

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en I S M

***Projet* : Effets des paramètres de coupe
sur le comportement en fatigue : Etat de
l'art et synthèse.**

Présente par :

YAZIT Mustapha

Président :

M. SEBAA Fethi

Encadreur :

M.BENACHOUR Mustapha

Examineur :

HADJOUI Fethi

KARA Ali Djamel

Année universitaire : 2011-2012

REMERCIEMENTS

L'exercice des remerciements est toujours périlleux. Selon Les pensées de Pierre Dac, « Celui qui est parti de zéro pour n'arriver à rien n'a de merci à dire à personne. ». N'étant pas parti de zéro, je vais donc adresser quelques merci.

J'ai sincèrement pris beaucoup de plaisir pendant toute la durée de la thèse. J'ai eu la chance d'avoir un encadrement scientifique de qualité. Je remercie donc très chaleureusement mon encadreur direct M^{ieur} BENACHOUR Mustapha. Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance au président de la thèse M^{ieur} SEBAA Fethi et aux membres du jury, M^{ieur} HADJOUI Fethi et M^{ieur} KARA Ali Djamel pour leur investissement important dans l'analyse, la critique honnête et constructive du travail effectué.

Un autre gros merci s'adresse à tous les professeurs du département GMP. Merci aussi à tous mes amis de classe Maroudi, Kacimi, Tlemsani, Guermate, Ouaret, Ouabel Siad et mademoiselle Meliani.

Je remercie aussi tout particulièrement ma maman, mon papa et ma grande mère pour tout le travail de relecture et surtout pour leurs soutiens.

Un gros bisou et un gros merci à mes petits frères Djihad, Djaoued, mes petites sœurs Nadira et Insaf qui est due à leurs encouragements.

Merci à tous qui se sont déplacés pour m'encourager à la soutenance. Enfin, merci à tous les amis et en particulier : Sadouki Yahia et Aboubekr, MELLOUKI Réda, MOULAY EL HADJ Mounir et FARSI Boumediene.

RESUME

L'objectif de cette étude est de bien comprendre le phénomène de fatigue, ainsi que les facteurs qui lui influent. Des études ont montré que les paramètres de coupe ont une influence sur la durée de vie des produits usinés par le biais de la nature de l'état de surface. La nouvelle surface obtenue par les différents procédés n'est jamais parfaite à cause des déformations résultantes des paramètres de coupe sur la couche superficielle qui contribuent dans la plus part des cas la fissuration de ces éléments de structure.

C'est pour cette raison que cette étude est menée afin de vérifier cette hypothèse en tenant compte des études déjà réalisées pour différents matériaux obtenues avec des différents procédés.

Mots clés : Fatigue, Paramètres de coupe, Etat de surface, Durée de vie.

ABSTRACT

The objective of this study is to understand the phenomenon of fatigue, as well as factors which influence. Studies have shown that cutting parameters have an influence on the life of engineered products through the nature of the surface state. The new surface obtained by the different methods is never perfect because of the resulting deformation of the cutting parameters on the surface layer helps in most cases the cracking of these structural elements. It is for this reason that this study was conducted to test this hypothesis by taking into account existing studies for different materials obtained with different methods.

Keywords: Fatigue, Life of engineered products, Cutting parameters, Nature of surface.

TABLE DES MATIERES :

Remerciements.....	1.
Tables des matières.....	2.
Tables des figures.....	5.
Liste des tableaux.....	7.
Résumé.....	8.
Abstract.....	8.
Introduction globale.....	9.
CHAPITRE I : FATIGUE ET ENDURANCE.....	11.
I. Histoire de la fatigue des métaux et des structures.....	12.
II. Evènements majeurs dans l’histoire de la fatigue des métaux	16.
III. Définition de la fatigue.....	18.
IV. Diagramme d’endurance.....	20.
V. Estimation de la fatigue.....	22.
VI. Nature et aspects de dispersion des résultats des essais de fatigue.....	23.
VII Les facteurs qui influent le comportement en fatigue.....	24.
VII. 1. Les facteurs métallurgiques.....	25.
VII.2.Les conditions de sollicitation.....	25.
A. Nature des efforts.....	25.
B. Effets de sous charge et de surcharge.....	26.
C. Les contraintes résiduelles.....	26.
D. Effet de la fréquence et du milieu ambiant.....	32.
E. Influence de l’environnement.....	33.
VII.3.Les facteurs géométriques.....	34.
VII.4.Les conditions de surface	34.
A. Influence de la nature de surface.....	35.
B. Influence de la micro-géométrie de la surface.....	35.

CHAPITRE II : LA RELATION ENTRE LES PARAMETRES DE COUPE ET LE COMPORTEMENT EN FATIGUE.....37.

I. Introduction.....	38.
II. les paramètres de coupe.....	38.
II.1. La vitesse de coupe (V_c).....	39.
II.2. La vitesse d'avance (V_f).....	41.
II.3. La profondeur de coupe (a_p).....	41.
III. L'état de surface.....	42.
III.1. La rugosité de surface.....	44.
III.2. Modélisation de l'influence de la rugosité de surface sur la tenue en fatigue.....	46.
A. Relation empiriques entre paramètres de rugosité et durée de vie.....	46.
B. La rugosité vue comme une fissure.....	47.
C. La rugosité vue comme un concentrateur de contraintes.....	47.
IV. Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface.....	48.
V. Conclusion.....	50.

CHAPITRE III : EFFETS DES PARAMETRES DE COUPE SUE LE COMPORTEMENT EN FATIGUE.....51.

I. Introduction.....	57.
II. Influence de la vitesse de coupe sur le comportement en fatigue.....	60.
II.1. Matériaux composites (Carbone/époxy).....	60.
II.2. L'acier AISI 4140.....	63.
II.3. L'acier 42 CRMO 4 à l'état recuit.....	65.
II.4. L'acier HBDE-80.....	68.
III. Influence de la vitesse d'avance sur le comportement en fatigue.....	69.
III.1. Matériaux composites (Carbone/époxy).....	69.
III.2. L'acier AISI 4140.....	71.
III.3. L'acier HBDE-80.....	74.
IV. Influence de la profondeur de passe sue le comportement en fatigue.....	75.
IV.1. L'acier AISI 4140.....	75.

IV.2. L'acier HBDE-80.....	73.
Synthèse globale.....	74.
Références bibliographiques.....	77.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure 1.1.a	Contraintes alternées.....	18.
Figure 1.1.b	Contraintes alternées symétriques.....	18.
Figure 1.1.c	Contraintes alternées répétées et ondulées.....	19.
Figure 1.2	Diagramme d'endurance (courbe de Wöhler).....	21.
Figure 1.3	Contraintes résiduelles dans une plaque au voisinage d'un trou..	28.
Figure 1.4	Influence de galetage sur la tenue en fatigue d'un vilebrequin automobile.....	29.
Figure 1.5	Contraintes résiduelles autour d'un trou expansé.....	30.
Figure 1.6	Influence de l'environnement sur l'endurance d'un alliage d'aluminium AU4G	31.

CHAPITRE II

Figure 2.7	Vitesse de coupe d'un outil de tournage.....	33.
Figure 2.8	Détermination de V_f à régler sur la machine.....	40.
Figure 2.9	Définition des critères de l'état de surface.....	41.
Figure 2.10	Evaluation de R_a évalué.....	43.
Figure 2.11	Evaluation de R_z	44.
Figure 2.12	Evaluation de R_t	45.
Figure 2.13	Schéma de l'intégrité de surface pour pièces usinées.....	49.

CHAPITRE III

Figure 3.14	Observation des éprouvettes avant et après les essais de traction.....	57.
Figure 3.15	Variation de la contrainte à la rupture en fonction de V_c	58.
Figure 3.16.a	Influence V_c sur la rugosité moyenne du profil (R_a)	59.

Figure 3.16.b	Influence de la vitesse de coupe la hauteur du profil total (R_t)....	59.
Figure 3.16.c	Influence de V_c sur la hauteur du profil maximum (R_z).....	59.
Figure 3.17	Influence de V_c sur la limite de fatigue de l'acier AISI 4140.....	60.
Figure 3.18.a	Evolution de R_a en fonction de l'usure en dépouille pour le premier régime	61.
Figure 3.18.b	Evolution de R_t en fonction de l'usure en dépouille pour le premier régime	61.
Figure 3.18.c	Evolution de R_z en fonction de l'usure en dépouille pour le premier régime	62.
Figure 3.19.a	Evolution de R_a en fonction de l'usure en dépouille pour le deuxième régime	62.
Figure 3.19.b	Evolution de R_t en fonction de l'usure en dépouille pour le deuxième régime	62.
Figure 3.19.c	Evolution de la R_z en fonction de l'usure en dépouille pour le deuxième régime.....	63.
Figure 3.20	Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface.....	64.
Figure 3.21	Variation de la contrainte à la rupture en fonction de V_f pour $V_c = 64,8$ m/min.....	66.
Figure 3.22.a	Influence de V_f sur la rugosité moyenne de profil (R_a).....	67.
Figure 3.22.b	Influence de V_f sur la hauteur du profil total (R_t).....	67.
Figure 3.22.c	Influence de V_f sur la hauteur du profil maximum (R_z).....	67.
Figure 3.23	Influence de la vitesse d'avance sur la limite en fatigue.....	68.
Figure 3.24	Influence de V_f et le soulagement des contraintes résiduelles sur la limite de fatigue.....	69.
Figure 3.25	Influence de la vitesse d'avance sur la rugosité de surface.....	70.
Figure 3.26.a	Influence de a_p sur la rugosité moyenne de profil (R_a).....	71.
Figure 3.26.b	Influence de a_p sur la hauteur de profil total (R_t).....	71.
Figure 3.26. c	Influence de a_p sur la hauteur de profil maximum (R_z)	72.
Figure 3.27	Influence de a_p sur la limite de fatigue.....	72.
Figure 3.28	Influence de la profondeur de passe sur la rugosité de surface.....	73.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau 1.1 Evénements majeures dans l’histoire de fatigue des métaux.....	17.
Tableau 1.2 Influence des conditions d’usinage sur l’endurance de l’acier XC 48 à l’état recuit.....	29.

CHAPITRE III

Tableau 3.3 Paramètres de coupe utilisés au cours du perçage.....	56.
Tableau 3.4 Plan des essais de traction à deux facteurs (V_c).....	57.
Tableau 3.5 Différents valeurs de vitesse de coupe.....	64.
Tableau 3.6 Plan des essais à deux facteurs (V_f).....	65.
Tableau 3.7 Différents valeurs de l’avance.....	70.
Tableau 3.8 Différents valeurs de profondeur de passe.....	73.

LISTE DES NOTATIONS

R	Rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale.
σ_{\max}	La contrainte maximale.
σ_{\min}	La contrainte minimale.
σ_a	La contrainte alternative.
σ_r	La contrainte à la rupture.
σ_m	La contrainte statique.
N	Le nombre de cycle à rupture.
R_a	Rugosité moyenne du profil.
R_t	Hauteur du profil total.
R_z	Hauteur du profil maximum.
R_q	Moyenne de la racine carrée de la rugosité.
R_m	Charge à la rupture.
R_e	Limite d'élasticité.
σ_D	Limite de fatigue.
$\sigma_D(N_F)$	Limite d'endurance.
σ_{ext}	Les contraintes extérieures.
σ_{int}	Les contraintes internes.
σ_{DS}	Limite de fatigue pour un certain état de surface.
K_{th}	Le facteur de concentration de contrainte théorique élastique.
K_f	Le facteur de concentration de contrainte expérimental élastique.
K_s	Le facteur de réduction.
V_c	La vitesse de coupe.

V_f	La vitesse d'avance.
a_p	La profondeur de passe.
M_c	Le mouvement de coupe.
M_f	Le mouvement d'avance.
VB_{\max}	L'usure en dépouille admissible maximum.

INTRODUCTION GENERALE :

Les structures mécaniques sont toujours soumises à des chargements cycliques à amplitude constante ou variable :

- Charges roulantes ;
- Vibratoires ;
- Rotatives ;

Ces sollicitations variables imposées sur ces structures peuvent engendrer l'amorçage des fissures par le biais du phénomène appelé fatigue. Ce phénomène est un problème toujours d'actualité depuis le début de l'ère industrielle au milieu du 19^{ème} siècle. Il a causé un grand nombre d'accident catastrophique dans le domaine de l'aviation, de l'aérospatial et d'une manière générale du génie industrielle. La résolution de ce problème a mené plusieurs chercheurs à la définition des paramètres qui conduisent à la destruction et l'endommagement de ces structures, ainsi que leurs durées de vie afin d'éviter ces accidents. Le dimensionnement en fatigue des pièces mécaniques nécessite la maîtrise de l'état de la pièce elle-même (son matériau, sa géométrie et sa surface), du chargement appliqué et si possible de l'environnement (température, eau, produit chimique,...).

