterminé expérimentalement pour un matériau et une dimension donnée avec σ_{D_0} mesurée sur éprouvette de faible diamètre ($5 < d < 10$ mm) [32].

L'effet d'entaille peut avoir trois origines, métallurgiques, mécaniques, de service (se forme durant l'utilisation). Cet effet est caractérisé par le coefficient q appelé indice de sensibilité à l'entaille, tel que $q = (K_f - 1)/(K_t - 1)$. Les coefficients K_f et K_t sont successivement le rapport d'endurance sur éprouvette lisse et sur éprouvette entaillée. Ce coefficient est toujours inférieur à K_t par suite de l'adaptation du métal et tend vers K_t pour les aciers à très haute limite d'élasticité. Il en résulte qu'une augmentation de résistance statique n'entraîne pas nécessairement une augmentation de résistance à la fatigue en présence d'entaille [31].

3.5.4 Influence du mode de sollicitation

Le mode de sollicitation peut avoir une influence notable sur l'endurance des matériaux. Toutefois, en ce qui concerne les ordres de grandeur, il est communément admis que le coefficient de passage d'un mode de sollicitation à un autre (coefficient 1 pour la flexion rotative) coefficient sont comme [32] suit :

- σ_D (en flexion plane) = 1.05. σ_D (en flexion rotative),
- σ_D (en traction compression) = 0.9. σ_D (en flexion rotative),
- σ_D (en torsion) = 0.6. σ_D (en flexion rotative).

La limite de fatigue d'un matériau peut être donc approchée par l'introduction d'un coefficient de passage, et l'écart type est égal au dixième de cette dernière [32].

3.5.5 Influence de la fréquence des sollicitations

A cause des frottements internes, il y a un retard de déformation sur la contrainte. Dans le cas des contraintes périodiques, on voit apparaître alors un cycle d'hystérésis de la déformation en fonction de la contrainte dont l'inclinaison varie avec la fréquence des cycles. Si cette fréquence augmente, la déformation plastique maximale atteinte pour une même

amplitude de la contrainte diminue et, par suite l'endurance se trouve augmentée. Inversement, si la fréquence diminue, il en sera de même pour l'endurance [31]. Toutefois dans l'absence des échauffements ou de corrosion, la fréquence des vibrations des machines classiques (5 à 100Hz) n'a aucune influence sur la limite d'endurance des aciers [32].

3.5.6 Influence de la température

La limite d'élasticité et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance qui leur est proportionnelle. L'augmentation des possibilités d'écoulement avec l'élévation de température cependant diminue la sensibilité à l'effet d'entaille. C'est pourquoi pour étudier l'effet de l'élévation de la température sur la limite d'endurance à partir des courbes de variation de la résistance à la traction ou de dureté, il faut tenir compte des vitesses de déformation [31]. A plus haute température, il peut y avoir fluage, ce qui entraîne une baisse rapide de la limite apparente d'endurance [31,32].

3.5.7 Influence de la corrosion

La corrosion peut intervenir de plusieurs manières, En absence de sollicitation dynamique, la corrosion peut entraîner la fissuration progressive des pièces chargées statiquement dans un milieu agressif (corrosion sous contrainte). En présence des efforts dynamiques sur la pièce qui a subi une corrosion préalable, il s'agit dans ce cas de rupture par fatigue seulement. Lorsque la fatigue et la corrosion agissent simultanément ceci conduit à la plus forte diminution de la résistance à la fatigue des matériaux métalliques [32].

3.5.8 Facteurs liés à la nature des surfaces usinées

3.5.8.1 Influence de la rugosité

La rugosité est qualifiée par son grand effet sur les propriétés fonctionnelles, telles que la résistance à la fatigue, la fatigue de contact, frottement et l'usure. Les résultats trouvés par plusieurs chercheurs [35] dans le cas du tournage montrent que l'augmentation notable de la fatigue en flexion alternée peut être obtenue par l'usinage de la pièce préchauffée à une température de 300° C. Cette amélioration de la limite en fatigue en flexion est attribuée à la diminution de la rugosité.

Les essais conduits au CETIM [31] ont montré qu'à partir d'une certaine valeur de rugosité on pourrait obtenir des réductions anormalement élevées de la limite d'endurance. Il convient d'éliminer les rugosités de grande importance dans les pièces sollicitées.

Il est toutefois admissible que les rugosités obtenues par rectification sont plus faibles que celles obtenues par tournage (1,3 à 1,8 μm) [35], alors que l'endurance des pièces tournées à une température supérieure à 300° C est plus grande que dans le cas de rectification douce, dans ce cas c'est le procédé d'usinage qui porte la grande influence par rapport à la rugosité. D'autre part une comparaison entre les rectifications conventionnelle et abusive de l'acier XC48 qui possède pratiquement les mêmes rugosités (1,3 μm et 1,8 μm respectivement) ont cependant leur limite de fatigue aussi respectivement 461 MN/m² et 196 MN/m² [4]. En plus les résistances à la fatigue obtenues par la rectification douce et sévère sont respectivement 883 MN/m² et 196 MN/m², alors que la rugosité est inversée (1.0 μm et 0.35 μm) [4]. De plus Dupont [22] a constaté que l'endurance des pièces en alliage d'Aluminium 7075 et 2024 usinées dans l'état prérevenu avec un angle de coupe +30° est plus élevée que celle obtenue dans le même état, mais avec un angle de coupe -8° malgré que l'état de surface dans le premier cas est moins bon. Cette constatation permet de conclure qu'il est plus correct de ne pas séparer l'influence de la rugosité sur la tenue en fatigue des autres facteurs tels que les contraintes résiduelles, la géométrie de l'outil et l'existence des concentrateurs de contrainte telles que les écailles, les cavités et surtout les microfissures.

3.5.8.2 Influence des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue

L'influence des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue a été l'objet de nombreuses recherches [30-32,35-37]. Field et Kahles [30] et Lemaitre et col [37] ont cité des travaux portant sur l'influence des contraintes résiduelles sur la fatigue de l'acier avec une dureté de 250VPN et ont constaté que :

- Les contraintes résiduelles sont bénéfiques, si elles sont de compression, et néfastes si elles sont de traction (fig. 3.5), particulièrement dans les matériaux durs [37].
- dans les matériaux de dureté supérieure à 25 Rc, les contraintes résiduelles ont des effets similaires sur le comportement en fatigue, comme si elles étaient imposées mécaniquement avec la même amplitude.
- Dans les matériaux de faible dureté (<280Hv), ce sont les contraintes à l'échelle microscopique qui forment le facteur déterminant de la résistance à la fatigue. Les contraintes à l'échelle macroscopique ont tendance à se relaxer.
- L'influence des contraintes résiduelles peut dépendre du type de sollicitation. En effet, pour les surfaces grenillées, on trouve un effet positif en flexion alternée, alors

qu'aucun effet n'est relevé pour des longues durées de vie en traction compression, dans ce cas, les fissures s'amorcent sous la surface [22].

- La fatigue n'est pas la seule propriété qui est affectée par les contraintes résiduelles, mais la corrosion sous contrainte l'est aussi.

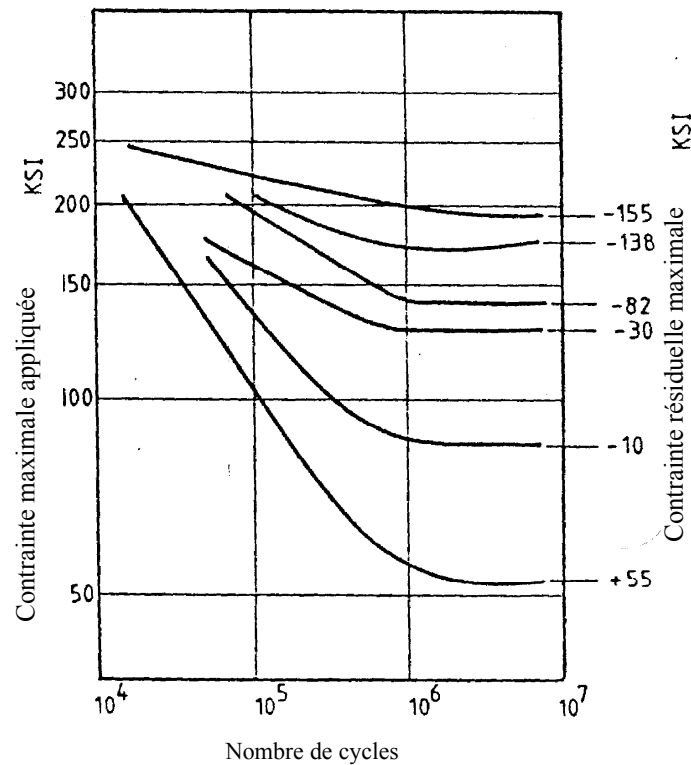


Figure 3.5 Effet des contraintes résiduelles sur la limite de fatigue de l'acier SAE 5160 [30]

3.5.8.3 Influence de l'érouissage sur la tenue en fatigue

En plus de l'effet de la topographie de la surface et des contraintes résiduelles cité ci-dessus, l'érouissage est aussi considéré dans l'influence sur les propriétés fonctionnelles des pièces usinées. Cependant dans l'absence des contraintes résiduelles, grandes rugosités ou microfissures, le durcissement de la surface est considéré comme un processus renforçant la surface. Le travail mené par Ovseenko [35] montre que l'érouissage a un effet notable sur les propriétés de fatigue en flexion et de contact et indique une amélioration de la tenue en fatigue avec l'augmentation de la micro dureté de la surface usinée.

3.5.9 Influence de la lubrification durant l'usinage

La lubrification de l'arête de coupe permet d'améliorer l'état de surface, surtout à faible

vitesse, en évitant la formation d'une arête rapportée. D'autre part, le mode d'usinage influe notamment sur la température superficielle de la pièce, ce qui affecte l'état de surface. Dans le cas du travail à sec les températures à la surface usinée sont très élevées, et de ce fait peuvent provoquer des effets indésirables à la surface (durcissement ou adoucissement structural) selon la température atteinte.

3.6. Faciès de rupture en fatigue

La rupture d'une éprouvette passe par deux étapes : naissance et croissance d'une fissure. L'examen fin des surface de rupture est réalisé par des moyens performants, tels que le microscope électronique à balayage(MEB) ou à transmission(MET), alors que cet examen n'est pas possible avec un microscope optique, vue sa faible profondeur. Mais l'examen optique (oeil, éventuellement loupe ou loupe binoculaire) il est souvent possible d'observer un certain nombre de caractéristiques sur la section de la rupture. Présence de deux zones distinctes, ces deux zones correspondent : à la rupture brutale avec faciès à grains, à la fissure de fatigue avec une fissure lisse et soyeuse. En plus la présence possible et en fonction du matériau et des conditions de sollicitations, de lignes concentriques appelées lignes d'arrêt, et des lignes normales aux précédentes appelées lignes radiales. Toutefois la rupture finale par fatigue des éprouvettes peut être fragile ou ductile.

3.6.1 Rupture fragile

C'est une rupture transgranulaire qui se manifeste sans qu'il y ait déformation plastique importante. Cette rupture est très rapide. La rupture fragile est généralement observée dans les fontes, les aciers à teneur en carbone important trempés et revenus, travaillent à basses températures, le verre, etc... La rupture fragile est distinguée par des clivages transgranulaires avec réamorçage par rivières, et avec des clivages à languette.