La majorité des pièces mécaniques sont obtenues par le procédé d'enlèvement de matière qu'il est indispensable de maîtriser car il peut induire des transformations micro géométriques, mécaniques et métallurgiques, très influente sur l'intégrité de surface et donc sur la durée de vie de ces pièces mécaniques. Cela vérifie que les paramètres de ces procédés ont une influence sur le comportement en fatigue. L'étude de l'intégrité de surface obtenue en fonction des conditions d'usinage et l'étude du comportement en fatigue d'un matériau sont souvent des travaux réalisés par des communautés scientifiques différentes.

La problématique des travaux présentés dans ce mémoire est de mettre en évidence l'effet des paramètres de coupe sur le comportement en fatigue lors de l'usinage d'une pièce. De nombreux travaux existent sur d'une part l'influence de l'usinage sur l'intégrité de surface et d'autre part sur le comportement intrinsèque du matériau en

fatigue sans prendre en compte les défauts de la surface. Donc on peut dire que l'intégrité lie le procédé d'usinage et le comportement en fatigue.

Des études ont montrés que les paramètres de coupe, l'hétérogénéité et la constitution des matériaux génèrent non seulement une usure prématurée des outils coupants. Dans le but d'appréhender leur apparition, des auteurs ont relié les paramètres de coupe à l'endommagement et aux caractéristiques mécaniques du produit usiné.

C'est dans ce contexte ou s'inscrivent mon travail. Une étude de l'influence, sur le produit final, des paramètres de coupe (vitesse de coupe, d'avance et la profondeur de passe), de l'élaboration est réalisée. Elle permettra de relier ces derniers aux anomalies susceptibles d'être générées par la coupe. La fiabilisation de ces corrélations constitue un véritable verrou technologique au développement et à l'optimisation de l'usinage des matériaux.

Cette recherche s'articule autour de trois chapitres :

- Le chapitre I, a pour objectif de visualiser les évènements qui marquent l'histoire de la fatigue, de définir ce phénomène, en déterminant les méthodes d'estimation des durées de vie des pièces usinées ainsi que les paramètres qui influent le comportement en fatigue.
- Dans le deuxième chapitre (chapitre II), il à pour but la détermination de la relation entre les paramètres de coupe et l'état de surface puisque le comportement en fatigue des pièces dépend de la qualité de la surface usinée. Si l'état d'une surface est très important pour la tenue en fatigue des éléments de structure, alors les paramètres de coupe ont une influence sur la durée de vie des matériaux puisque ces surfaces sont obtenues par différent procédé d'usinage.
- Le dernier chapitre, ou s'inscrit mon propre travail, la prise en compte de plusieurs études pour des différents types de matériaux (acier HBDE-80, acier AISI 4140, matériau composite (Carbone/époxy) et l'acier 42 CrMo à l'état recuit) à l'objectif d'indiquer l'effet de chaque paramètre sur le comportement en fatigue des pièces usinées par plusieurs types de procédé.

Mots clés : Fatigue, Paramètres de coupe, Usinage, Durée de vie.

CHAPITRE I

I. HISTOIRE DE LA FATIGUE DES METAUX ET DES STRUCTURES

L'apparition de terme fatigue dans le vocabulaire technique, date de la révolution industrielle du XIX^{siècle}. Dès cette époque, de nombreuses pièces mécaniques qui, par leurs natures et leurs fonctions, étaient soumises à des sollicitations répétées, vinrent à se rompre en service. Un journaliste anglais avait introduit le terme fatigue dans une traduction de travaux allemands étudiant ce phénomène. Ce terme constitua dès lors la terminologie universellement admise pour désigner le processus d'endommagement et de rupture des matériaux sous charges cycliques.

La France possède sans doute le triste privilège d'avoir connu la première catastrophe pouvant être attribuée sans doute au phénomène de fatigue. Le 5 octobre 1842, le train Paris- Versailles transportait entre 1500 et 1800 personnes. Soudain, entre Meudon et Bellevue, l'essieu de la locomotive de tête se rompit et la locomotive se trouva sur la voie. Elle fut aussitôt percutée par les deux autres locomotives et les 17 wagons du convoi. Six wagons prirent immédiatement feu. On dénombra environ 60 victimes, soit un nombre sensiblement égal à celui de la catastrophe du Comet qui surviendra en 1954. Cette catastrophe entraîna une prise de conscience du problème par les autorités qui, dès cette époque ; établirent un certain nombre de recommandations et appelèrent à définir des procédures d'essais permettant de prédire la durée d'utilisation des essieux. On assista alors au développement d'un nouveau champ d'investigation scientifique et technologique ayant pour objectif d'identifier les causes de telles ruptures brutales.

Dès 1843, Rankine, un ingénieur des chemins de fer britanniques, identifia les principales caractéristiques de la rupture par fatigue et souligna notamment les dangers que peuvent constituer les concentrations de contraintes pour les structures mécanique.

Au même temps en Allemagne, Andreas Wöhler fut nommé en 1847 responsable du matériel roulant et de l'atelier de la ligne Niederschlesich-Markische. Durant 23 ans à Frankfort sur l'Oder, il avait confronté de nombreux problèmes concernant les propriétés mécaniques des matériaux, et plus particulièrement leur tenue en fatigue. C'est dans ce cadre qu'il développa notamment un système permettant de déterminer

les charges vues en service par les essieux qui montraient un nombre important de défaillances. Il conduisit des essais systématiques sur la rupture par fatigue d'essieux au moyen d'une machine spécialement conçue à cet effet. Il remarqua notamment que la contrainte admissible sous des chargements répétés peut être considérablement inférieur à la résistance statique.

Gerber(1874) puis Goodman(1899) proposèrent des méthodes pour déterminer la durée de vie en fatigue sous différents niveaux de chargement. Dans le même temps, à Munich, Johann Bauschinger entreprit des travaux sur le comportement des métaux sous sollicitations cycliques. Il observa que, lorsqu'un matériau est déformé au-delà de sa limite d'élasticité en traction, sa limite d'élasticité en compression s'en trouve réduite. De plus, si ce matériau est soumis à plusieurs cycles de chargement, les limites en traction et en compression évoluent de telle manière que le matériau se comporte de façon parfaitement élastique entre ces limites que Bauschinger appela *limites naturelle*.

A partir de 1920-1930, l'étude du comportement en fatigue des métaux devint un champ d'investigation scientifique à part entière et vit notamment apparaître le concept de cumul de dommage. Cependant, en dépit de ces percées remarquables, le processus du phénomène de fatigue demeurait largement méconnu. Ainsi, en 1948, le romancier Neville Shute, alors très en vogue, publia un roman intitulé <<No Highway>>. L'action de ce roman se déroulait dans le milieu de l'aéronautique à Farnborough.

En 1951, ce roman fut porté à l'écran sous le titre « No Highway in the sky » avec James Stewart, Marlène Dietrich et Jack Hawkins. Un passage relatif à la fatigue des métaux est révélateur de la perception du phénomène à cette époque.

La fatigue peut être décrite comme une maladie du métal. Lorsque les métaux sont soumis à des chargements alternés, après un grand nombre d'application, toutes les propriétés du matériau peuvent être usées, et ce changement peut se produire de façon soudaine. Un alliage d'aluminium qui a enduré sans problème plusieurs milliers d'heures de vol peut subitement devenir fragile comme du verre et se rompre sous des efforts très faibles, avec des conséquences désastreuses pour l'appareil. En particulier, l'assimilation de la fatigue à une « maladie » qui rendait le matériau subitement fragile

est pour le moins approximative. En effet, ce phénomène est en réalité étroitement lié à des effets de micro plasticité. Ensuite, même si la principale manifestation du phénomène, à savoir la rupture, se relève généralement de façon brutale, le caractère progressif du développement de cet endommagement ne saurait être ignoré. La relation entre l'endommagement par fatigue et les déformations plastiques cycliques fut établie par Coffin et Manson en 1954. Ces derniers proposèrent une relation empirique entre l'amplitude de déformation plastique et la durée de vie.

En 1954, en l'espace de trois mois, deux appareils de type Comet I s'abimèrent en mer au large de l'Italie. Ce type d'avion avait été développé peu de temps auparavant par la société de Havilland, puis mis en service par la compagnie BOAC. Par sa conception il était totalement novateur. Ainsi, son altitude de croisière était portée à 40 000 pieds, ce qui nécessitait un niveau de pressurisation de la cabine entraînant une pression de 56 kPa sur le fuselage. Enfin, la masse de l'appareil était également optimisée. Les investigations pour savoir les causes de ces catastrophes furent menées sur les épaves des appareils endommagés, mais aussi sur des fuselages ayant le même nombre d'heures de vol et testés dans un réservoir permettant de simuler les cycles de pressurisation /dépressurisation de la cabine. Ces investigations montrèrent que les accidents étaient dus à une rupture de la cabine consécutive à la propagation de fissures de fatigue à partir de défauts probablement présents dès la construction de l'appareil. De tels défauts n'étaient pas apparus sur les générations d'aéronefs précédentes, principalement parce que le niveau de pressurisation de la cabine y était nettement moins élevé. Les connaissances acquises du fait de ces accidents permirent des avancées significatives, notamment dans l'élaboration de procédure d'essais visant à accroître la fiabilité des avions civils. Toutefois, si De Havilland produisit par la suite le Comet IV qui entra dans l'histoire comme le premier appareil commercial à traversé l'Atlantique le 4 octobre 1958, son image se trouva irrémédiablement lié par ces catastrophes. En fait, les avancées résultant des investigations menées par les ingénieurs britanniques profitèrent surtout à Boeing dans le développement du 707.

Dans le même temps, une percée importante sur le plan de la description mécanique des champs de contrainte et déformation associé à la présence d'une fissure permit de développement d'outil de prédiction de plus en plus faible. En effet, bien que la

rupture par fatigue soit très tôt associée à la propagation de fissure, il n'existait pas d'outil pour décrire des conditions de propagation de ces fissures à l'exception des travaux d'Inglis et de Griffith limités à la rupture des matériaux fragile.

Irwin (1957) d'un paramètre caractéristique, le facteur d'intensité de contrainte K . Les concepts de la mécanique élastique linéaire de la rupture ont alors été appliqués à la description de la propagation des fissures de fatigue.

Paris et ses collaborateurs montrèrent ainsi que la vitesse de propagation d'une fissure est corrélée à l'amplitude de facteur d'intensité de contrainte. Cette description est aujourd'hui très largement adoptée.

La navette spatiale américaine constitue un exemple de structure où l'approche mécanique de la rupture est utilisée pour prévenir les ruptures liées à la propagation de défaut type fissure dans différents éléments structuraux. Leur prise en compte dans les lois d'endommagement utilisées pour le dimensionnement reste dans une large mesure empirique malgré tous ces efforts. Aujourd'hui encore, des avaries majeures notamment dans le domaine du transport, résultent de rupture par fatigue. A titre d'exemple, dans la période 1998-2000, plusieurs catastrophes ferroviaires ont été causées par des ruptures d'organes de roulement. Le 3 juin 1998, l'inter City Express (ICE) allemand déraille après la rupture d'une roue, montrant ainsi que les défaillances d'élément de roulement, qui furent à l'origine des travaux sur la fatigue, demeurent un problème après plus d'un siècle de travaux dans ce domaine.

Le 17 octobre 2000, un train britannique déraille au nord de Londres suite à la défaillance d'un rail. L'examen de l'ensemble du réseau du royaume – Uni révélera plus de 2000 sites potentiellement dangereux.

Pour ce qui concerne le transport aérien, on peut citer l'exemple du vol 243 d'Aloha Airlines le 28 avril 1988, où un Boeing 737-200 subit une dépressurisation brutale durant la phase d'ascension fort heureusement l'arrachement d'environ 5,50 m de fuselage au niveau de la cabine n'entraîna pas la désintégration de la structure, permettant un atterrissage d'urgence.

Notre environnement quotidien est constitué de multiples exemples d'éléments ou structures susceptibles de se rompre par fatigue. En effet, si le secteur de transport aérien, terrestre et maritime est à l'origine de nombreuses avancées dans le domaine,

le problème de fatigue concerne aujourd'hui des domaines d'activités très divers tels que la production d'énergie, le biomédical. D'une manière plus général, on estime aujourd'hui qu'environ 80%. Des ruptures en service sont dues à une mauvaise prise en compte de l'endommagement par fatigue au stade de la conception et/ou du dimensionnement (mauvaise conception, critère inadapté, etc...). Une des principales raisons réside dans le nombre important de facteur à prendre en compte. Ces facteurs ont en plus des origines extrêmement diverses et agissantes à des échelles différentes. Il convient en effet d'appréhender parallèlement :

- Des paramètres mécaniques décrivant le chargement global appliqué à la structure considéré, dont la nature peut évoluer au cours de temps ;
- Des facteurs liés à la nature même des matériaux utilisés, c'est-à-dire leurs microstructures et leurs caractéristiques mécaniques ;
- Des paramètres relatifs à l'environnement dont lequel est sollicité le matériau, c'est-à-dire la nature des espaces présentés, leurs pressions, la température, etc..., et leur interaction avec le matériau déformé en pointe de fissure ;

De nos jours, on a vu apparaitre un nombre important d'outil informatique d'aide au dimensionnement en fatigue. Ces outils ne prennent que partiellement en compte, et le plus souvent de façon implicite, l'influence des différents facteurs énumérés ci-dessus.