3.6.2 Rupture ductile

La rupture ductile est due essentiellement aux présences des inclusions, des éléments d'addition dans les alliages, précipités dus aux traitements thermiques et des joints de grains [33]. Cette rupture manifeste par des déformations plastiques importantes. La rupture ductile est distinguée par des cupules (creux) allongés ou équiaxes sur les surfaces de rupture.

Les faciès de ruptures par fatigue sont composés de deux zones. La première est lisse, appelée zone de fatigue, la deuxième appelée zone de rupture finale elle présente une structure cristalline grossière pour les métaux fragiles, alors que pour les métaux ductiles elle est

fibreuse.

3.7 Conclusions

De ce qui précède peuvent être tirées les conclusions suivantes :

- Les surfaces usinées subissent plusieurs changements et altérations, qui peuvent être préjudiciables ou nuisibles au comportement fonctionnel des pièces mécaniques.
- Les contraintes résiduelles de compression sont généralement avantageuses au comportement en fatigue des pièces usinées. ces contraintes ferment les microfissures, par conséquent elles les empêchent de se propager. Dans l'autre coté les contraintes résiduelles de traction sont désavantageuses pour la tenue en fatigue.
- Il est évident que les méthodes d'usinage induisent une variété de changements et altérations qui déterminent le comportement en fatigue des pièces usinées. Parmi ces altérations, on peut citer les microfissures. Cependant il y a peu de travaux qui ont essayé de relier le comportement en fatigue à la présence des microfissures [4].
- Le comportement en fatigue est sensible aux caractéristiques de la surface et de la couche superficielle. Cependant il demeure plus correct de considérer simultanément et non pas séparément l'influence de tous les paramètres de l'intégrité de surface sur le comportement en fatigue des pièces usinées.

Chapitre 4

Procédures expérimentales

4.1. Introduction

Ce chapitre va consister en une présentation des procédures expérimentales adoptées pour l'étude en premier temps des évolutions de la rugosité, la microdureté et la microstructure en fonction de différents paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et en deuxième lieu à l'étude de la relation entre l'influence de cette évolution sur le comportement de ces pièces en fatigue.

4.2. Matériau étudié :

Le matériau étudié est un acier XC 48. Il a été fourni sous forme de barres cylindriques laminées de 14 et de 20 mm de diamètre. La composition chimique du matériau est donnée dans le tableau 4.1:

Tableau 4.1 composition chimique de l'acier XC48 étudié.

ELEMENT	C (%)	MN (%)	SI (%)	S (%)	P (%)
Composition en %	0,48	0,6	0,25	0,030	0,027

L'acier XC48 étudié comme tous les aciers à moyen carbone s'emploie dans la construction mécanique après normalisation, amélioration et trempe superficielle, pour une variété de pièces (vilebrequins, bielles, arbre à cames, pignons,...).

Dans l'état normalisé, l'acier XC48 possède une grande résistance par rapport aux aciers à faible teneur en carbone et sa plasticité est plus faible.

Les essais de fatigue sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 8 mm de diamètre et de 146 mm de longueur comme indiqué sur la figure 4.1

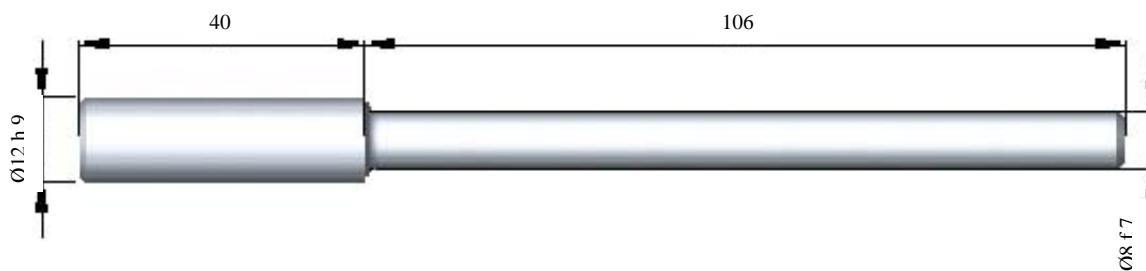


Figure.4.1 Géométrie de l'éprouvette usinée pour les essais de fatigue

Etant donnée l'influence d'un grand nombre de paramètres sur chaque résultat, il nous a fallu définir un planning d'expériences où chaque paramètre variait d'une façon indépendante des autres. Notre observation a porté sur la rugosité, l'érouissage, et la micrographie de la surface usinée. Pour déterminer les limites du domaine d'usage du couple outil - matière, il s'agit de

déterminer un domaine de validité de production d'une surface dans de bonnes conditions technologiques en fonction des trois paramètres : la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (a) et l'avance (f).

4.3. Usinage des éprouvettes

4.3.1 Outil de coupe utilisé

La géométrie de l'outil est présentée sur la figure 4.2 sous la forme de porte outil sur le quel une plaquette en carbure métallique d'usage générale (P20) est fixée mécaniquement par le serrage d'une vis à tête conique.

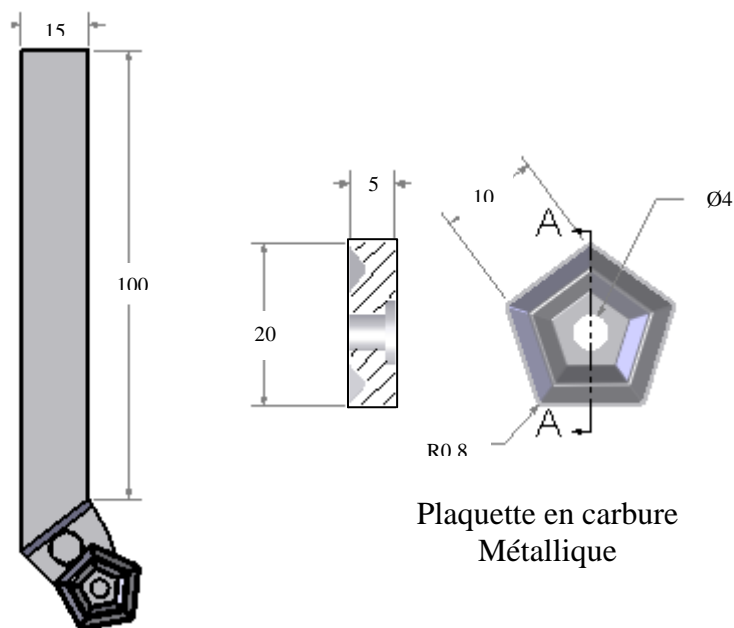


Figure 4.2. Géométrie de l'outil de coupe et de la plaquette utilisée

Notre travail repose à la fois sur l'obtention de résultats expérimentaux et sur la mise en place des moyens suivant pour le tournage d'aciers XC 48 avec des plaquettes en carbure métallique. Le tournage a été réalisé sur un tour universel de fabrication russe de type TOKAPHO-CTAHOK TB-320n (figure 4.3) avec une vitesse de rotation de broche maximale de 2000 tr/min. Dans un premier temps la vitesse de coupe qui est un paramètre déterminant du point de vue de son influence sur l'état de surface, a été choisie de manière à obtenir divers états de surface. Lors de cette opération, aucune lubrification n'est effectuée. Pour une meilleure reproductibilité, une pastille neuve est installée sur le porte-outil pour la réalisation des deux dernières passes de finition de chaque éprouvette.



Figure 4.3 Tour utilisé pour la préparation des surfaces étudiées

De manière générale, un tour adapté à l'usinage de matériaux durs doit présenter un certain nombre de caractéristiques telles que :

De faibles vibrations en usinage, donc une bonne rigidité et un bon amortissement en particulier pour le bâti,

La précision et fiabilité des déplacements du chariot,

Des jeux de broches et d'éléments mobiles aussi faibles que possible.

Le tour utilisé s'est avéré suffisamment rigide pour identifier le comportement de l'outil. Lors des essais, nous n'avons pas observé de phénomène de broutement. Seulement quelques vibrations ont été notées pour les sections de copeau les plus élevées.

4.4. Mesure de la rugosité.

La rugosité des surfaces obtenues après usinage avec les conditions mentionnées ci-dessus, est mesurée sur les surfaces des éprouvettes utilisant un rugosimètre électronique à palpeur en diamant à capteur inductif de type SURFTEST SJ301 (fig. 4.4). La mesure a été faite dans la direction normale à la direction de la coupe. Les valeurs des rugosités sont déterminées à partir de la moyenne de quatre mesures à des endroits arbitrairement choisis. Le paramètre Ra est utilisé pour caractériser la rugosité, il représente l'écart moyen arithmétique des crêtes et des sillons.



Figure 4.4 SURFTEST SJ301

4.5 Mesure de la Microdureté

La mesure de micro dureté du matériau à travers la profondeur de la couche superficielle a été faite en utilisant un microdurémètre de type « *MICROMET 3* » (figure 4.5) au Centre de Recherche en Soudage et Control (CSC), en utilisant un pénétrateur Vickers avec un angle au sommet de 136° sous une charge de 300 gf. Les mesures ont été faites à partir d'une profondeur minimale de $0,6 \mu\text{m}$ sous la surface.

Figure 4.5 Microduromètre *MICROMET 3*

4.6 Micrographie des pièces usinées.

Les micrographies des sous surfaces ont été prises par un microscope optique de type

«ZEISS Axioplan-2 » (figure 4.6) du centre de recherche en soudage (CSC) avec des grossissements de 100, 200, 500 et 1000.

Cet agrandissement nous a permis de voir l'état de surface et l'écaillage superficiel de la surface usinée.

La réalisation d'une micrographie nécessite un certain nombre d'opérations.

- Choix du plan de coupe, en vue de mettre en évidence les profils d'intérêt,
- Découpe,
- Enrobage, polissage,
- Attaque, examen, compte rendu.



Figure 4.6 Microscope optique ZEISS Axioplan-2

4.6.1 Choix du plan de coupe :

Le prélèvement se fera aux emplacements les plus susceptibles de livrer les renseignements d'intérêt pour l'étude concernée. Dans notre cas un plan de coupe perpendiculaire à la surface normée et parallèle à l'axe des pièces a été choisi.

4.6.2 Découpe

Une attention particulière à été donnée à la découpe des échantillons, La découpe des

échantillons par tronçonnage peut si elle est mal conduite provoquer, un échauffement conduisant à la fissuration des matériaux fragiles. Dans notre cas elle peut provoquer des changements de la structure. Et pour éviter tous cela il faut :

- Contrôler l'avance du disque de tronçonnage qui ne doit pas être trop rapide.
- S'assurer que le débit d'arrosage doit être suffisant et bien orienté vers la zone de travail.
- Adapter la dureté de la meule à celle de la pièce.

4.6.3 Polissage mécanique

Le but du polissage est de réaliser, sur une coupe de l'échantillon, une surface plane afin d'obtenir une image représentative de sa structure.

Principe :

Le principe de base du polissage est d'usiner l'échantillon avec des abrasifs de granulométrie de plus en plus fine. Chaque étape doit éliminer l'endommagement produit par la précédente « l'écrouissage dans le cas des métaux ».