De ce fait, les prédictions qu'ils fournissent possèdent un domaine de validité intimement lié aux hypothèses du développement et ne doivent donc être étendues aux structures réelles qu'avec prudence [1].

I. EVENEMENTS MAJEURS DANS L'HISTOIRE DE LA FATIGUE DES METAUX ET DES STRUCTURES

Le tableau présenté ci-dessous figure les étapes marquantes et les évènements majeurs qui ont marqué l'histoire de la fatigue. Ce mode d'endommagement a touché plusieurs domaines non seulement le transport par voie ferré mais aussi le domaine de l'aviation qui a marqué plusieurs accidents graves comme l'accident d'Aloha sur un Boeing 737-200 en 1988 à cause de la corrosion et la fatigue aux trous de perçage d'assemblage de fuselage. On peut citer aussi l'accident du DC 10 à Sioux City dans

l'Iowa causé par la perte d'un moteur détachée en 19 juillet 1989. Plus récemment encore, on peut citer aussi l'accident de Pensacola provoqué par l'éclatement du disque moteur à cause d'un défaut de perçage d'un disque. On remarque à chaque fois que la cause principale de ces accidents est l'être humain après vient la défaillance du matériel c'est pour cela il ne faut pas penser que ce moyen de transport est dangereux suite au développement très rapide de cette industrie aéronautique mené dans la conception, la fabrication et la maintenance [2].

Tableau 1.1 : Evénements majeures dans l'histoire de fatigue des métaux.

Année	Evènements
1842	Accident de chemin de Meudon
1858	1 ^{er} publication de Wöhler
1860-1870	Expérience de Wöhler sur des essieux lisses et entaillés. Essais de traction et de flexion. - Etude de l'effet d'une contrainte moyenne.
1881	Etude de Bauschinger à l'origine de la fatigue oligocyclique.
1910	Loi de Basquin.
1913	Distribution des contraintes au voisinage des entailles (Inglis).
1920	Bilan d'énergie pour la propagation d'une fissure (Griffith).
1937	Concept du Neuber pour les entailles.
1939	Approche statique de la fatigue. Loi de Wei bull.
1945	Concept de Miner pour le cumul du dommage de fatigue.
1953-1954	Fatigue oligocyclique. Loi de Manson-Coffin.
1954	Accidents des avions de Commet.
1956	Introduction du concept de force d'extension d'une fissure.
1960	Machines servohydrauliques.
1961	Loi de Paris pour la propagation des fissures.
1968	Introduction du concept de facteur d'intensité de contraintes effectives (Elber).
1988	Accident d'Aloha B57.
1989	Accident DC10 Sioux City
1996	Accident Pensacola
1998	Accident de chemin de fer ICE Eschede.
2006	Accident de Los Angeles.

III. DEFINITION DE LA FATIGUE

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue, la modification des propriétés des matériaux consécutives à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées par ces matériaux. Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle, σ_{max} , par la valeur moyenne de la contrainte, σ_m , et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale :

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max} \quad (1.1)$$

On est parfois conduit à distinguer la composante alternative σ_a de la composante statique σ_m . Ainsi, selon les valeurs relatives de ces deux composantes, on distingue les essais sous sollicitation (figure 1.1).

Figure 1.1.a : Contraintes alternées.

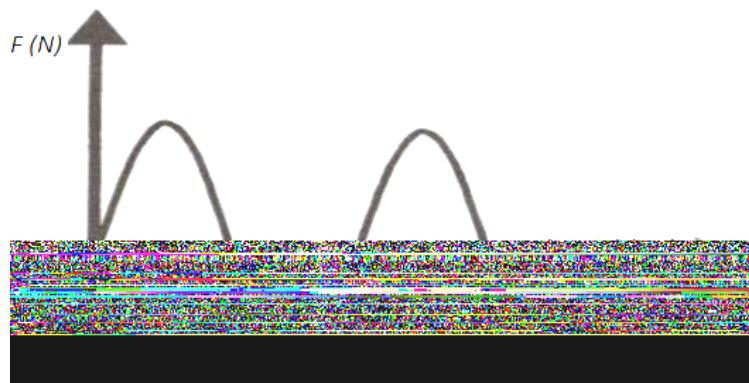


Figure 1.1.b : Sollicitations alternés symétriques ($\sigma_m = 0$, $R = -1$).

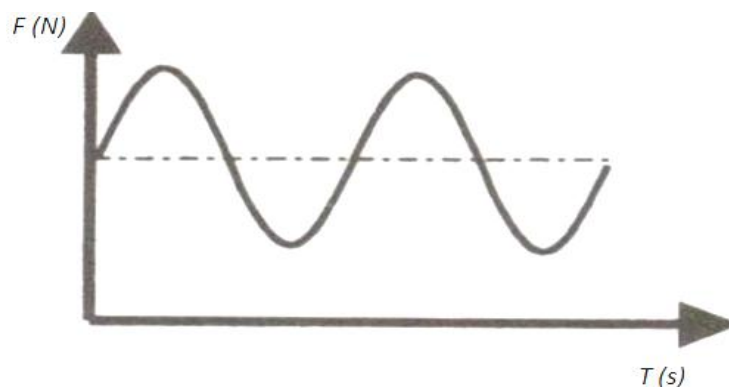


Figure 1.1.c : Sollicitations répétées ($\sigma_m = \sigma_a$; $R = 0$) ; Ondulée ($\sigma_m > \sigma_a$; $0 < R < 1$).

Les déformations interviennent éventuellement dans le cas de la fatigue. En général, la fatigue se produit sans déformation plastique d'ensemble mais avec déformation plastique très localisée d'abord autour des défauts, à fond d'entaille ou en surface, ensuite à l'extrémité de la fissure une fois que celle-ci s'est déformée. Il en résulte que la mesure de cette déformation est extrêmement difficile. La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N . L'exécution de n cycles ($n < N$) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident.

On appelle endurance la capacité de résistance à la fatigue des pièces et des assemblages. Ainsi, d'une façon très générale, il y'aura fatigue toutes les fois que l'on est présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue et qui en fait le danger, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à la résistance à la traction et même à la limite d'élasticité du métal, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois. Les étapes principales de la fatigue des métaux sont :

- L'amorçage de fissure (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau) ;
- La propagation de fissure ;
- La rupture finale ;

Les paramètres souvent utilisés pour prédire le comportement en fatigue et ainsi le nombre de cycles à rupture d'une structure sont :

- L'amplitude de cette sollicitation (chargement ou déformation imposée) ;
- Sa valeur moyenne ;
- Le fini de surface et le milieu dans lequel la structure sera utilisée ;

L'endommagement de fatigue ne dépend que du nombre de cycle à rupture N et non de leur fréquence. En fait, très souvent la fréquence à également un effet. C'est les cas de la fatigue en présence d'effet d'environnement et l'effet de la viscoplasticité à chaud [3].

IV. DIAGRAMME D'ENDURANCE

La courbe de Wöhler traduit l'évolution des nombre de cycles à rupture N en fonction de l'amplitude et de la contrainte appliquée σ_a . Pour un chargement unique (uni axial) en traction, flexion ou torsion, le critère de base est la courbe de Wöhler. Pour une contrainte moyenne ou statique (σ_m) donnée. Pour tracer cette courbe, il faut réaliser des essais qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques (généralement sinusoïdaux), d'amplitude maximale (σ_{max}) et de fréquence constante, et à noter le nombre de cycle au bout duquel la rupture se produit (N).

A chaque éprouvette correspond un point du plan (σ_{max} , N) et à partir d'un lot d'éprouvettes soumises à des contraintes maximales différentes, on obtient une courbe qui a l'allure de celle représentée sur la figure 1.2.

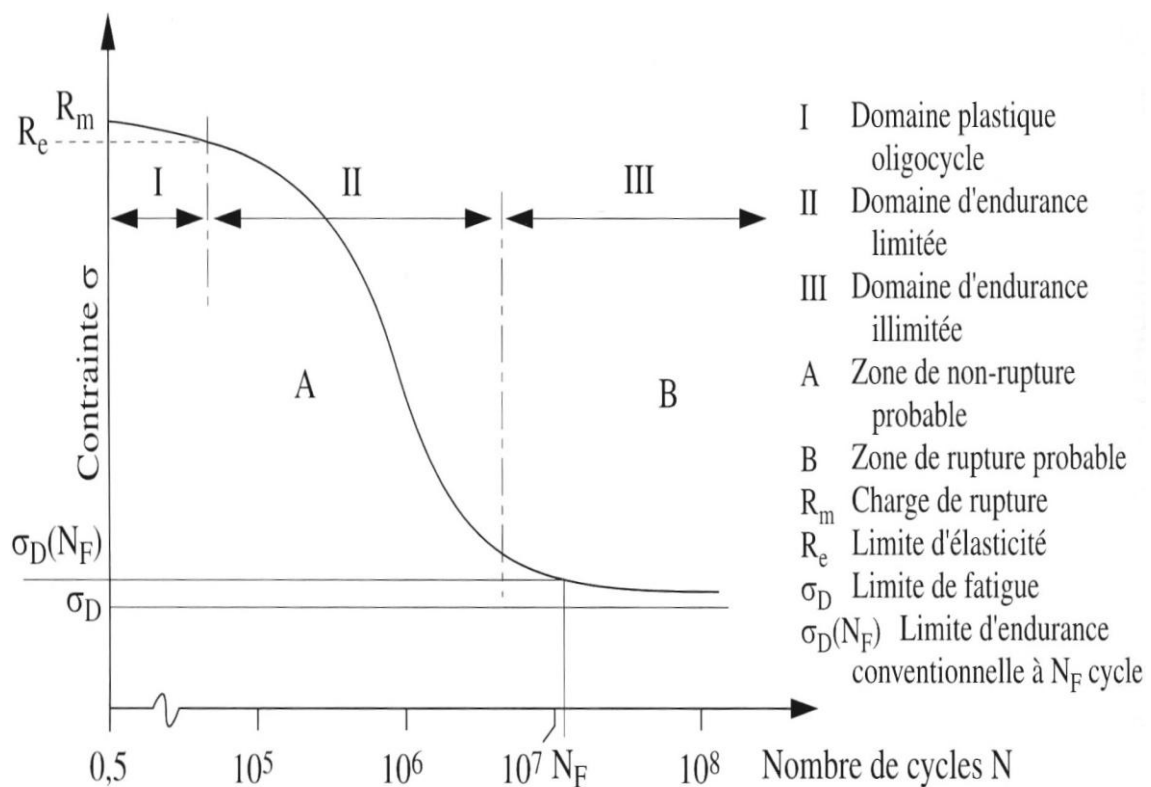


Figure 1.2 : Diagramme d'endurance (courbe de Wöhler) [2].

Sur cette courbe, connue sur le nom de Wöhler, ou courbe S-N (Stress-Number of cycles) ou bien courbe d'endurance, On distingue 3 domaines :

- Une zone de fatigue oligocyclique, sous fortes contraintes, ou la rupture survient après un très petit nombre d'alternances et précédée d'une déformation plastique notable ;
- Une zone de fatigue (ou d'endurance limitée), ou la rupture est atteinte après un nombre de cycles, nombre qui croit quand la contrainte décroît, dans ce domaine la durée de vie varie fortement en fonction du niveau de contrainte appliquée. Il s'étend de 10^4 jusqu'à 10^6 cycles environ, sans apparition de déformation plastique macroscopique appréciable ;
- Une zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité, sous faible contrainte, pour laquelle la rupture ne se produit pas avant un nombre de cycles donné, 10^7 , $3 \cdot 10^7$ et même 10^8 ou 10^9 , supérieur à la durée de vie envisagée pour la pièce.

Lorsque la contrainte devient inférieure à la valeur limite σ_D appelé limite de fatigue et définie ci-dessus, on considère que la durée de vie devient infinie. Cependant, si cette valeur limite est bien marquée dans les cas des aciers avec la présence d'un coude marqué, il n'en va pas de même dans d'autres matériaux tels que les alliages d'aluminium. C'est également le cas en fatigue-corrosion. Dans de tels cas, la limite de fatigue est définie de façon conventionnelle comme le niveau de contrainte ne conduisant pas à la rupture avant un nombre donné de cycles [3].

V. ESTIMATION DE LA FATIGUE

La dispersion des résultats d'essais de fatigue, liée, soit à la nature du matériau, soit aux conditions expérimentales utilisées au cours de l'obtention, nécessite l'utilisation des méthodes d'analyse statistiques appropriées, lors du dépouillement des résultats d'essais [4].

Pour estimer la résistance à la fatigue à N cycles et son écart-type, plusieurs méthodes sont proposées :

- La méthode dite des probits ;
- La méthode de l'escalier ;
- La méthode d'itération ;
- La méthode des K éprouvettes non rompues ;

Ces méthodes sont appliquées avec un nombre d'essai supérieur à quarante.

La méthode de l'escalier et d'itération restent utilisables avec des nombres arbitraires d'essais tandis qu'il faut prévoir au moins soixante à quatre-vingts essais par celle des probits. La méthode de l'escalier conserve l'avantage de la simplicité mais son exécution est rendue très longue par la nécessité d'essayer des éprouvettes les une à la suite des autres. La méthode d'itération a une exécution plus délicate mais moins longue on effectuant les effets par groupe. Ces méthodes requièrent un nombre d'éprouvettes minimal et des conditions des mises en œuvre différentes qui permettent d'obtenir une précision des estimations variables.

De même, la représentation mathématique de la fonction $\sigma_a = f(N)$ a conduit différent auteur a proposés des modèles de plus en plus élaborés. Ces méthodes permettent maintenant le tracé automatique par ordinateur de la courbe de Wöhler ainsi que des courbes d'iso probabilité de rupture. Dans le cas des aciers, une estimation grossière de la limite d'endurance à partir d'un simple essai de traction et souvent nécessaire. Différentes relations empiriques sont proposées.

Le meilleur accord entre valeur expérimentale et valeur calculée est obtenue en reliant la limite d'endurance à la résistance à la traction et à l'allongement à rupture. Par ailleurs, la résistance à la fatigue d'un matériau est modifiée par de nombreux paramètres mécaniques, pour une durée de vie donnée :

- L'augmentation de la contrainte statique réduit l'amplitude de contrainte admissible ;
- La contrainte admissible diminue quand on passe successivement de la flexion à la traction, puis à la torsion ;
- Il convient enfin de noter qu'une norme française, portant sur le traitement statique des données a été publiée récemment ;

VI. NATURE ET ASPECTS DE DISPERSION DES RESULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE

La dispersion des essais de fatigue se traduit par un intervalle relativement important des durées de vie mesurées dans des conditions identiques pour une même amplitude de contrainte. C'est la raison pour laquelle la détermination expérimentale des caractéristiques de fatigue requiert des outils de traitement statistique afin soit d'estimer la résistance à N cycles et l'écart-type correspond, soit de tracer la courbe qui relie l'amplitude σ_a au nombre de cycles à rupture. Les causes de dispersion peuvent se ranger en trois catégories :

- Interne au matériau ;
- Dues ou liée à la préparation des éprouvettes ou pièces ;
- Extérieures à l'éprouvette ;

Dans la première catégorie se situent tous les défauts liés à l'élaboration du matériau (inclusions, retassures, porosités, etc....) qui peuvent constituer des sites préférentiels d'amorçage.

Dans la deuxième catégorie, l'usinage des éprouvettes peut engendrer des différences dans les caractéristiques de surface (écrouissage, contraintes résiduelles, rugosité, etc....), et ainsi modifier les conditions d'amorçage.

La troisième catégorie recouvre tous les facteurs liés au montage de l'éprouvette (défaut d'alignement par exemple) et les facteurs liés à l'environnement qui ne sont pas toujours parfaitement maîtrisés [4].

VII. LES FACTEURS QUI INFLUENT LE COMPORTEMENT EN FATIGUE

On peut dire que la durée de vie d'une pièce mécanique ou d'un élément de structure dépend de plusieurs facteurs compétitifs qui entraînent la fissuration de cet élément. D'une part, l'existence des concentrations locales de contrainte provoquent l'endommagement progressif du métal. Ces concentrations entraînent des déformations plastiques, et de l'irréversibilité des glissements au cours des cycles successifs. D'autre part, la modification du régime des contraintes internes par relaxation consécutive à la déformation plastique localisée qui provoque la disparition des pointes de contraintes, c'est-à-dire l'adaptation, puis la modification des propriétés

du métal, qui le rend plus apte à supporter des effets cycliques, par la consolidation liée à l'érouissage et par le durcissement qu'entraîne le vieillissement du métal écroui ce qu'on appelle l'accommodation et tous les facteurs qui agissent sur ces phénomènes ont une influence sur l'endurance des pièces mécaniques [4].

Ils existent plusieurs facteurs qui influent sur la durée de vie des éléments de structure et on peut les ranger dans quatre catégories qui sont :

- Les facteurs métallurgiques ;
- Les conditions de sollicitation ;
- Les facteurs géométriques ;
- Les conditions de surface ;

Dans le cas des pièces usinées et de leur tenue en fatigue mécanique à grand nombre de cycles, les caractéristiques étudiées seront la géométrie, les contraintes résiduelles ainsi que l'érouissage et la microstructure.

VII.1. Facteurs métallurgiques

Pour cette catégorie, on peut citer tous les facteurs qui constituent la pièce mécanique, à son élaboration et à son mise en forme, ainsi qu'aux traitements thermiques subis par la pièce.

Les possibilités de déformation sous efforts cycliques, ainsi que la capacité d'accommodation du métal et sa sensibilité à l'effet d'entaille. Celles-ci peuvent être liées, en première approximation, aux caractéristiques mécaniques, tandis que la présence des défauts internes introduit des possibilités de concentrations locales de contraintes qui vont diminuer la durée de vie des pièces. Ces possibilités de déformation et la capacité d'accommodation dépendent de tous ces facteurs qui constituent l'élément de structure. Lorsque les inclusions sont assez grosses, ils sont toujours à l'origine des fissures d'après les observations réalisées sur des éléments de structures rompues en fatigue.

De façon générale, la résistance à la fatigue dépend de la quantité, de la taille, de la nature et de la répartition des inclusions, ainsi que de leur forme par rapport à la direction des efforts. L'influence des inclusions est attribuée à la concentration locale de contrainte qu'elles provoquent par leur manque de plasticité, et qui peut conduire à

la formation des microfissures, supprimant ainsi la phase d'amorçage. Par contre, leur influence sera d'autant plus grande que la sensibilité à l'effet d'entaille du métal sera plus forte. En conséquence, si on cherche une durée de vie plus élevée, il faut que les métaux soient plus propres.

VII.2. Conditions de sollicitation

A. Nature des efforts

Les gradients de contraintes à travers la section la plus chargée seront différents selon la nature des efforts appliqués pour une même éprouvette essayée sous une même amplitude de la contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température. Pour des efforts axiaux, traction ou compression, les contraintes sont uniformes dans la section, tandis qu'en flexion ou en torsion elles sont maximales en surface et nulles au centre, sur la fibre neutre. Ces différences de gradient qui entraînent des variations importantes dans le volume du métal déformé conduisent à des différences de limite d'endurance σ_D qui décroît de la flexion à la traction, compression puis à la torsion [4].

B. Effet de surcharge et de sous charge

Une charge temporaire peut conduire à dépasser localement la charge de rupture du matériau et produire un endommagement irréversible sous forme d'une fissure.

Celles-ci pourront se propager ensuite, sous l'effet de la concentration de contrainte qu'elle provoque à son extrémité, même sous une contrainte moyenne, qui autrement ne conduirait pas à rupture : c'est l'effet de surcharge (overstressing).

Ainsi, l'effet de sous-charge est de mettre le matériau sous des contraintes périodiques inférieures à sa limite d'endurance, on peut avoir localement des micro-déformations plastiques, qui relâcheront les concentrations de contraintes et écrouiront le matériau, le rendant apte à supporter des contraintes plus élevées. Pour les matériaux très adaptables, permet de relever la limite d'endurance de façon sensible (10 à 20%) [4].

C. Les contraintes résiduelles

La prise en compte des contraintes résiduelles est essentielle pour de nombreux cas en fatigue. Ainsi l'introduction de contraintes résiduelles de traction dans une pièce peut avoir des conséquences désastreuses sur la tenue en fatigue.

A l'inverse, des contraintes résiduelles de compression introduites volontairement peuvent améliorer substantiellement la résistance à la fatigue. Les contraintes résiduelles affectent également d'autres propriétés (corrosion, sous contrainte, etc...).

Par définition, les contraintes résiduelles se rapportent à une distribution de contraintes, présentes dans une structure, ou une tôle, sans charge externe appliquée. L'origine de la terminologie (résiduelle) s'explique par le fait qu'une distribution de telle contrainte constitue le résidu laissé par des déformations plastiques hétérogènes. En regard des charges extérieures, les contraintes résiduelles sont parfois appelées contraintes internes.

Des contraintes résiduelles de traction et de compression se produisent toujours simultanément sans charge extérieures, un champ de contraintes résiduelles en compression est compensé par un champ de contraintes résiduelles en traction car la distribution globale de contraintes satisfait à un état d'équilibre.

Une charge extérieure σ_{ext} appliquée introduit une distribution de contrainte en accord avec la géométrie. Si le comportement demeure élastique, le matériau subit la somme des distributions internes σ_{int} et externe σ_{ext} :

$$\sigma = \sigma_{ext} + \sigma_{int} \quad (1.2)$$

Dans le cas d'un chargement cyclique, la composante σ_{ext} au sein du matériau est la somme de la contrainte alterné σ_a et de la contrainte moyenne σ_m , la contrainte interne σ_{int} reste quand à elle inchangée. Elle ne modifie pas la valeur de l'amplitude de contrainte σ_a mais décale la valeur de la contrainte moyenne σ_m , de sorte que :

$$\sigma_a = \sigma_{a, ext} \quad (1.3)$$

$$\sigma_m = \sigma_{m, ext} + \sigma_{int} \quad (1.4)$$

Si la contrainte interne σ_{int} est positive, la contrainte moyenne σ_m augmente, ce qui engendre un effet néfaste sur la tenue en fatigue. Si à l'inverse la contrainte interne σ_{int} est négative, la valeur de σ_m diminue, ce qui induit un gain en durée de vie.

L'intensité des contraintes résiduelles peut être élevée, de sorte que, dans le cas de contraintes de compression, la valeur de σ_{max} se trouve fortement abaissée. Cependant, comme l'amplitude de contrainte σ_a n'est pas affectée, les glissements cristallins sont toujours possible et des fissures peuvent s'amorcer en surface. Cependant, si la valeur de σ_{max} devient négative, même dans le cas d'un chargement global en traction ondulée, ces microfissures pourront ne pas se propager.

Le cadre décrit ci-dessus se rapporte à des macro-distributions. A une échelle plus fine, on rencontre d'autre type de contraintes résiduelles. Celles-ci varient d'un grain à l'autre, voire au sein d'un même grain (au sein de lignes de glissement par exemple). Elle explique par ailleurs l'effet Bauschinger. Les équations d'équilibre s'appliquent également pour ces micro-contraintes.

On distingue donc :

- Les contraintes de 1^{er} ordre qui provoquent des déformations macroscopiques ;
- Les contraintes du 2^{ème} ordre qui engendrent des déformations à l'échelle du grain ;
- Les contraintes de 3^{ème} ordre qui agissent au niveau du réseau cristallin ;

Ce sont les premières qui intéressent principalement l'ingénieur puisqu'elles conditionnent le comportement de la pièce. Toutefois, Les autres types de contraintes ont également susceptibles de modifier les mécanismes d'amorçage.

➤ Sources des contraintes résiduelles

Les sources des contraintes résiduelles sont multiples. Les principales sont ci-dessous :

1) Gradient de déformation plastique, notamment autour des entailles

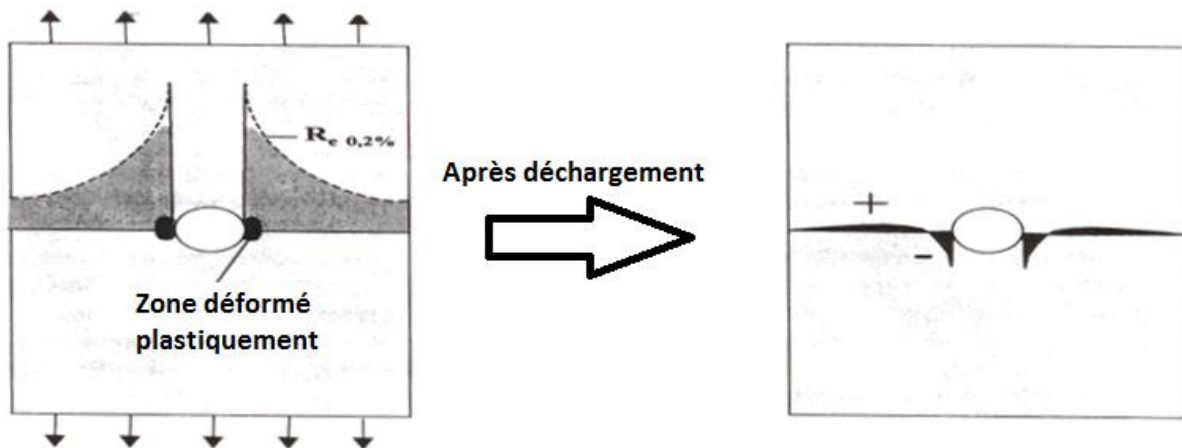


Figure 1.3 : Contraintes résiduelles dans une plaque au voisinage d'un trou [2].