On distingue trois grandes phases :

- *Le surfaçage* : le but de surfaçage est d'éliminer les défauts engendrés par l'usinage (bavures, copeaux...) et de mettre l'échantillon parfaitement plan. Pour cela, nous avons utilisé du papier abrasif de granulométrie P120.
- *Le pré polissage* : Il doit diminuer fortement la zone écrouie par le surfaçage et laisser sur la surface des rayures très fines et uniformes. Le pré polissage a été réalisé avec papier abrasif de granulométrie de plus en plus fine (P240, P360, P400, P600, P800, P1200).
- *Le polissage de finition* : permet l'obtention du poli miroir à l'échelle du microscope optique. On a effectué cette étape sur un drap textile avec une patte diamanté avec une granulométrie de 3 μm et 1 μm .

4.6.4 Attaque micrographique :

Après la préparation l'échantillon métallographique étant parfaitement poli à l'échelle microscopique, ne révèle que peu d'information sur la microstructure. On peut y distinguer les phases ayant des pouvoirs de réflexion différente comme : les composés non métalliques (oxydes, sulfures, graphites...) ; ou bien les intermétalliques colorés. Sont également visibles les

phases dures mises en relief par la préparation, et les défauts de type fissure, replis de mise en oeuvre, trou (retassure, gaz)...Le but de l'attaque métallographique est donc de créer un contraste révélant la microstructure du matériau.

Principe : une des méthodes les plus employées est de graver la surface de l'échantillon formant ainsi des zones d'ombre qui donnent le contraste. On utilise pour cela un réactif qui a pour effet de provoquer une dissolution sélective des phases en présence, ou pour les échantillons monophasés, une dissolution différente en fonction de l'orientation des réseaux cristallins.

Une attaque bien menée doit conduire à une réaction homogène sur toute la surface de l'échantillon afin d'éviter toute erreur d'interprétation lors de l'observation.

On a attaqué la face à observer avec un réactif chimique composé de « 2% NITAL + 98% ALCOOL », le temps d'attaque est de (3 s) à peu près, après quoi les échantillons sont lavés et séchés.

4.7 Etude de la résistance à la fatigue.

4.7.1 Préparation des éprouvettes de fatigue

Les résultats des essais de fatigue sont caractérisés par leur diversité. Il est donc disponible de préciser les conditions d'exécution d'essai tel que le choix d'éprouvettes, l'ambiance, etc. Le type d'éprouvette dépend de l'essai que l'on veut effectuer, de la machine utilisée, des renseignements que l'on désire obtenir et de la forme sous laquelle le matériau est fourni.

Pour les essais de flexion rotative en particulier les formes d'éprouvettes peuvent être diverses. Lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques fondamentales en fatigue d'un métal, il est recommandé d'utiliser à chaque fois que cela est possible une éprouvette cylindrique à profil toroïdal [38].

4.7.2 Machine de fatigue en flexion rotative.

Les essais de fatigue ont été réalisés sur une machine de flexion rotative de type (*GUNT WP 140*), (figure 4.7) sous air, à la température ambiante.

Avec cette machine, équipé d'un moteur tournant à une vitesse de 2880tr/min il est possible de démontrer les principes de base de fatigue y compris la réalisation de diagramme contrainte – nombre de cycles.

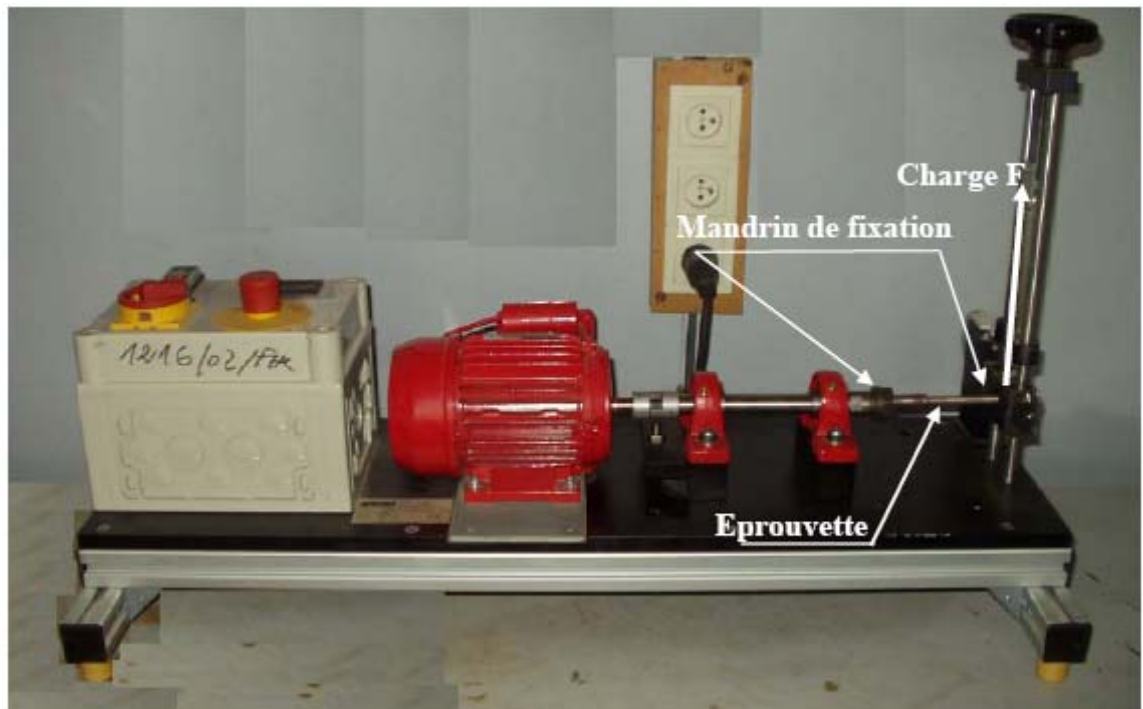


Figure 4.7 Machine de flexion rotative (*GUNT WP 140*)

Sur ce type de machine, le mode de sollicitation cyclique s'obtient par la rotation d'une éprouvette (fig. 4.8) soumise à un effort de flexion de direction fixe. L'éprouvette est montée en porte à faux.

Le mode de chargement est illustré schématiquement par la figure 4.9. Le chargement est appliqué à son extrémité libre par un dynamomètre à ressort à travers un roulement pour faciliter la rotation de l'éprouvette

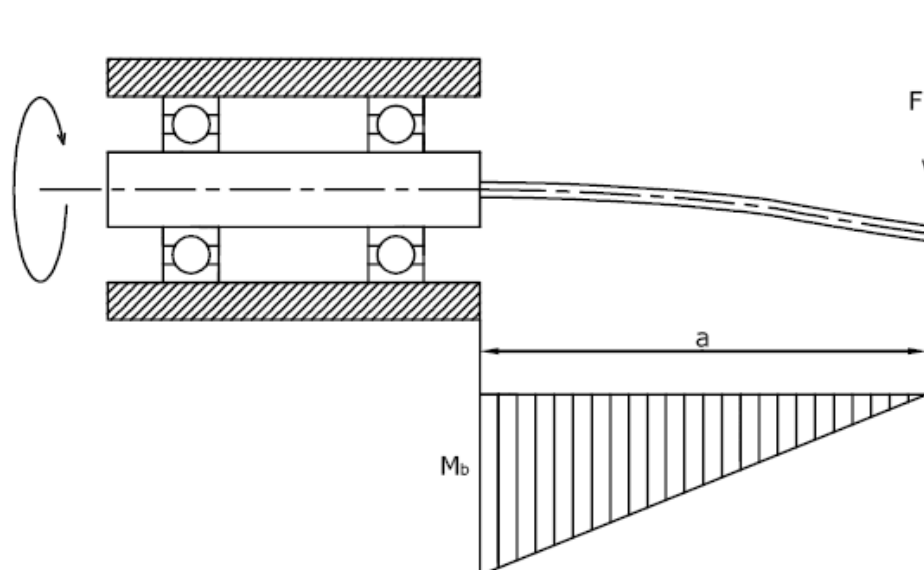


Figure 4.9. Schéma de chargement de l'éprouvette de fatigue
La contrainte dans l'éprouvette est calculée par l'expression

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (4.2)$$

Avec

$$M = F \cdot a \quad (4.3)$$

Et.

$$W = \frac{\pi \times d^3}{32} \quad (4.4)$$

$$\sigma = \frac{32 \times a}{\pi \times d^3} \cdot F = \frac{32 \times 100,5}{\pi \times 8^3} \times F$$

$$\sigma = 2 \times F \text{ N/mm}^2 \quad (4.5)$$

Tel que

M : moment fléchissant par rapport à la section considérée.

F : charge appliquée en N,

a : longueur du bras de levier entre la section chargée et la charge F .

($a=100.5$ mm).

W : module de résistance en flexion de l'éprouvette par rapport à son axe neutre,

d : diamètre de l'éprouvette

Les résultats des essais de fatigue sont consignés sous la forme de diagramme de Wöhler montrant l'évolution de la contrainte maximale appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture.

4.8 Difficultés rencontrées

Parmi les difficultés rencontrées dans notre étude fréquemment :

- Le grand nombre des facteurs à modifier tels que l'état métallurgique du matériau et les paramètres de coupe conduisant à la préparation d'un nombre important d'éprouvettes et aussi à la réalisation d'un nombre important des essais de fatigue, ceci nécessitant ainsi un temps de travail très important.

- Le manque des moyens sophistiqués tels que le microscope électronique et les appareils de mesure des contraintes résiduelles pour mieux caractériser les surfaces.

La vitesse de rotation maximale du tour utilisé est de 2000 tr/min et le faible diamètre des éprouvettes de fatigue (ϕ 8mm) ne permet pas d'élargir la gamme des vitesses de coupe pour l'usinage à grande vitesse pour lequel l'état des surfaces est considérablement amélioré donnant ainsi des résistances à la fatigue élevées.

Chapitre 5

Résultats expérimentaux

5.1 Introduction

Le présent chapitre vise à établir l'influence des paramètres de surface sur la résistance à la fatigue d'un acier XC 48 réalisée par tournage, en s'attachant plus particulièrement à identifier l'effet de la rugosité, de l'érouissage et du changement dans la microstructure produits par différents paramètres d'usinage des surfaces. Pour ce faire, divers états de surface, présentant des combinaisons variées de rugosité, et de microdureté, ont été réalisés par tournage à différents paramètres de coupe et leur effet sur la durée de vie et la limite de fatigue, pour divers conditions de chargement, a été évaluée.

Dans ce chapitre on va donc étudier le comportement des pièces mécaniques en fatigue, avec différentes caractéristiques de la surface selon deux exposés. Le premier consiste à trouver une relation entre les conditions d'usinage et l'état de la surface usinée, (rugosité, érouissage et microstructure). Le deuxième consiste à établir une relation entre les propriétés de la surface usinée et la résistance à la rupture en fatigue.

Les résultats sont présentés dans des tableaux et des graphes, et une discussion générale sur l'effet des opérations d'usinage sur la fatigue du matériau est présentée à la fin de ce chapitre.

5.2 Influence des conditions d'usinage sur l'intégrité de surface

5.2.1 Influence sur la rugosité de surface

La vitesse de rotation maximale du tour utilisé est de 2000 tr/min et le faible diamètre des éprouvettes de fatigue (ϕ 8mm) ne permet pas d'élargir la gamme des vitesses de coupe. La vitesse de coupe maximale correspond donc à 50m/min.