Dans cette figure qui représente un exemple d'un trou dans une plaque sous contraintes. Quand la contrainte dépasse la limite d'élasticité, une zone plastifiée est créée. Après déchargement, cette zone déformée va se retrouver en compression car elle ne peut s'insérer sans contraintes dans le matériau élastique l'entourant. Un champ de contrainte résiduelles en compression est ainsi créée en fond d'entaille qui constitue le point critique pour l'amorçage de fissure de fatigue, compensé par un champ en traction loin de l'entaille. L'effet de contrainte de compression en fond d'entaille peut être significatif.

2) Procédé d'élaboration

On peut dire que les déformations plastiques qui génèrent un champ de contraintes résiduelles au sein de matériau sont dues à la mise en forme des pièces par formage à froid, laminage, etc.... . De même, l'usinage correspond à l'enlèvement de matière assimilable à un processus de rupture. Comme un tel processus implique des déformations plastiques, des contraintes résiduelles importantes dans une fine couche de surface peuvent apparaître en fonction d'un certain nombre de paramètres (outil, profondeur de coupe). Ces effets sont illustrés dans le tableau 1.2 :

Tableau 1.2 : Influence des conditions d'usinage sur l'endurance d'un acier XC48 à l'état recuit [2].

Etat de surface	Paramètres d'usinage		Contraintes résiduelles des surfaces superficielles	Rugosité (µm)	Limite d'endurance (MPa)	
	Après recuit à 60°C	Avance (mm/tr)			Sans Recuit	Après
Poli	0.1		-200	0.6	270	250
Tourné	0.5	0.16	+100	17	215	240
Tourné	0.5	0.32	+200	27	190	220
Tourné	0.5	0.50	+600	46	175	205

On constate que les paramètres d'usinage influencent à la fois l'intensité des contraintes résiduelles et la rugosité de surface. Cependant, il n'est pas aisé d'évaluer la contribution respective de chacun de ces facteurs puisque les surfaces les plus rugueuses sont également celles où interviennent les plus fortes contraintes résiduelles en traction. Après un recuit permettent d'éliminer totalement ou partiellement l'effet des contraintes résiduelles, la diminution de la limite d'endurance se corrèle au niveau de rugosité.

3) Les traitements de surface (Grenailage, galetage)

Le grenailage de précontrainte est un procédé largement utilisé pour introduire des contraintes résiduelles bénéfiques à la tenue en fatigue d'une pièce. La surface de cette pièce est soumise à des chocs répétés de billes d'acier très dur. La perte de stabilité dimensionnelle induite peut être limitée par un grenailage symétrique.

Le galetage constitue un autre procédé de traitement. Il peut être appliqué localement, notamment à une zone entaillée. La déformation plastique superficielle est produite en appliquant une force sur un galet qui roule sur la pièce ébauchée. Après décharge, des contraintes de compression apparaissent. L'amélioration de la tenue en fatigue d'un

vilebrequin induite par un tel procédé est représentée sur la figure 1.4. Cet effet bénéfique est souvent encore plus marqué en fatigue-corrosion.

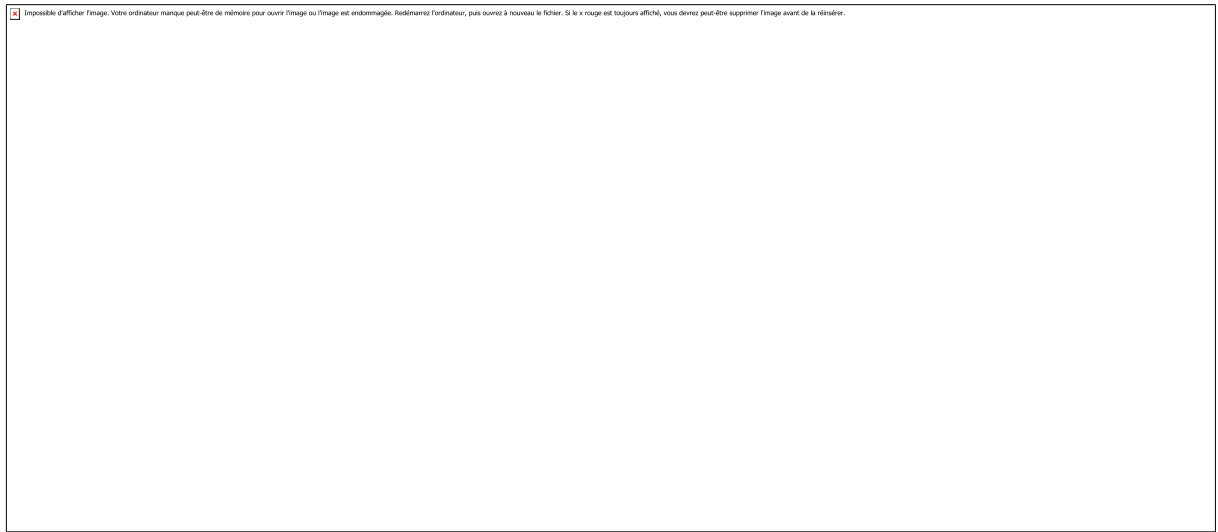


Figure 1.4 : Influence de galetage sur la fatigue d'un vilebrequin automobile (essais tenue en CETIM) [2].

4) Traitement thermique

Les opérations de trempe impliquent un refroidissement brutal en surface et plus lent à cœur. Cette différence de vitesse de refroidissement est à l'origine de contraintes thermiques au sein de la pièce. Comme à haute température, la limite d'élasticité est plus basse, ces contraintes peuvent engendrer des déformations plastiques. Des contraintes résiduelles sont donc introduites dans la pièce.

Pour des pièces de géométrie complexe, le champ de contrainte est difficile à prédire. Des contraintes de traction peuvent être créées en surface. On peut les réduire ou les éliminer par grenailage.

5) Assemblage

Les trous expansés sont utilisés pour améliorer la résistance en fatigue des pièces trouées. Le trou est percé avec un diamètre légèrement inférieur à la cote définitive. Une goupille est emmanchée à force dans le trou, ce qui engendre des déformations plastiques autour du trou. Il s'ensuit que le matériau élastique autour de cette zone déformée exerce une pression sur celle-ci (tableau 1.2). Cette méthode est très efficace car les contraintes engendrées sont importantes.

Une situation analogue aux précédentes est constituée par les structures assemblées par boulonnage par exemple. Les contraintes résiduelles dépendent notamment des tolérances dimensionnelles des constituants.

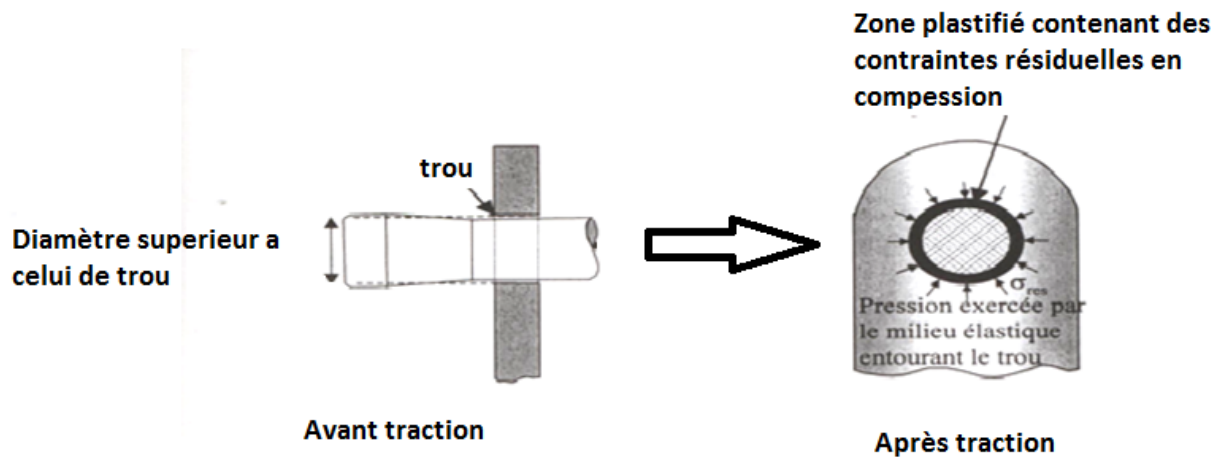


Figure 1.5 : Contraintes résiduelles autour d'un trou élargi [2].

➤ Élimination des contraintes résiduelles

On peut chercher à éliminer les contraintes résiduelles lorsqu'elles sont néfastes ou qu'elles entraînent des variations dimensionnelles de la pièce.

Un traitement thermique peut éliminer les contraintes internes, notamment en cas de recristallisation. Les déformations plastiques à l'origine de ces contraintes impliquent des densités de dislocations élevées. Durant un traitement à haute température, la recristallisation détruit la structure de dislocation et diminue la densité de dislocation, et par conséquent conduit à des niveaux de contraintes plus faibles. Un recuit à plus faible température, n'engendrant pas de recristallisation et appelé recuit de restauration modifie également les structures de dislocations. L'inconvénient est que de tels traitements peuvent affecter les propriétés initiales de matériau, obtenues précisément par traitement thermique. Un autre moyen d'éliminer les contraintes internes consiste à étirer le matériau. C'est la technique utilisée pour les tôles d'aluminium.

D. Influence de la fréquence et du milieu ambiant

La fréquence de sollicitation peut influencer la tenue en fatigue par l'intermédiaire de la vitesse de déformation et d'une modification des mécanismes de déformations

cycliques, mais aussi par le biais de processus physico-chimique de surface lorsque le matériau est sollicité dans un environnement actif. Ainsi, une fréquence élevée peut entraîner des durées de vie plus longues diminuant l'action de milieu ambiant.

En effet, il est établi que tous les métaux, à l'exception de l'or, ont une durée de vie plus grande sous vide qu'à l'air ambiant ou sous toute autre atmosphère corrosive.

La figure 1.6 illustre ce phénomène dans le cas d'un alliage d'aluminium. Les essais de laboratoire étant accéléré par rapport aux durées de vie des structures, il convient de prendre en compte ces effets pour extrapoler les résultats de ces essais aux très longues durées de vie.

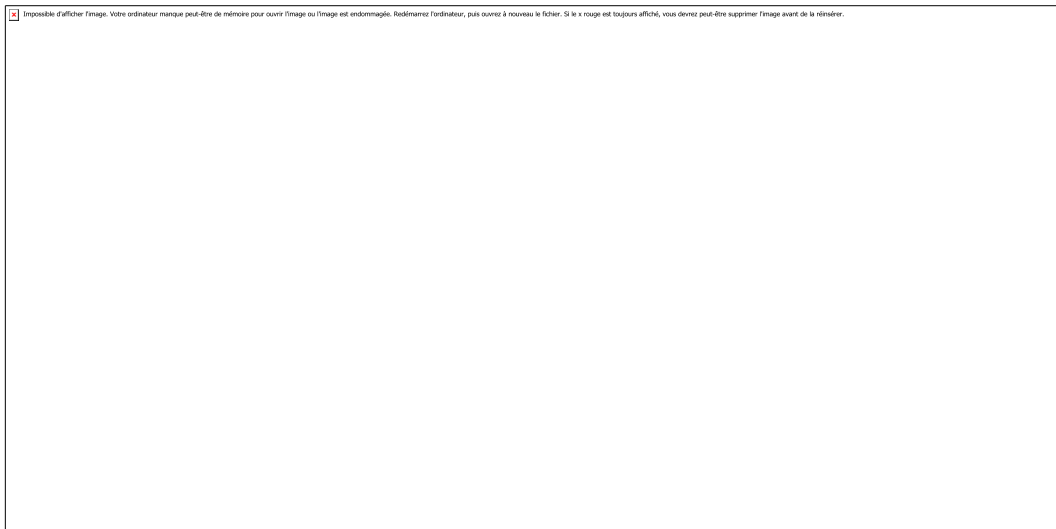


Figure 1.6 : Influence de l'environnement sur la durée de vie d'un alliage d'aluminium AU4G [2].

E. Influence de l'environnement

➤ Influence de la température

La température interagit avec le processus de fatigue par l'intermédiaire des propriétés du comportement élasto-plastique. Il convient cependant de découpler ces effets d'une possible action de la température par l'intermédiaire de processus d'oxydation par exemple. Par ailleurs, des interactions entre l'endommagement par fatigue et l'endommagement par fluage ne sont pas non plus à exclure [4].

➤ Fatigue sous corrosion

Pour les pièces qui travaillent sous des conditions agressives, la fatigue-corrosion est analogue, et aussi pernicieuse, que la fatigue et la corrosion par piqûres ou sous contrainte.