5.2.1.1 Influence de la vitesse de coupe

Le tableau 5.1 donne la variation de la rugosité moyenne en fonction de la vitesse de coupe. Il apparaît (fig.5.1) que l'usinage de l'acier XC48 à des vitesses réduites ou à des vitesses élevées maintient Ra à des valeurs faibles. Entre ces deux extrêmes la rugosité atteint une valeur maximale. Une forte variabilité est cependant observée. Cette variabilité est traditionnellement associée avec la formation de l'arête rapportée [4]. La fourchette des vitesses de coupe utilisées peut être divisée principalement en trois paliers. Un palier à basses vitesses sans formation d'arête rapportée, un palier de vitesses de coupe moyennes avec

formation de l'arête rapportée et finalement un palier à vitesses élevées pour lesquelles l'arête rapportée disparaît complètement.

Plusieurs méthodes ont été rapportées pour la détermination des conditions dans lesquelles l'arête rapportée est formée. La méthode des abaques empiriques de Trent [14] n'en est qu'un exemple. Oxley [15] a exploré comment la théorie de l'usinage pourrait être utilisée pour estimer le régime de formation de l'arête rapportée. Son approche est basée sur le raisonnement suggéré par Shaw [16] utilisant la température comme critère de formation d'arête rapportée.

Tableau 5.1 Variation de la rugosité avec la vitesse de coupe pour une avance d'outil de 0,085 mm/tr et une profondeur de passe de 0,5 mm

Vitesse de coupe V_c [m/min]	Ra [μm]								Ra [μm] moyenne
	Pièce 1		Pièce 2		Pièce 3		Pièce 4		
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	
3,5	2,65	2,62	2,26	2,28	3,85	3,97	4,12	4,61	3,01
7	13,10	13,55	8,82	5,57	5,55	5,32	5,79	7,79	8,19
28	7,04	6,19	5,97	6,10	5,25	5,41	6,19	6,14	6,036
50	3,31	3,92	3,16	3,73	2,87	3,49	3,83	3,25	3,445

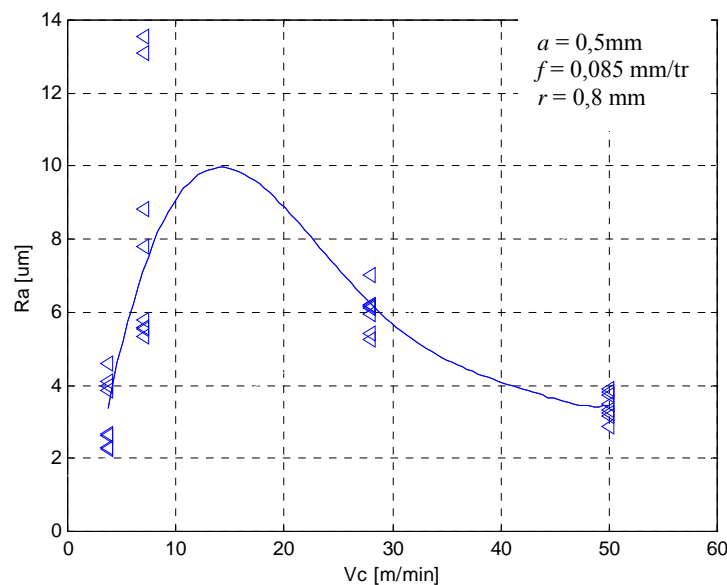


Figure 5.1 : Variation de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe

Dans notre étude, les observations micrographiques des couches superficielles des pièces usinées ont été utilisées pour mettre en évidence l'existence de l'arête rapportée. Cette évidence est supportée par la présence de débris de cette arête sur la surface usinée comme

illustré par la figure 5.2 D'après les résultats obtenus (fig.5.1), la valeur maximale de la rugosité correspond approximativement à $V_c=15$ m/min, valeur autour de laquelle se situe l'arête rapportée maximale. On montre en outre que l'arête rapportée, malgré de taille réduite, était encore présente à une vitesse de coupe de 28m/min (figure 5.2c). A une vitesse de 50 m/min, l'arête rapportée est très faible (figure 5.2d) et de ce fait les valeurs de Ra sont plus réduites et la rugosité est désormais constituée seulement de traces laissées par le profil géométrique de l'outil, ou par son profil déformé durant l'usinage, et d'ondulations d'origine vibratoire.

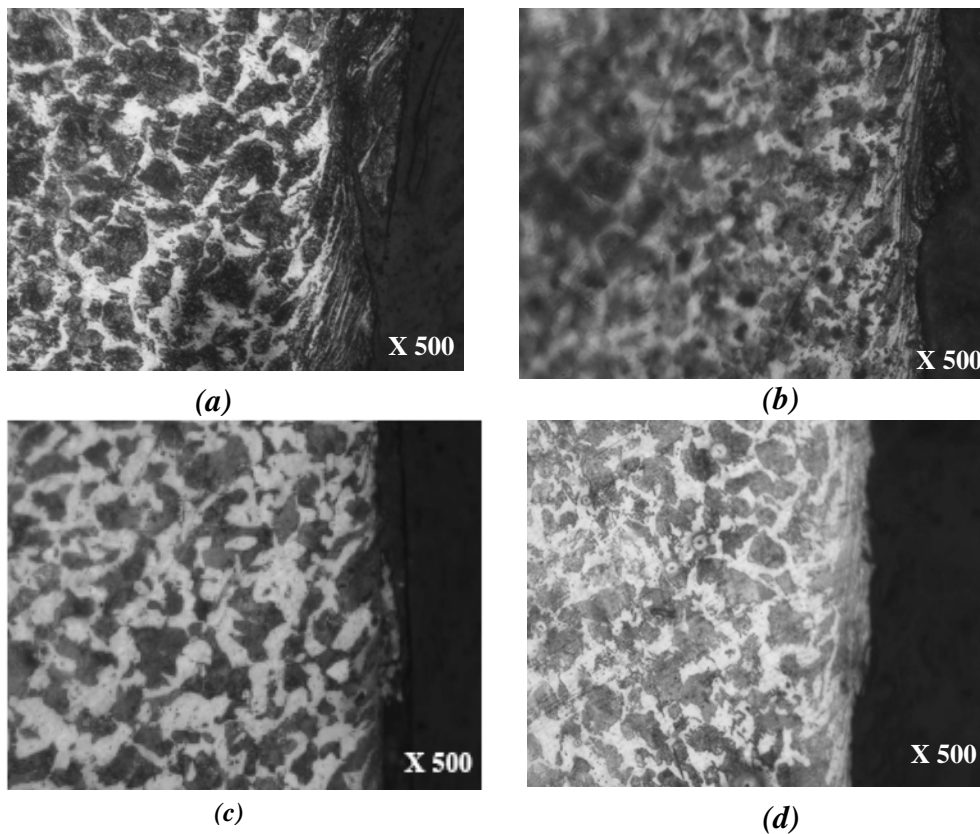


Fig. 5.2 Micrographie des couches superficielles des pièces usinées avec les vitesses :
 $V_c = 3,5$ m/min (a), $V_c = 7$ m/min (b), $V_c = 28$ m/min (c), $V_c = 50$ m/min (d).
 $f = 0,085$ mm/tr $a = 0,5$ mm et $r = 0,8$ mm

5.2.1.2 Influence de l'avance

L'évolution de la rugosité arithmétique moyenne Ra en fonction de l'avance de l'outil est donnée en Figure 5.3 On constate que la rugosité Ra est faible pour les plus faibles avances. Elle augmente avec l'accroissement de celle-ci. On note une augmentation de Ra lorsque la valeur de l'avance passe de 0,05 à 0,1 mm/tr (Figure 5.3), cette augmentation est surtout liée à l'arête rapportée [4] puis elle diminue pour des avance de 0,1 à 0,17 mm/tr pour

augmenter encore une fois pour des avances au-delà de cette valeur. Cette augmentation est liée à la trace laissée par le bec de l'outil de coupe.

Tableau 5.2 Variation de la rugosité avec l'avance d'outil durant l'usinage avec une vitesse de coupe de 50 m/min et une profondeur de passe de 0,5 mm

Avance f [mm/tr]	Ra [μm]								Ra [μm] moyenne
	Pièce 1		Pièce2		Pièce 3		Pièce4		
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	
0,03	4,93	4,19	3,19	3,01	1,80	1,97	2,96	3,00	3,13
0,06	0,85	0,64	4,37	4,79	3,34	3,09	1,06	0,99	2,4
0,085	3,31	3,92	3,16	3,73	2,87	3,49	3,83	3,25	3,445
0,165	2,68	2,42	2,76	2,54	2,59	3,45	2,64	2,50	2,7
0,33	3,64	3,69	3,21	3,33	3,49	3,16	3,16	2,89	3,3

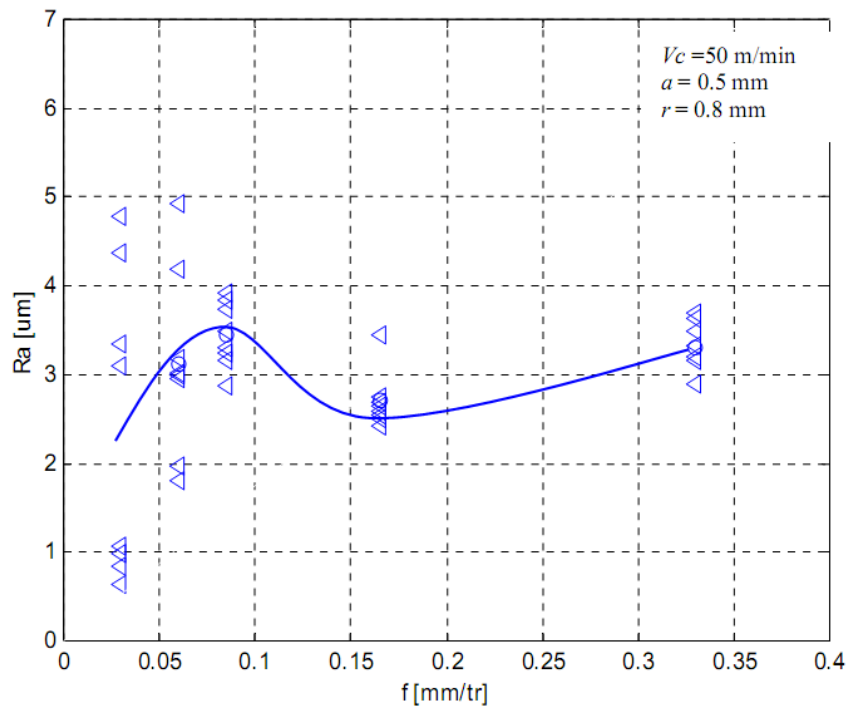


Figure 5.3 : Variation de la rugosité en fonction de l'avance

Les observations micrographiques des couches superficielles des pièces usinées (fig. 5.4) semblent montrer qu'à faible avance Ra est faible. Mais en parallèle nous observons sur la pièce usinée un échauffement de la couche superficielle caractérisé par le changement de la couleur de la surface ce qui entraîne des changements microstructuraux puis en augmentant la vitesse d'avance à 0.165 mm/tr les traces de l'arête rapportée sont visibles à cette avance. Lorsque l'avance augmente d'avantage l'arête rapportée disparaît mais les traces laissées par le bec de l'outil affectent plus la rugosité que les autres paramètres.