A titre d'exemple, les eaux salées, les divers milieux acides ou salins de l'industrie chimique dont l'agressivité est insuffisante pour causer une forte corrosion générale, permettant ainsi l'apparition de corrosion localisée sous forme de fissuration.

On ne peut manquer d'être frappé par les analogies assez étroites, du moins en apparences, qui existent souvent entre les fissurations de fatigue corrosion et celles de corrosion sous contraintes, ou encore entre la fatigue corrosion et la corrosion par piqûres. Ces analogies ont fortement sollicité l'attention des chercheurs qui se sont intéressés à des divers phénomènes, si bien qu'il semble actuellement presque impossible d'étudier de façon isolée l'un des trois phénomènes, en négligeant leurs analogies et leurs interactions. Pour supprimer la fissuration du milieu corrosif, de nombreux moyens ont été essayés, par exemple, l'utilisation d'un acier inattaquable dans le milieu considéré, l'exécution d'un revêtement protecteur, une modification de la composition superficielle, l'usage des inhibiteurs de corrosion, le développement superficielles de compression (grenailage) etc.

VII.3. Facteurs géométriques

L'influence de ces facteurs intervient par l'effet d'échelle c'est-à-dire la dimension des pièces et aussi par leurs effets d'entaille (la forme). Pour certain cas, on peut déterminer le coefficient de concentration de contrainte théorique élastique K_{th} , correspondant à une de ces formes lorsqu'elles figurent dans les tables calculées pour les différents modes de sollicitations, mais pour des déformations élastiques. Comme on peut aussi le déterminer par des méthodes d'extensomètre (expérimentales : photoélasticité, jauge à résistance). Ensuite, il faut connaître la sensibilité à l'effet d'entaille du matériau considéré que l'on représente par :

$$Q = K_f - 1 / K_t - 1 \quad (1.5)$$

Le coefficient expérimental K_f est le rapport des limites d'endurance sur éprouvettes lisses et sur éprouvettes entaillées. Ce coefficient est toujours inférieur à K_{th} , pour des 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.

VII.4. Conditions de surface

La naissance des fissures de fatigue prennent le plus souvent dans les couches superficielles. Donc pour améliorer l'endurance des pièces, il convient de relever dans la mesure du possible celles des couches superficielles en jouant soit sur la nature du métal, soit par la résistance des couches superficielles par des traitements de durcissement et le développement de précontraintes de signe favorable.

A. Influence de la nature de surface

En premier lieu, il convient de s'opposer à un adoucissement de la surface des pièces par rapport au métal du cœur. Dans le cas des aciers, cet adoucissement est le plus souvent la conséquence d'une décarburation se produisant lors d'un traitement thermique effectué en atmosphère oxydante. Il en résulte une baisse de l'endurance de la couche superficielle dont la limite est alors celle d'un acier à bas carbone. Cet abaissement permettra la formation de fissures qui se propageront dans toute la pièce pour des contraintes inférieures à la limite d'endurance du métal non décarburé, non entaillé. En second lieu, on peut améliorer la résistance des couches superficielles c'est-à-dire leurs endurance, on utilisant par exemple la cémentation.

En général, les procédés du durcissement superficiels sont utilisables pour améliorer l'endurance des pièces mécaniques, mais leur action est inséparable de celle des précontraintes développées dans les pièces par ces procédés [4].

B. Influence de la micro- géométrie de la surface

Les irrégularités de surface se comportent comme des micro-entailles qui provoquent des concentrations de contraintes dans les couches superficielles les plus chargées.

L'expérience a montré que ces concentrations peuvent atteindre un niveau suffisant pour amorcer la fissuration par fatigue et diminuer sensiblement la durée de vie des

pièces. En pratique, on ne peut pas séparer le degré de fini obtenu du procédé d'usinage employé donc des contraintes résiduelles laissées dans le métal par ces divers procédés. On peut cependant dire que plus la micro-géométrie de la surface est fine, meilleure est l'endurance. Il faut cependant tendre vers le meilleur état de fini tout en créant pas des contraintes résiduelles défavorables, par exemple des contraintes de tension qui accompagnant une rectification sévère. Il est nécessaire d'y parvenir avec le moins contraintes de tension ou avec des contraintes de compression (polissage mécanique).

C'est pour cette raison que le polissage mécanique est en général plus favorable que le polissage électrolytique qui donne un meilleur état de surface mais pas de précontrainte favorable et qui laisse parfois des microfissures [4].

VIII. CONCLUSION

Donc on peut dire que l'état de surface joue un grand rôle dans la tenue en fatigue des pièces et des assemblages mécaniques, c'est pour cela qu'il faut bien maîtriser les paramètres qui influent sur l'état de surface c'est-à-dire les paramètres de coupe ou d'usinage afin d'obtenir une surface fini en diminuant le maximum le taux des défauts.

C'est pour cette raison on est conduit à la détermination la relation entre les paramètres de coupe et la nouvelle surface puisqu'elle lie ces paramètres à l'endommagement par fatigue.

CHAPITRE II

I. INTRODUCTION

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, et c'est ainsi qu'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 des 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, écrouissage, 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, c'est pour cette raison qu'il faut maîtriser les paramètres de chaque procédé d'usinage ainsi que les paramètres qui définissent l'état de surface.

II. LES PARAMETRES DE COUPE

Pour obtenir une pièce mécanique, il existe plusieurs techniques pour transformation de matière brute. L'obtention de cet élément de structure nécessite parfois l'utilisation de différents procédés de fabrication qui font partie de la construction mécanique.

Il existe plusieurs méthodes pour avoir une pièce selon les formes désirées qui sont :

- Obtention par enlèvement de matière
- Obtention par déformation
- Obtention par fusion
- Obtention par assemblage

Pour avoir une grande précision, on usine les pièces mécaniques par enlèvement de matière sous forme de copeau à l'aide d'une machine-outil. L'enlèvement des copeaux est obtenu par la coupe du matériau constitutif de la pièce. La coupe s'opère par le déplacement d'un outil de coupe en interférence avec la pièce. Toutefois, l'ajustage réalisé à la lime ne constitue pas proprement parler à un usinage. L'usinage requiert l'usage d'une machine-outil qui génère de façon autonome les mouvements relatifs pièce-outil en garantissant leur précision ainsi que la puissance mécanique nécessaire à la coupe. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil :

- Le mouvement de coupe (vitesse de coupe) ;
- Le mouvement d'avance (vitesse d'avance) ;

L'usinage peut être fait soit avec une machine conventionnelle ou à la machine à commande numérique (CN). Il peut être fait soit en usinage classique ou en grande vitesse (UGV).

Afin d'obtenir une bonne qualité des pièces usinées, il faut avoir un état de surface sans défauts (inclusions) pour résister aux efforts appliqués sur la surface de l'élément.

C'est pour cela la domination des conditions de coupe est obligatoire pour chaque technicien puisque la durée de vie des pièces dépendent de l'état de surface. Les paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe) sont choisis en fonction des caractéristiques mécaniques de la matière à usiner et de l'outil. Ils sont indépendants de la machine utilisée et des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil.

Un autre paramètre de coupe peut également être considéré : la lubrification. Classiquement, un fluide de coupe arrose la pièce. Ce fluide a pour but de faciliter l'évacuation des copeaux (de la zone d'usinage et de la machine), de lubrifier l'interface outil/pièce et outil/copeau et d'assurer la stabilisation thermique de la coupe. Cependant pour des considérations économiques et écologiques, l'utilisation de ces fluides de coupe est remise en question. Ces dernières années les techniques d'usinage à sec ou de micro-lubrification se développent.

II.1. La vitesse de coupe (V_c)

➤ Définition

On appelle Vitesse de coupe la distance relative parcourue par un point de l'outil par rapport à la pièce en un temps donné.

Elle correspond généralement au mouvement le plus rapide.

Sa valeur est déterminée expérimentalement et résulte d'un compromis lié notamment au coût de l'outil, au coût du changement d'outil, et au coût d'utilisation de la machine.

Unité : V_c en m/min.

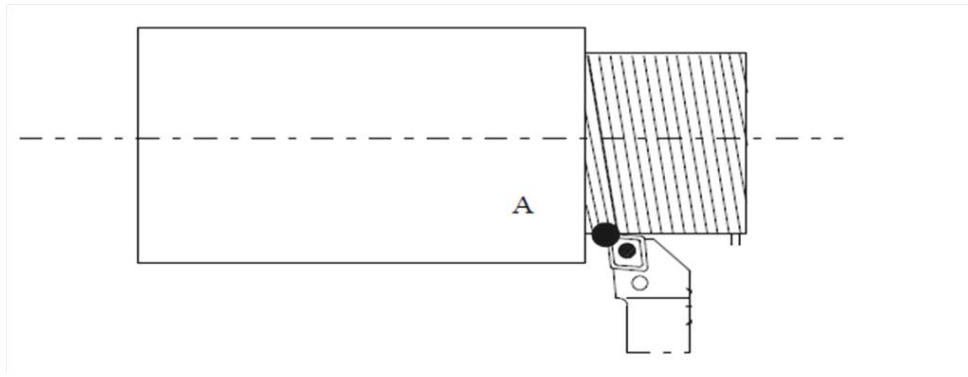


Figure 2.7 : Vitesse de coupe d'un outil de tournage [4].

Chaque fois que la pièce fait un tour, la distance parcourue par l'outil par rapport à la pièce (au point A) est égale à la circonférence : $\pi \times D$.

En 1 minute, l'outil a parcouru « n » tours, la vitesse à laquelle l'outil de coupe sera donc « n » fois la circonférence, d'où :

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1} = \pi \times D \times n \quad (2.6)$$

La vitesse de coupe est choisie en fonction de divers paramètres qui concernent principalement :

- La matière de la pièce
- La matière de l'outil
- La puissance de la machine
- Les conditions de lubrification
- Le type d'opération d'usinage (chariotage, surfaçage, perçage, etc.).

II.2. La vitesse d'avance (V_f)

➤ Définition

Elle exprime le déplacement relatif rectiligne, d'une dent de l'outil, en 1 tour par rapport à la pièce. Elle détermine l'état de surface obtenu et le temps d'usinage. Elle est

définie sur le Contrat de phase. En général, on choisit pour l'usinage ébauche: 0.1 à 0.2 pour l'usinage finition : 0.05 à 0.1.

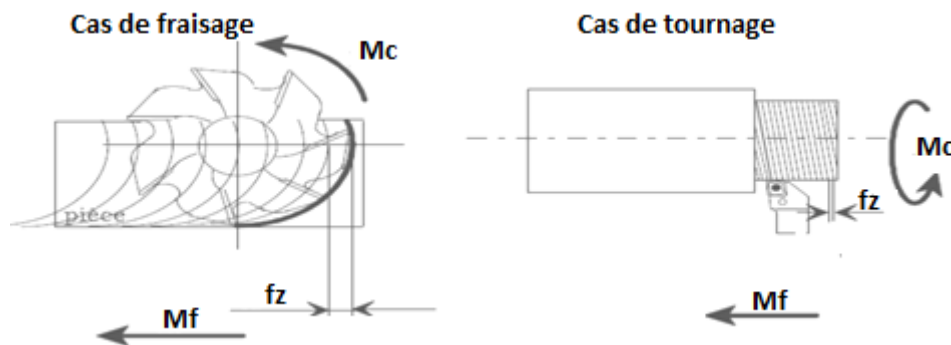


Figure 2.8 : Détermination de la vitesse d'avance à régler sur la machine [4].

Elle correspond à la vitesse de déplacement la plus lente. La trajectoire du mouvement d'avance associé au mouvement de coupe usine la forme souhaitée.

Unité : V_f mm/tr ou mm/dent.

Sa valeur sera déterminante pour la rugosité de la surface usinée.

II.3. La profondeur de passe (a_p)

➤ Définition

La profondeur de passe a_p dépend de la nature de l'opération (ébauche ou finition). La profondeur de passe a_p ne doit pas être inférieure au copeau minimum. La valeur maximum de a_p dépend de la rigidité de l'outil et de la puissance de la machine outil.

La combinaison de V_f et V_c a permet de déterminer le volume du copeau. La profondeur de passe est nécessaire afin de déterminer la quantité de matière qui va être séparée de la pièce sous forme de copeau [4].

Unité : a_p en mm.

Le choix se fait en fonction de la surépaisseur de métal à enlever, les limites sont déterminées par :

➤ Limite maximum

- Puissance de la machine ;

- Rigidité de la pièce et de l'outil ;
- Nature du matériau à usiner ;

➤ Taille de copeau minimum

- Finesse de l'arête tranchante ;
- Forme du bec de l'outil ;
- Nature du matériau et état de la machine ;

III. L'ETAT DE SURFACE

En mécanique, l'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées.

La structure superficielle lors de l'usinage des métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération.