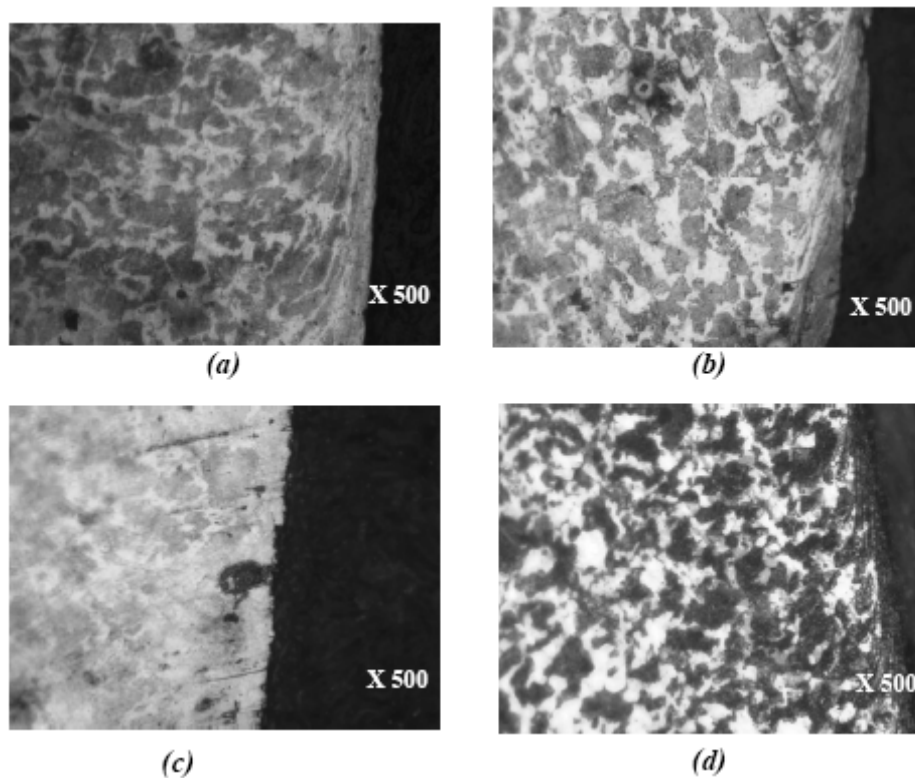


Fig. 5.4 Micrographie des couches superficielles des pièces usinées avec des avances de : $f=0,06\text{mm/tr}$ (a), $f=0,085\text{mm/tr}$ (b), $f=0,165\text{mm/tr}$ (c), $f=0,33\text{mm/tr}$ (d).
 $V_c = 50\text{ m/min}$, $a = 0,5\text{ mm}$, $r = 0,8\text{ mm}$

5.2.1.3 Influence de la profondeur de passe

Le tableau 5.3 et la Figure 5.5 présentent la variation de Ra en fonction de la profondeur de passe. On constate que la valeur de celle-ci est au voisinage ou égale à $3,445\mu\text{m}$. Pour toute la plage d'avances considérées. De ce fait, nous concluons qu'en ce qui concerne la rugosité arithmétique Ra, elle n'est pas influencée notablement par la profondeur de passe.

Tableau 5.3 Variation de la rugosité avec la profondeur de passe avec une vitesse de coupe de 50 m/min et une vitesse d'avance d'outil de $0,085\text{ mm/tr}$

Profondeur de passe a [mm]	Ra [μm]								
	Pièce 1		Pièce2		Pièce 3		Pièce4		Ra [μm] moyenne
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	
0,1	3,31	3,92	3,16	3,73	2,87	3,49	3,83	3,25	3,445
0,2	2,89	2,78	3,62	3,68	4,60	3,49	3,87	3,91	3,605
0,5	3,31	3,92	3,16	3,73	2,87	3,49	3,83	3,25	3,445
0,75	3,90	3,69	2,39	3,08	3,32	4,01	3,45	3,11	3,36

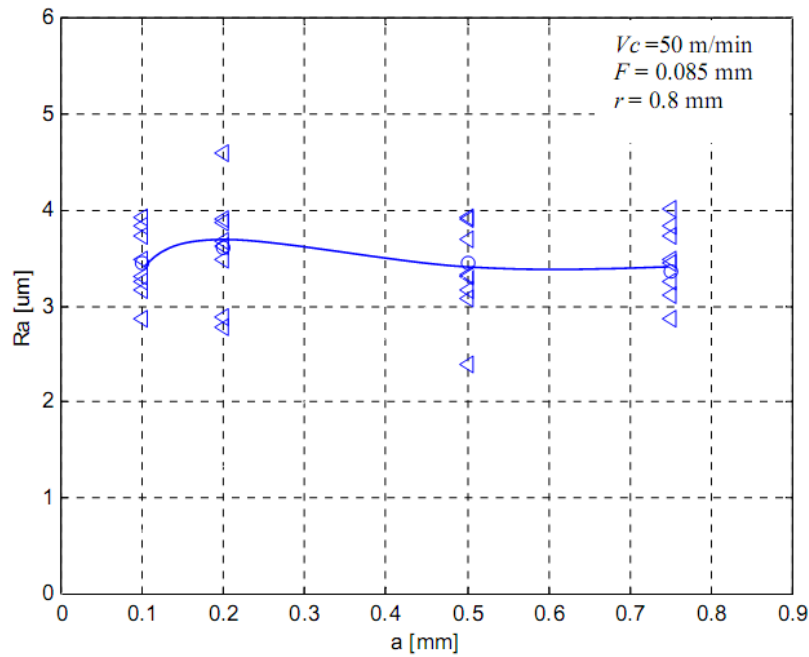
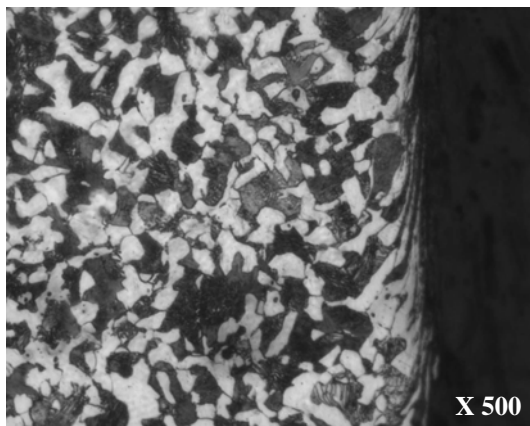
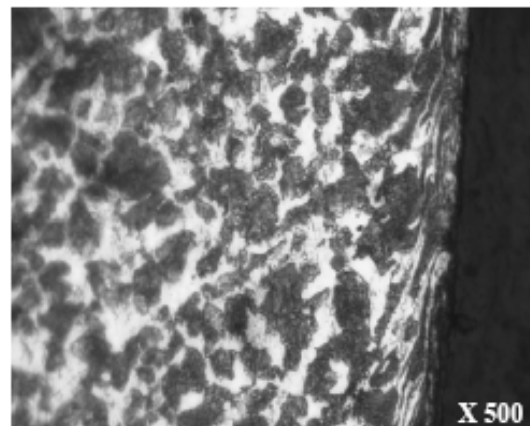


Figure 5.5 : Variation de la rugosité en fonction de la profondeur de passe

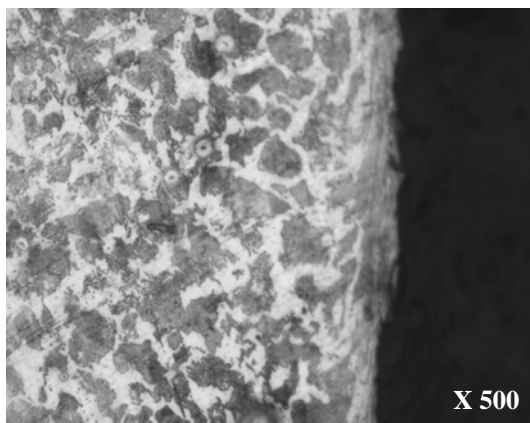
Les observations micrographiques des couches superficielles des pièces usinées fig. 5.6 confirment que la profondeur de passe n'a aucune influence notable sur la rugosité arithmétique des pièces usinées par tournage de l'acier XC48.



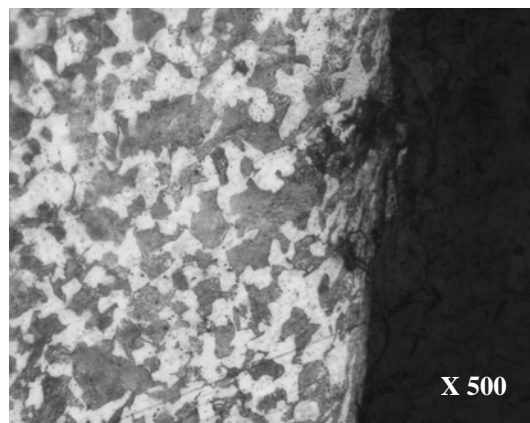
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.6 Micrographie des couches superficielles des pièces usinées des profondeurs de passe : $a=0,1\text{mm}$ (a), $a=0,2\text{mm}$ (b), $a=0,5\text{mm}$ (c), $a=0,75\text{mm}$ (d). Pour $V_c = 50\text{ m/min}$, $f=0,085\text{mm/tr}$, $r = 0,8\text{ mm}$

5.2.2 Influence sur la microdureté

En fonction des conditions de coupe et de la matière d'œuvre, la couche superficielle est généralement soit durcie soit adoucie, ce phénomène est évalué par des techniques de mesures de microdureté telles que l'essai de dureté Vickers.

5.2.2.1 Influence de la vitesse de coupe

L'évolution de la dureté des couches superficielles avec la vitesse de coupe est représentée sur la figure 5.7 On peut constater que là aussi la vitesse de coupe a une influence notable sur la microdureté de la couche superficielle et plus particulièrement à proximité de la surface. Vers l'intérieur de la pièce cette influence va en diminuant et les différentes courbes convergent vers une valeur correspondant à la dureté à cœur du métal travaillé.

Tableau 5.4 Variation de la dureté Vickers HV en fonction de la vitesse de coupe avec une vitesse d'avance d'outil de 0,085 mm/tr, une profondeur de passe de 0,5 mm

Profondeur [mm]	Dureté Vickers HV en fonction de la vitesse de coupe			
	$V_c = 3,5$ m/min	$V_c = 7$ m/min	$V_c = 28$ m/min	$V_c = 50$ m/min
0,06	249,7	226,5	222	226
0,16	220,7	202,6	198,4	212
0,26	208,9	197,3	202,9	208
0,36	223,4	202,6	195,4	194
0,46	196,5	196,1	187,6	198
0,56	193,8	188,3	189,2	194
0,66	188,2	187,2	186,9	187

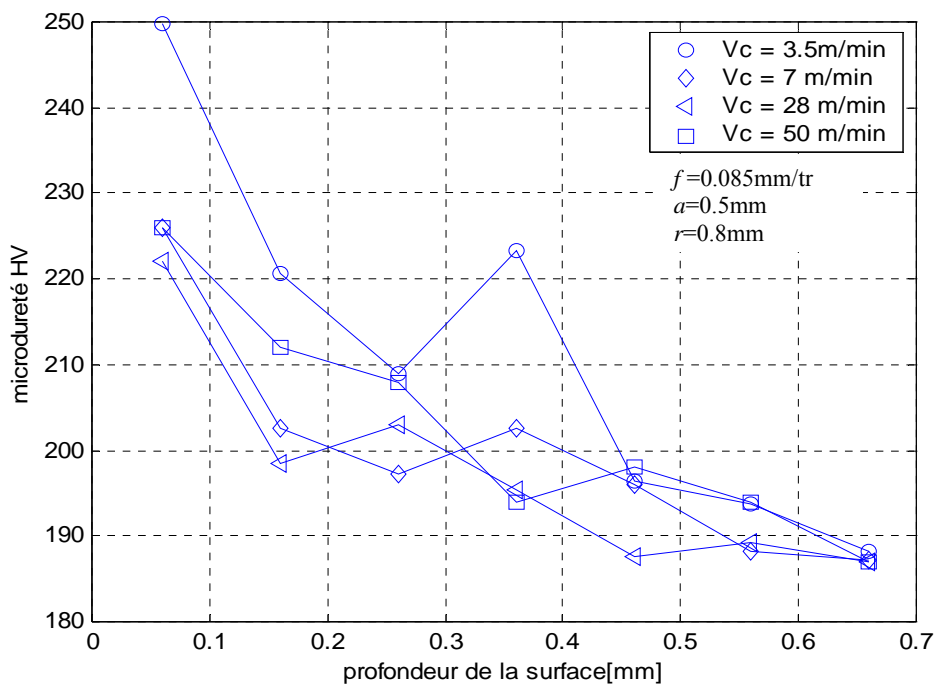


Figure 5.7 : Distribution de la microdureté de la surface vers le centre des éprouvettes en fonction de la vitesse de coupe

Si nous prenons la première valeur des essais de la microdureté à proximité de la surface (fig.5.8) nous trouvons les résultats suivants. La microdureté est élevée à des vitesses très faibles $V_c=3,5\text{m/min}$ (249,7 HV) puis elle diminue à mesure que la vitesse de coupe augmente pour se stabiliser à des vitesses supérieures à partir de $V_c=7\text{m/min}$. Ces résultats sont en accord avec les résultats de ENACHE [4] qui a montré que la dureté à la surface peut être augmentée en diminuant la vitesse de coupe.

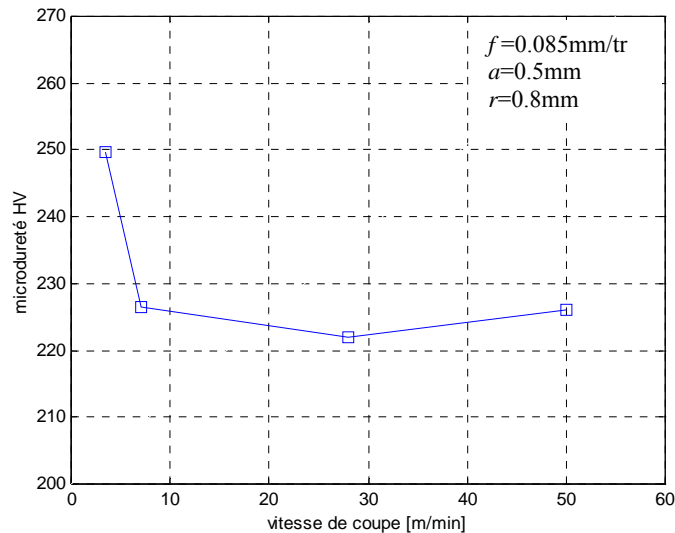


Fig. 5.8 Distribution de la microdureté à la surface des éprouvettes en fonction de la vitesse de coupe

5.2.2.2 Influence de l'avance

Le tableau 5.5 et la figure 5.9 montrent la distribution des microduretés depuis la surface jusqu'au cœur de la pièce usinée en fonction de l'avance de l'outil. Les résultats obtenus montrent que les duretés à proximité de la surface sont élevées pour une avance de coupe $f=0,06\text{mm/tr}$. Celle-ci correspond à l'arête rapportée maximale.

Tableau 5.5 Dureté Vickers HV en fonction de l'Avance avec une vitesse de coupe de 50 m/min, une profondeur de passe de 0,5 mm

Profondeur [mm]	dureté Vickers HV en fonction de l'Avance				
	$f=0,03\text{ mm/tr}$	$f=0,06\text{ mm/tr}$	$f=0,085\text{ mm/tr}$	$f=0,165\text{ mm/tr}$	$f=0,33\text{ mm/tr}$
0,06	219	250	226	225	220,7
0,16	187	222	212	206,1	192,2
0,26	196	206,5	208	201	185,5
0,36	186	204,1	194	189,7	188,3
0,46	201	199,9	198	199	192,2
0,56	187	189,5	194	190,5	187,5
0,66	188	186,1	187	188,6	188,1

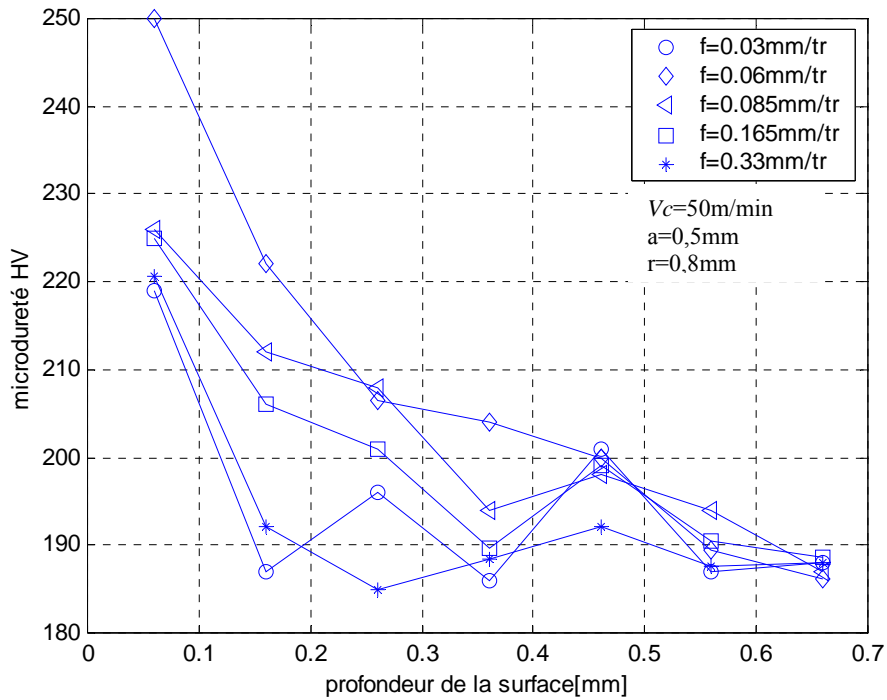


Figure 5.9 : Distribution de la microdureté de la surface vers le centre des éprouvettes en fonction de l’avance

Si nous prenons la première valeur des essais de la microdureté à proximité de la surface (fig.5.10) nous trouvons les résultats suivants : la microdureté est de 219 MPa pour une avance de 0.03 mm/tr puis elle augmente pour arriver à son maximum pour $f=0.06$ mm/tr. Celui-ci correspond à l’arête rapportée maximale puis elle diminue pour se stabiliser à des avances de l’outil plus grandes.

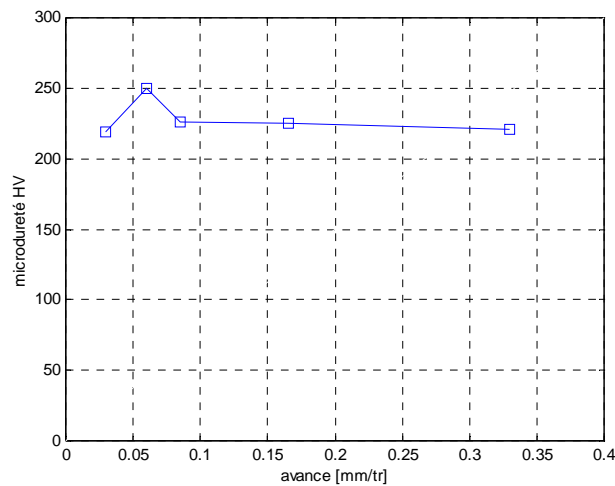


Fig. 5.10 Distribution de la microdureté à la surface des éprouvettes en fonction de l’avance

5.2.2.3 Influence de la profondeur de passe

L'évolution de la microdureté avec la profondeur de la couche superficielle des éprouvettes en XC 48 usinées avec une vitesse de coupe de 50 m/min, une vitesse d'avance d'outil de 0.085 mm/tr et un rayon d'outil $r = 0.8$ mm avec des profondeurs de passe variables est illustrée par le tableau 5.6 et la fig. 5.11

Théoriquement la profondeur de passe a peu d'importance sur l'écroissage de la surface usinée [4], mais nos résultats montrent, qu'augmenter la profondeur de passe entraîne une légère augmentation de la dureté de la surface usinée (fig.5.12).

Tableau 5.6 Dureté Vickers HV en fonction de la Profondeur de passe avec une vitesse de coupe de 50 m/min et une vitesse d'avance d'outil de 0,085 mm/tr

Profondeur [mm]	dureté Vickers HV en fonction de la Profondeur de passe			
	$a = 0,1$ mm	$a = 0,2$ mm	$a = 0,5$ mm	$a = 0,75$ mm
0,06	192,9	235,5	226	242,9
0,16	208,5	220,3	212	227,4
0,26	219	197,6	208	179,9
0,36	206	182,5	194	200,5
0,46	217,7	189,2	198	204,2
0,56	224,7	188,9	194	199,8
0,66	199,4	187,2	187	188,6
0,76	187,2	-	-	187,3
0,86	188,9	-	-	-

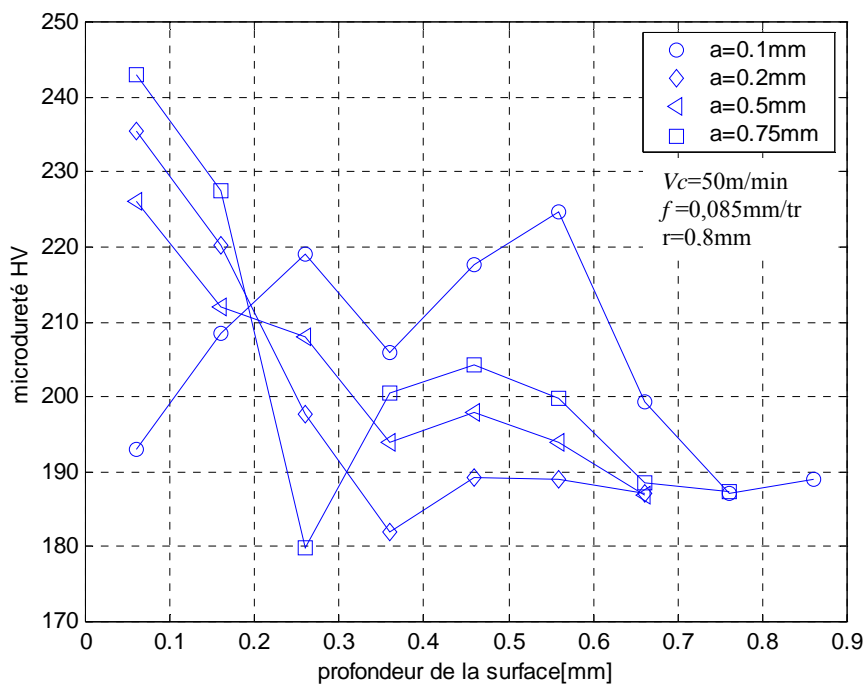


Figure.5.11 : Distribution de la microdureté de la surface vers le centre des éprouvettes en fonction de la profondeur de passe

De plus si nous observons les duretés à la surface elles nous permettent de conclure que la dureté a tendance à augmenter en fonction de la profondeur de passe (fig. 5.12) et est dûe surtout à l'augmentation de la température avec l'augmentation de la profondeur de passe.