L'état de surface a une influence considérable sur la tenue en fatigue, notamment dans la phase d'amorçage. Afin de caractériser les états de surface, trois paramètres sont généralement retenus :

- géométrique : la rugosité
- mécanique : les contraintes résiduelles
- métallurgique : l'écrouissage de la surface

En général, les propriétés géométriques, mécaniques et métallurgiques des éprouvettes servant à obtenir les données de base du comportement en fatigue ne sont pas strictement identiques à celles des pièces produites. La démarche ingénieur classique est de prendre en compte ces écarts en modifiant la limite d'endurance de référence par un facteur de réduction K_s :

$$K_s = \sigma_{DS} / \sigma_D \quad (2.7)$$

σ_D : limite de fatigue de l'éprouvette dont l'état de surface est choisi comme référence

σ_{DS} : limite de fatigue de l'éprouvette donnée avec un certain état de surface

K_s est le produit des facteurs de réduction relatifs à l'influence de la rugosité, des contraintes résiduelles et de la microstructure. La connaissance de l'influence de chacun de ces facteurs sur la tenue en fatigue est donc primordiale. Pourtant, les influences de ces facteurs sur le comportement en fatigue ne sont pas faciles à séparer. Cela entraîne l'inexistence de lois générales couvrant différents matériaux et types de chargements. La structure représentée sur la figure 2.9 est définie par les critères suivants:

- **La rugosité R:** exprime les plus petites irrégularités, c.-à-d. le fin réseau d'écartés micro géométriques mesurés sur la plus petite longueur d'échantillonnage. La cotation des états de surface fait essentiellement référence à l'usinage par enlèvement de matière.
- **L'ondulation W:** est constituée d'irrégularités de plus grandes dimensions au niveau suivant de la longueur d'évaluation sur la surface de la pièce.
- **La direction des traces d'usinage L :** définit l'orientation du profil superficiel. Elle indique la direction dominante générée par la méthode d'usinage.

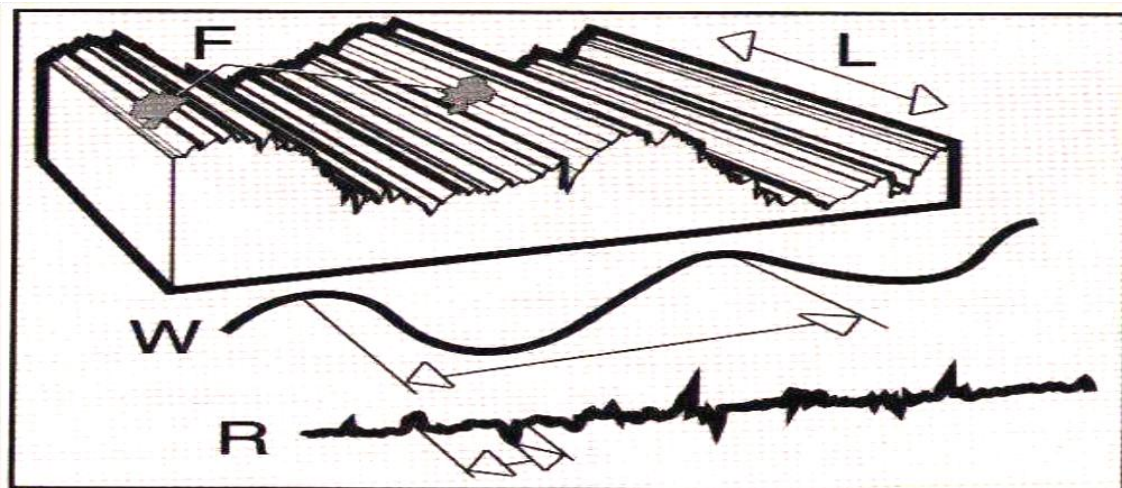


Figure 2.9 : Définition des critères de l'état de surface [17].

III.1. La rugosité de surface

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'obtentions, aux outils, à la matière, etc. Le rôle

fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication.

Il existe un grand nombre de paramètres pour la définition de la rugosité, certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres :

➤ R_a : rugosité moyenne du profil

- Valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite, dans la longueur d'évaluation, indifféremment de la direction verticale ;
- Impossible de savoir si les écarts sont des creux ou des bosses ;
- Pas d'altération pas des écarts isolés, donc risque de manquer un sommet important ou une rayure ;
- Valeur de R_a typiques entre $0.02\mu\text{m}$ et $3.5\mu\text{m}$;

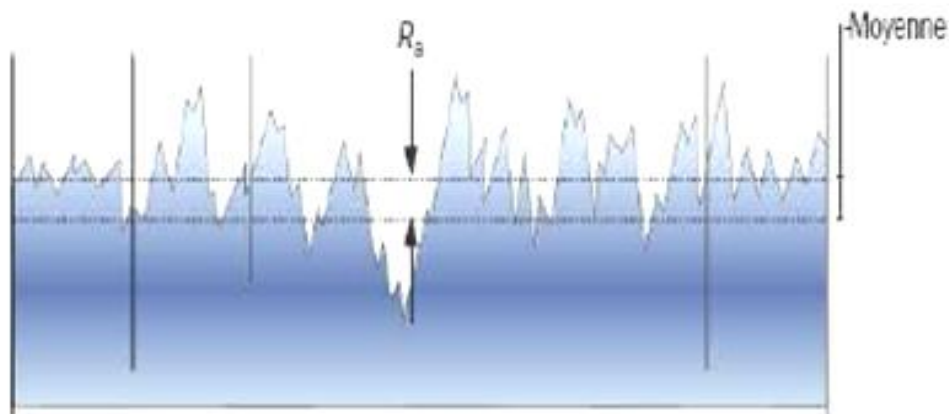


Figure 2.10 : Evaluation de l'écart arithmétique moyen du profil évalué (R_a) [17].

➤ R_z : hauteur de profil maximum

C'est la moyenne des différentes hauteurs de profil entre la hauteur de crête la plus élevée et la profondeur de creux la plus importante sur des longueurs de référence comprises dans la longueur d'évaluation.

- Il y a couramment 5 longueurs de référence ;
- La valeur affichant la plus grande déviation dans la longueur de référence = R_{max}
ou $R_{z \text{ max}}$:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^n R_{zi}}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (2.6)$$

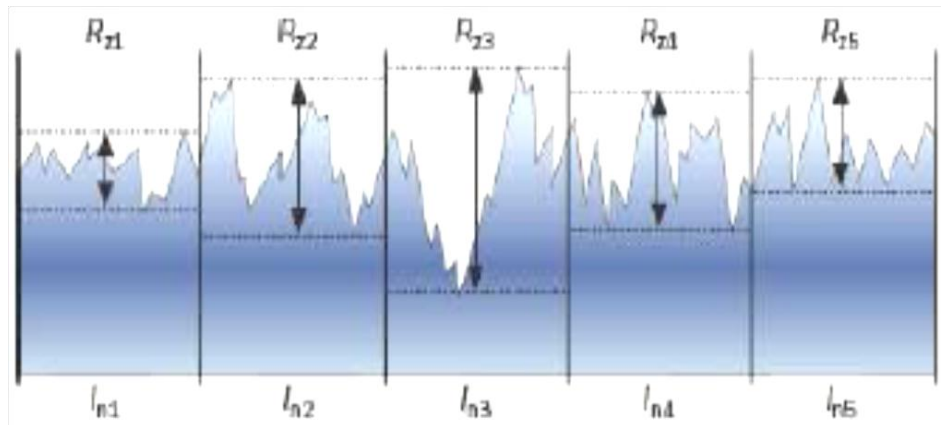


Figure 2.11 : Evaluation de la hauteur de profil maximum (R_z) [17].

➤ R_t : hauteur de profil total

C'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation.

- Une seule valeur R_t , non combiné à un R_z ou R_a est l'une des exigences les plus strictes du profil R .

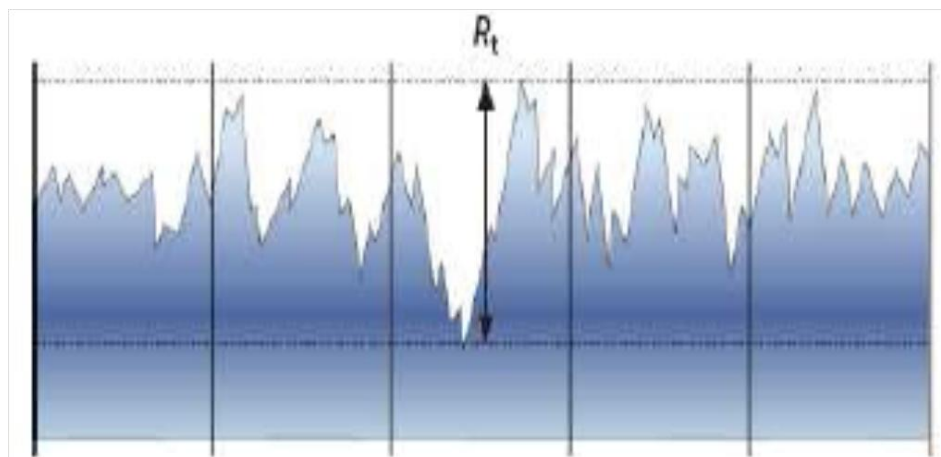


Figure 2.12 : Evaluation de la hauteur de profil total (R_t) [17].

III.2. Modélisation de l'influence de la rugosité sur la tenue en fatigue

De nombreux auteurs ont déjà proposé des modèles pour estimer la durée de vie en fatigue en tenant compte de la rugosité de surface. Trois approches ont été identifiées :

- Les relations empiriques entre paramètres de rugosité et durée de vie ;
- La rugosité vue comme une fissure ;
- La rugosité vue comme un concentrateur de contrainte ;

A. Relations empiriques entre paramètres de rugosité et durée de vie

Wiesner et al [16] cherchent à caractériser la tenue à la fatigue par un paramètre de rugosité dans le cadre limité du tournage de l'alliage Al-7075. Leur étude a pour objectif de définir le paramètre le plus significatif de la surface tournée et de le corréler avec le comportement en fatigue. Les auteurs proposent une relation faisant intervenir un paramètre topographique de la surface (R_q : moyenne de la racine carrée de la rugosité) via une loi puissance.

Ce modèle donne des résultats intéressants, mais il engendre de fortes limites pour des applications industrielles. En effet, il faut réaliser de nombreux essais de fatigue dès lors que l'on change de matériaux.

B. La rugosité vue comme une fissure

La rugosité de surface est considérée comme un défaut de surface. Il établit une relation empirique qui n'est valide que tant que l'on peut considérer la rugosité comme une fissure, c'est-à-dire pour des rugosités relativement faibles. Dès lors que le rayon de fond de rugosité augmente, le modèle ne s'applique plus. Pour les rugosités de surfaces polies, les solutions sont aussi erronées. Ces limites ont été mises en évidence dans les travaux de Suraratchai [17].

C. La rugosité vue comme un concentrateur de contraintes

L'influence de la rugosité sur la tenue en fatigue peut être considérée sous l'angle des concentrations de contraintes locales qu'elle génère. Dans la littérature, l'effet de la concentration de contrainte générée par la rugosité sur la tenue en fatigue est généralement expliqué par deux classes de modèles :

- Les modèles basés sur l'effet d'entaille ;
- Les modèles basés sur la mécanique de la rupture ;

Les modèles basés sur l'effet d'entaille font intervenir un coefficient empirique appelé le coefficient effectif de concentration de contraintes de fatigue (K_f). Ils classent les limites d'endurance des pièces entaillées en fonction du coefficient de concentration de contrainte de l'entaille (K_t) et de l'indice de sensibilité à l'entaille du matériau (q). Le produit de ce coefficient par la contrainte appliquée permet d'estimer la limite d'endurance d'une pièce entaillée à partir de la limite d'endurance connue de la pièce non entaillée. Les modèles basés sur la mécanique de la rupture sont bâtis sur la théorie de la propagation des fissures. La rugosité des surfaces modifie les contraintes locales qui affectent la propagation des fissures. Ces deux classes de modèles sont basées sur le coefficient de concentration des contraintes local lié à la rugosité.

IV. INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR L'ETAT DE SURFACE

Dans le cas des pièces usinées et de leur tenue en fatigue mécanique à grand nombre de cycles, les caractéristiques étudiées seront la géométrie, les contraintes résiduelles ainsi que l'érouissage et la microstructure (Figure 2.13). Les spécifications liées à des phénomènes chimiques, tribologiques, résistance thermique, optique, écoulement de fluide ou biologiques ne seront pas pris en compte dans cette étude.