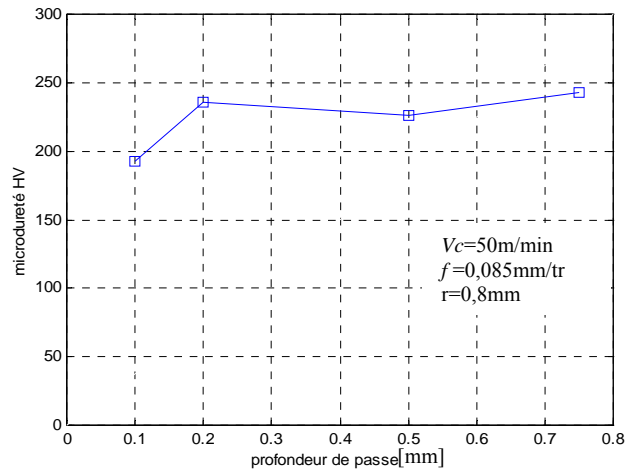


Fig. 5.12 Distribution de la microdureté à la surface des éprouvettes en fonction de la profondeur de passe

5.3 Comportement en fatigue

5.3.1 Influence de la vitesse de coupe

Les résultats des essais de fatigue sont présentés en figure 5.13 sous forme de diagramme de Wöhler montrant l'évolution de la contrainte maximale appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture. Il apparaît que la vitesse de coupe affecte la durée de vie des éprouvettes et la résistance à la fatigue des pièces usinées. Ceci est en général associé à l'influence de ce paramètre de coupe sur l'état de surface caractérisé dans notre cas par la rugosité et la microdureté superficielle. La tendance générale des résultats de la figure 5.13 n'est pas bien définie ce qui est en désaccord avec l'hypothèse stipulant que les rugosités élevées entraînent des durées de vies plus petites pour un niveau de contraintes donné et vice-versa. On notera, par exemple, que la durée de vie diminue avec la vitesse de coupe pour une contrainte de 300 MPa mais la variation est bidirectionnelle pour un niveau de contrainte de 350 MPa.

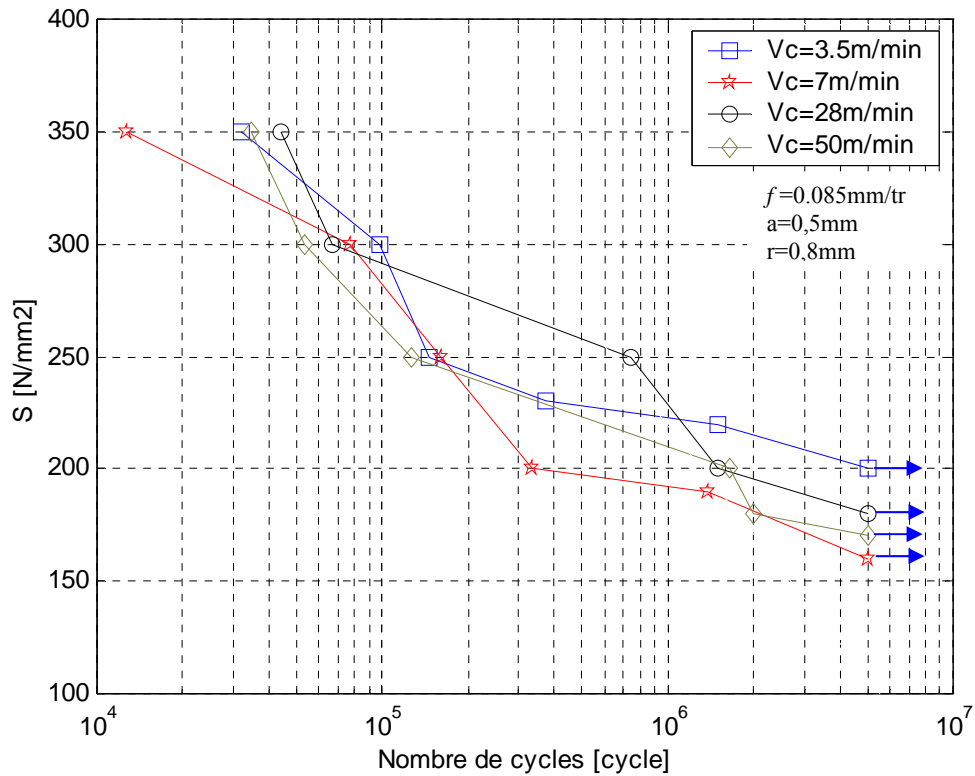


Figure 5.13 : Courbe S-N de l'acier XC 48 usiné en tournage avec des vitesses de coupe variables

5.3.2 Influence de l'avance

Les résultats des essais de fatigue sont présentés en figure 5.14 sous forme de diagramme de Wöhler montrant l'évolution de la contrainte maximale appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture. Cette courbe montre la résistance à la fatigue des pièces usinées avec différentes avances de l'outil de coupe et avec $V_c = 50\text{m/min}$ et $a = 0.5\text{mm}$.

Les résultats présentés dans la figure 5.14 montrent qu'une bonne limite d'endurance a été enregistrée pour les éprouvettes usinées avec des petites avances de l'outil de coupe. Cette limite diminue avec l'augmentation de l'avance. Cela est expliqué par le biais des faibles rugosités obtenues pour les faibles avances.

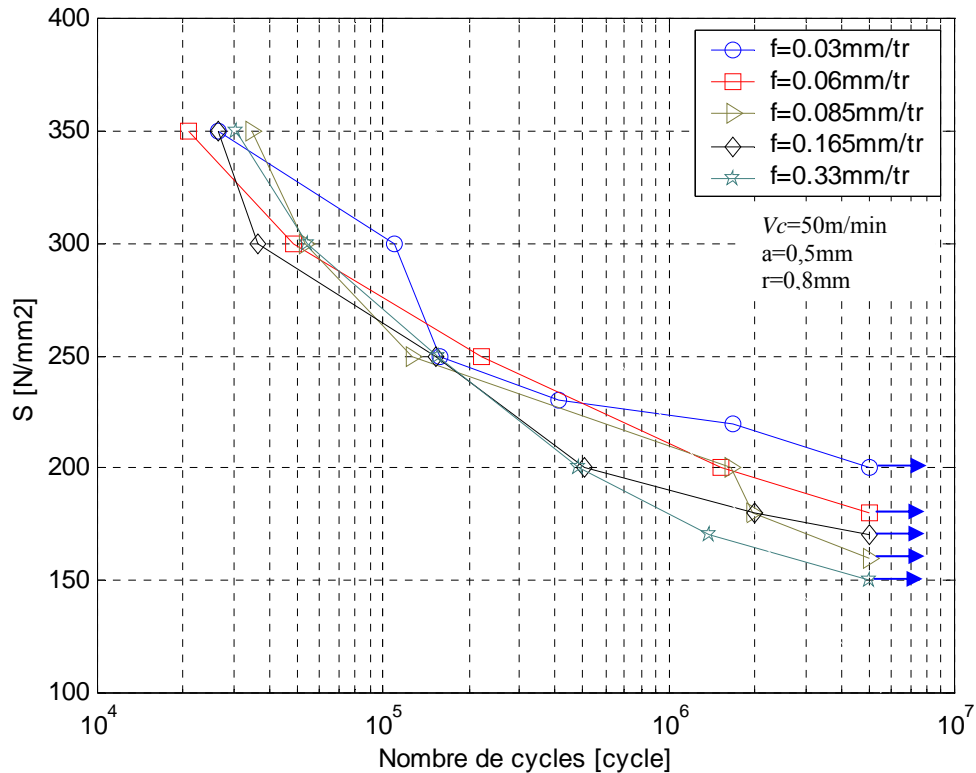


Figure 5.14 : Courbe S-N de l'acier XC 48 usiné par tour avec des vitesses d'avance variables

5.3.3 Influence de la profondeur de passe

Les résultats des essais de fatigue sont présentés en figure 5.15 sous forme de diagramme de Wöhler montrant l'évolution de la contrainte maximale appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture. Cette courbe montre la résistance à la fatigue des pièces usinées avec différentes profondeurs de coupe et avec $V_c = 50\text{m/min}$ et $f = 0.085\text{mm/tr}$. On retrouve que la tenue en fatigue augmente avec la profondeur de passe. Cela est justifié par l'augmentation de la dureté de la surface (fig5.12), malgré la diminution de la rugosité et cela prouve que la rugosité n'est pas le facteur dominant concernant la tenue des pièces en fatigue.

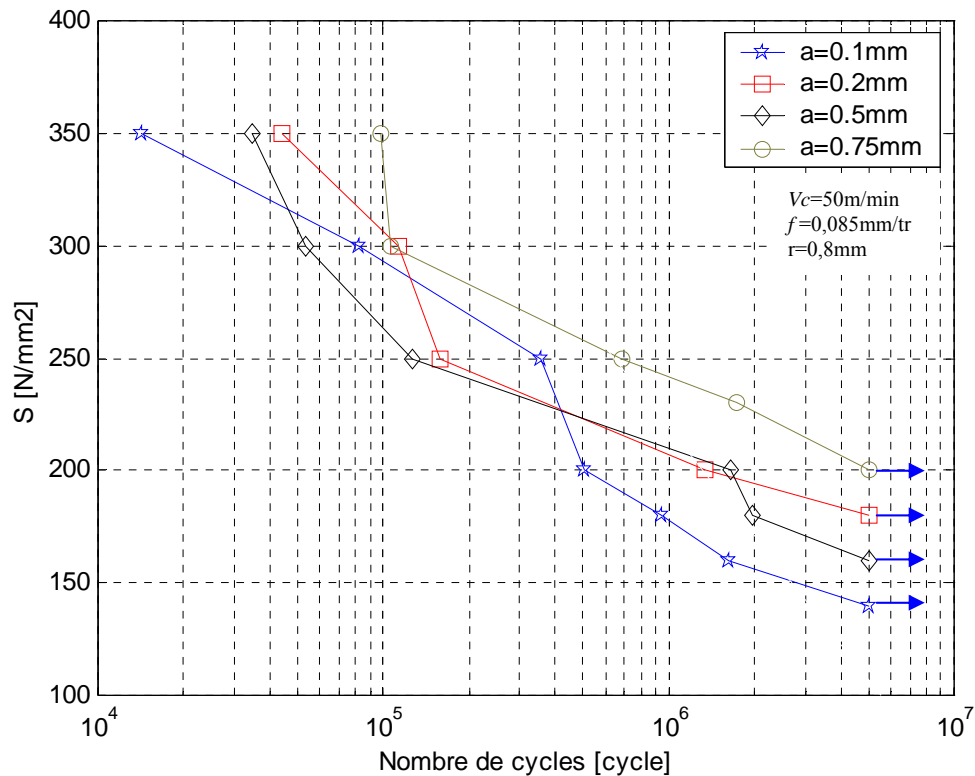


Figure 5.15 : Courbe S-N de l'acier XC 48 usiné par tour avec des profondeurs de passe variables

5.4 Conclusion

En comparant la durée de vie des pièces ayant différents états de surface, une indication globale sur le comportement en fatigue des pièces en fonction de l'état structural de matériau, et de la qualité de leurs surfaces est obtenue. Toutefois, il est difficile de séparer l'influence de la rugosité, des modifications microstructurales, des contraintes résiduelles et de la présence des microfissures sur le comportement en fatigue du matériau étudié. En effet, ces caractéristiques influencent conjointement la fissuration.

La texture de la surface ainsi que l'importance des modifications de la microstructure et des propriétés physico-chimiques sous la surface changent simultanément avec les paramètres de coupe et l'état métallurgique du matériau lors de l'usinage. Le grand nombre des paramètres ayant un rôle d'influence sur le phénomène et la complexité de celui ci rend difficile une approche globale des relations entre les conditions de formation du copeau, l'intégrité de surface et le comportement en fatigue.

En conclusion l'étude expérimentale de la relation entre les conditions d'usinage et l'état de la surface usinée, (rugosité, écrouissage et microstructure), et de relation entre les propriétés de la surface usinée et la rupture en fatigue, permet de noter que :

L'état de surface joue un rôle déterminant sur la résistance à la fatigue d'une pièce mécanique. La notion d'intégrité de surface concerne dans ce cas la rugosité, la microstructure, l'état d'écrouissage et de dureté.

L'amélioration de la tenue d'une pièce soumise à la fatigue en service passe par l'optimisation des paramètres d'usinage, donc la rédaction d'une gamme qui fixe ces paramètres.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le programme expérimental étendu a été mené pour évaluer l'influence de l'état de surface sur la tenue en fatigue en flexion rotative d'un acier XC48. L'effet de la rugosité et de l'écroûissage de la surface (conditions d'usinage) a particulièrement été analysé en utilisant différentes conditions de coupe en tournage. La rugosité, et l'écroûissage des couches superficielles, ont été caractérisés.

Les résultats obtenus mettent en évidence un rôle important de l'état de surface sur la résistance à la fatigue de l'acier XC48. Ils montrent, en particulier que:

- La formation de l'arête rapportée affecte la rugosité de la surface. La variation de la rugosité avec la vitesse de coupe a été trouvée pour un acier à moyen carbone. Il a été montré que l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution de la rugosité de la surface. Ceci est dû à la réduction de la taille de l'arête rapportée à cause de la haute température. L'influence de l'arête rapportée sur la rugosité est affectée par son instabilité.
- Les propriétés fonctionnelles en fatigue des pièces usinées sont très sensibles aux caractéristiques de leurs surfaces et de leur couche superficielle influencée, car les fissures s'initient généralement dans cette surface. Les paramètres de la qualité de surface, notamment la rugosité et les défauts de la surface, la microstructure et les propriétés physico-mécaniques de la couche superficielle influencée, déterminent principalement l'amorçage et le début de la propagation des fissures. Toutefois, il est difficile de séparer l'influence de la rugosité, des modifications microstructurales, des contraintes résiduelles et de la présence des microfissures sur le comportement en fatigue du matériau étudié. En effet, ces caractéristiques influencent conjointement la fissuration. Le choix des paramètres de coupe et de l'état métallurgique du matériau lors de l'usinage est par conséquent important, vu qu'il détermine le processus de formation de copeau déterminant la qualité de la surface.

Références bibliographiques

1. D. NOVOVIC, R.C. DEWES, D.K. ASPINWALL, W. VOICE, P. BOWEN "The effect of machined topography and integrity on fatigue life "International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 125–134
2. M. SURARATCHAÏ , C. MABRU, R. CHIERAGATTI, F. R. ARIA "Influence de gammes d'usinage sur la tenue en fatigue d'un alliage léger aéronautique" 17^{ème} Congrès Français de Mécanique Troyes, - septembre 2005
3. S. PETITJEUN Y. LEHERCY J. MENDEZ " Influence de l'état de surface sur la résistance en fatigue a grand nombre de cycle d'un acier inoxydable austénitique 304L" 24^{èmes} Journées de printemps recueil des communications "Fatigue et état de surface" Paris mai 2005
4. M. GACEB "An investigation of micro crack formation on machined surfaces" A PH-D Thesis, Department of Mechanical and Production engineering, Sheffield City polytechnic, July 1985
5. M. E. MERCHANT "Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and Type 2 Chip", Journal Of Applied Physics, May 1945, pp267-275.
6. M REMADNA." Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (nitride de bore cubique" Thèse doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001, 241p.
7. G. POULACHON "Etude du tournage super finition d'un acier inoxydable" mémoire DEA, laboratoire CESM-INSA de Lyon 1995,65p
8. B. CHANGEUX "Loi de comportement pour l'usinage. Localisation de la déformation et aspects microstructuraux." Thèse de l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, 2001
9. L. PUIGSEGUR, "Caractérisation thermique d'un procédé d'usinage par tournage. Approche analytique et par identification de systèmes non entiers" Thèse de l'Université de Bordeaux I, (2002)
10. J.L. BATTAGLIA, L. PUIGSEGUR, H. EL MOUSSAMI, J.P. NADEAU, J.C. BATSALE "Méthode d'estimation de température et de flux de chaleur dans certains procédés d'usinage" Revue Mécanique et Industrie, 5 (2004) p49-60.
11. C. LE CALVEZ " Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone" Thèse de l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, (1995)
12. R. M'SAOUBI "Aspects thermiques et microstructuraux de la coupe. Application à la coupe orthogonale des aciers austénitiques" Thèse doctorat de l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, 1998-09 (1998)
13. R. M'Saoubi, J.L. Lebrun, B. Changeux "A new method for cutting tool temperature measurement using CCD infrared technique: Influence of tool and coating" Machining Science and Technology, 2 (1998) p369-382
14. R. KOMANDURI T.H BROWN "the mechanics of chip segmentation in machining" Journal of Engineering for Industry, vol. 103 n°1, Feb. 1981, pp. 33-51
15. ST. ENACHE "La qualité des surfaces usinées" édition DUNOD 1972, 340 p.
16. M.MENDES "Influence de l'intégrité de surface sur le comportement en fatigue des pièces en acier XC38" Thèse de Magister Université de Chlef 1998.
17. A.O.TAY, M.G.STEVENSON, G.DE VAHL DAVIS and P.L.B OXLEY "A numerical method for calculating temperature distribution in machining, from force and shear angle measurement" Int. j. Mach. Tool Des. Res. Vol.16 1976 pp335-349
18. P.D MURARKA, S. HINDUJA and G. BARROW "Influence of strain, strain- rate and temperature on the flow stress in the primary deformation zone in metal cutting" Int. j. Mach. Tool Des. Res. Vol.21 1981 pp207-216
19. G. BELLOWS, D. N. TISHLER" Introduction to surface integrity" Material & Process Technology Laboratories Oct. 1970

20. M. FIELD, J. F. RABIES, and J. T. CAMMETT "A Review of Measuring methods for Surface Integrity" Ann of the CIRP, 1971, pp219-237.
21. G. BELLOWS, D. N. TISHLER "Impact of surface integrity on material propriety " Dec.1970
22. F. DUPONT "Aspects microstructural et mécanique des surfaces usinées en alliages d'Aluminium 2024 et 7075", Thèse de doctorat, Dept. des Matériaux, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 1988.
23. A.R.C. SHARMAN, D.K. ASPINWALL, R.C. DEWES, D. CLIFTON , P. BOWEN "The effects of machined workpiece surface integrity on the fatigue life of γ -titanium aluminide "International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 1681-1685
24. H. SCHULTZ "Fraisage à grande vitesse des matériaux métalliques et non métalliques" Paris ed. Technologie d'aujourd'hui 1997, p343.
25. V.KOVAN "Technologie de la construction mécanique " Edition MIR MOSCOW, 1970
26. H.K. Tonshoff, E. Brinksmeier "Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhrdness and residual stresses analysis", Ann of the CIRP, 29/2/1980, pp519-530.
27. B. BENMOHAMMED "Simulation de l'usinage en présence de vibrations cas de tournage- coupe orthogonale" CIMA'04, Boumerdes 2004
28. P. LESKOVAR and J. PEKLENIK "Influences affecting surface integrity in cutting processes", Ann of the CIRP, 1982 pp447-450.
29. M. FIELD, F. KAHLER and J.T. CAMMETT "A Review of measuring methods for surface integrity", Ann of the CIRP, 1972, pp153-163.
30. M. FIELD and F. KAHLER "The surface integrity of machined and ground high strength steels", DMIC Report 210, octobre 1964, pp54-77.
31. C. BATHIAS et J. P. BALLON "Fatigue des matériaux et des structures", Edition Collection Université de Compiègne, 1er trimestre 1980.
32. A. BRAND, J.F. FLAVENOT, R. GREGOIRE et C. TOURNIER " Données technologiques sur la fatigue", Edition CETIM, 1992
33. G.A. POGOSYAN "The effect of the machining method on the dislocation structure in the surface of parts made of hardened 410 steel", Russian Eng. Jour., 1980, pp48-50.
34. R. I. KING "Handbook of high speed machining technology." Chapman and HALL, 1985
35. N. OVSEENKO and al "The effect of machining methods on the fatigue strength of rolling rolls", Russian Engin. Journal Vol.60 No.9, 1980, pp47-48.
36. F. P. SMAGLENKO, B. A. GRYAZNOV and S. S. GORODETSKII "Influence of machining methods on the residual stress distribution and fatigue strength of steel ShKh15 specimens", Fevrier 1977, pp145-150.
37. R. LEMAITRE, J.I. LEBRUN et J. MAEDER "Contraintes résiduelles et fatigue", Matériaux et Techniques sept. 1982, pp297-305
38. H.P. LIEURADE "La pratiques des essais de fatigue" édition Dunod 1981
39. E.M. TRENT Metal cutting, Butterworths 1977.
40. P.L.B OXLEY. "Mechanics of metal cutting", Int. Res. In Prod. Engng., Proc. Int. Prod. Engng. Res. Conf., Pittsburgh, Am. Soc. Mech. Engrs., 1963 p.50
41. M.C SHAW., E. USUI & P.A.SMITH" Free cutting steel: Cutting forces, surface finish and chip formation", Trans. A.S.M.E., Vol. 83 (Series B), 1961pp.181-193
42. M.H. EL-AXIR "A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials" Machine Tool & Manufacture 42(2002) p1055-1063
43. R. CONNOLLY and C. RUBENSTEIN "The mechanics of continuous chip formation in orthogonal cutting" int. j. Mach. Tool Des. Res. Vol.8 1968 pp159-187
44. G. GERMAIN "Contribution a l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser" Thèse doctorat ENSAM décembre 2006

45. M. HABAK "étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6" thèse doctorat l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2006
46. D.Y. JANG, T.R. WATKINS, K.J. KOZACZEK, CR. HUBBARD, O.B. CAVIN "Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel" Wear 194 (1996) 168-173
47. J.L BATTAGLIA, H. ELMOUSSAMI, L. PUIGSEGUR "Modélisation du comportement thermique d'un outil de fraisage : approche par identification de système non entier" C. R. Mécanique 330 (2002) 857-864.
48. T. D. MARUSICH "Modeling Residual Stress and Workpiece Quality in Machined Surfaces" 1998.
49. T. ÖZEL, T.K. HSU, E. ZEREN "Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and force in finish turning of hardened AINSI H13 steel "
50. E. M. TRENT "Metal cutting", 3rd edition Butterworth-Heinemann 1991.