L'analyse géométrique d'une surface usinée peut être généralement décrite par des défauts de différents ordres de grandeurs (Figure 2.13). Les défauts du 1^{er} ordre sont souvent dus à la déformation de la pièce pendant l'usinage, la raideur de la structure de la machine ou les défauts de bridage. Les défauts d'ondulation (2^{ème} ordre) sont générés, dans le cas du fraisage, par la géométrie de l'outil et l'engagement radial de la fraise lors des différentes passes d'usinage. Par ailleurs, les défauts d'ordre 3 et 4 correspondent respectivement aux stries et aux arrachements matière et définissent la rugosité selon la norme [NF E 05-017]. La distinction entre stries et arrachements étant difficile sur les profils mesurés dans le cadre de cette étude, les écarts géométriques correspondants seront regroupés dans les défauts d'ordre 3. La pratique usuelle consiste même à utiliser des paramètres de rugosité standards (R_a , R_t et R_z) mesurés sur des profils bruts redressés mais sans chercher à filtrer les défauts d'ordre 2 et

3. Nous parlerons donc de micro géométrie par la suite pour décrire les défauts du 2^{ème} et 3^{ème} ordre. Les zones de mesure seront suffisamment petites pour éviter de mesurer les défauts de forme qui d'ailleurs ne présentent sans doute pas de concentration de contrainte significative et ont donc très peu d'influence sur la fatigue.

Les contraintes résiduelles sont définies comme étant des contraintes multiaxiales statiques qui existent dans une pièce au repos, en l'absence de toutes contraintes externes. Dans un matériau cristallin, il est nécessaire de définir l'échelle d'observation du matériau. En effet, les contraintes résiduelles existent sous trois ordres de grandeurs suivant l'échelle à laquelle on considère le matériau. Ces ordres sont définis suivant que les contraintes sont homogènes sur plusieurs grains (ordre I) à l'échelle macroscopique, à l'intérieur d'un grain (ordre II), c'est-à-dire à une échelle de quelques dizaines de micromètres, ou alors à l'échelle atomique des cristallites (ordre III) donc sur quelques nanomètres. L'analyse des contraintes résiduelles d'un matériau permet d'obtenir l'état de contraintes résultant de la somme des contraintes d'ordre I, II et III. L'érouissage décrit les déformations plastiques permanentes résultant de déplacements relatifs des atomes dus à la présence de défauts ponctuels au niveau cristallin (joints de grains, de macles ou interfaces entre deux phases). Cette distorsion locale du réseau est appelée dislocation. L'érouissage, généralement localisé en surface dans le cas de l'usinage, induit une augmentation de la dureté par rapport à celle du matériau à cœur (Figure 2.13). De plus, les éventuels changements de microstructure se situent également à l'échelle du réseau cristallin. Si la température de coupe générée par l'usinage est très élevée, il peut y avoir modification des grains ou changement de phase en extrême peau ce qui modifie également localement les propriétés mécaniques de la pièce [27].

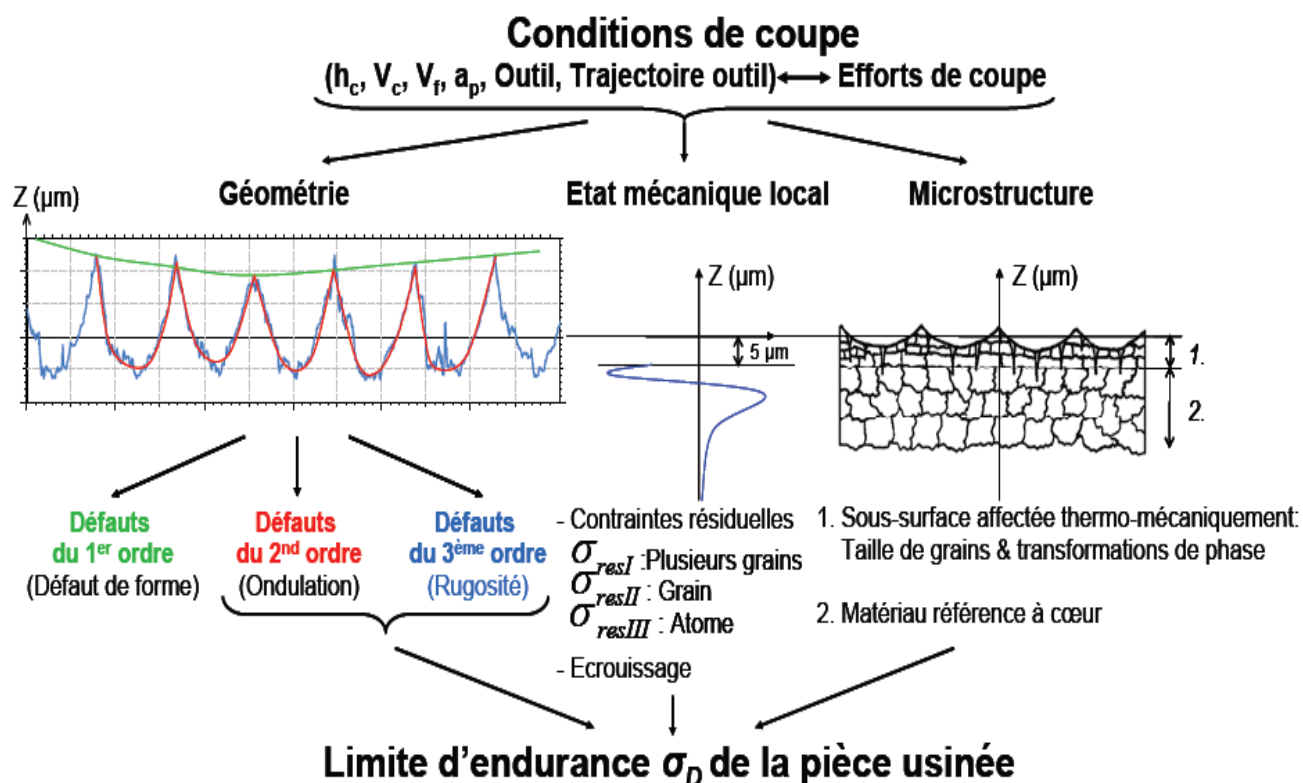


Figure 2.13 : Schéma de l'intégrité de surface pour pièces usinées [27].

Les pièces mécaniques produites par les différents procédés présentent des nuances distinctes dans l'état de leurs surfaces. Ces différences rendent les surfaces obtenues par les différents procédés faciles à être identifiées. Grâce à son caractère unique, l'état de surface obtenu par un procédé quelconque peut être d'ors et déjà comparé à d'autres surfaces obtenues par le même procédé à travers des moyens simples tels que la mesure de la taille moyenne de ses irrégularités en utilisant les normes en vigueur et les techniques modernes de mesure.

Les processus de formation de copeau consistent à enlever de la pièce la matière sous forme de copeau, pour former une nouvelle surface. Ces processus produisent des surfaces de nature différente de celle du métal de base. Plusieurs travaux [18-19] ont étudié l'influence des opérations d'usinage sur la surface des pièces de différents matériaux. Le phénomène est occasionné par la formation de trois zones de déformation plastique:

- La zone primaire selon le plan de cisaillement des copeaux,

- La zone secondaire entre le copeau et la face d'attaque de l'outil
- La zone tertiaire entre la face en dépouille de l'outil et la nouvelle surface usinée d'où la nouvelle surface usinée demeure aussi déformée à une certaine profondeur.

Dans certaines conditions il y a formation d'une arête de coupe rapportée à un caractère instable laissant occasionnellement des débris sur la surface et affectant ainsi l'état de surface.

Les zones de déformation dans le processus de coupe sont d'importance majeure pour les propriétés de la nouvelle surface usinée. Ces zones sont affectées par plusieurs facteurs tels que les conditions de coupe, les caractéristiques géométriques de l'outil, le coefficient de frottement à l'interface copeau/face d'attaque de l'outil et les matériaux de l'ébauche et de l'outil.

L'impact principal sur les surfaces usinées est mécanique, thermique et chimique. A cause des efforts appliqués par l'outil sur le matériau, ce dernier est déformé plastiquement, cette déformation est anisotrope et visuelle aux microscopes. L'impact thermique peut conduire à deux phénomènes, qui sont les transformations plastiques avec ou sans modifications structurelles ou métallographiques [20].

Les transformations plastiques sans modifications structurelles résultent de la distribution non homogène de la température entraînant des contraintes thermiques compressives, qui peuvent dépasser la charge maximale et conduisent à des déformations plastiques dans la couche superficielle. Ce type d'impact sur la surface peut être mis en évidence par la mesure des contraintes résiduelles où la texture et la dureté ne sont pas changées [20]. Les transformations structurelles thermiques, telles que les transformations martensitiques et la recristallisation, peuvent être détectées par les méthodes métallographiques dont le polissage, l'attaque chimique et la visualisation par microscope.

Les principales altérations dans la couche superficielle [18, 21-23] concernent la texture de la surface (rugosité et défauts de surface), le changement de la dureté superficielle (micro dureté), la distribution des contraintes résiduelles, la déformation plastique et les transformations de phase. Les causes principales de toutes ces

altérations sont [22] les hautes températures ainsi que les grands gradients de température, la déformation plastique ainsi que les réactions chimiques et l'absorption chimique dans la nouvelle surface. Ce paramètre peut être varié indépendamment dans un domaine restreint, par un choix judicieux des conditions d'usinage. Le tour permet de réaliser des éprouvettes cylindriques destinées à explorer la fatigue en flexion rotative. Les propriétés fonctionnelles en fatigue des pièces usinées sont très sensibles aux caractéristiques de leurs surfaces et de leur couche superficielle influencée [18,24], car les fissures s'initient généralement dans cette couche. 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. 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. L'influence de la rugosité des surfaces sur le comportement en fatigue des pièces usinées est bien établie [25,26]. Il y'a cependant désagrément concernant le caractère de cette influence et l'hypothèse qui prédit que les surfaces les moins rugueuses donnent la meilleure résistance à la fatigue n'est pas toujours démontrée. Ce qui laisse à penser que d'autres paramètres d'état de surface devraient être considérés.

V. CONCLUSION

L'état de surface est la couche superficielle de la pièce obtenu par usinage, dont la qualité de cette structure influe fortement le comportement en fatigue. Elle est caractérisée par plusieurs caractères (géométrique, mécanique et métallographique).

La rugosité est un paramètre géométrique considérée comme un défaut de surface, à un caractère micrographique ou macrographique. Elle définit l'état de la structure superficielle. Des études ont montré que la rugosité est influencé par les paramètres de coupe, ce qui confirme que le bon choix des ces paramètres est très important puisque les principales modifications de la couche superficielle sont dues aux températures élevées, les grands gradients de température, les déformations plastiques ainsi que les réactions chimiques et l'absorption chimique dans la nouvelle surface.

CHAPITRE III

I. INTRODUCTION

La durée de vie d'une pièce mécanique usinée dépend fortement de son état de surface. C'est par le fait que les couches de surface les plus élevées éprouver et charger sont exposés à des effets sur l'environnement.

Concentration des contraintes, l'oxydation, et la gravure à partir d'éléments en alliage (à hautes températures de fonctionnement) sont les facteurs qui agissent sur les couches superficielles qui contribuent à l'amorce des criques.

L'initiation et la propagation des fissures, dans la plupart des cas, peut être attribuée à l'intégrité de surface produites par usinage.

La surface d'une pièce à deux aspects importants qui doivent être défini et contrôlé :

- Le premier aspect géométrique est l'irrégularité sur la surface, et d'autre part la métallurgie altérations de la surface et la couche superficielle ;
- Le deuxième aspect qui a été appelé intégrité de la surface qui influence la qualité de la surface usinée et de la sous surface, qui à la fois devient extrêmement importante lors de la fabrication des composants structurels qui doivent résister à de fortes contraintes statiques et dynamiques.

Les paramètres de coupe sont reliés à l'endommagement. Afin d'estimer ceux qui sont les plus appropriés, plusieurs travaux ont été menées pour diminuer leur influence sur le produit final (pièce usinée, outil...).

Davim et al. [7] ont réalisé des essais de perçage sur un stratifié carbone/époxy avec trois avances et trois vitesses de coupe (0.25, 0.3 et 0.35mm/tr et 50, 60 et 70m/min respectivement). En étudiant un facteur de délaminage ajusté F_{da} , ils confirment que l'avance f à une influence plus importante sur le délaminage par rapport à la vitesse de coupe en fixant une valeur critique ($V_f = 0,3\text{mm/tr}$) au delà de laquelle ils observent un délaminage important.

Marques et al. [8] ont étudié l'effet des paramètres de coupe sur la force de poussée F_z et le délaminage en perçant un stratifié carbone époxy d'épaisseur 4 mm. Ils ont utilisé comme paramètres d'avance $V_f = 0.025, 0.05$ et 0.01mm/tr et une gamme de

vitesse de coupe V_c entre 30 et 102m/min. Les résultats recommandés correspondent à f minimale (égale à 0,025) et à V_c égale à 53m/min.

Ghidossi [9] a réalisé des essais de traction hors axe jusqu'à la rupture sur des éprouvettes verre/époxy unidirectionnelles usinées en fraisage. Les résultats obtenus ont montré que les influences combinées ou contradictoires de la vitesse de coupe et de l'avance par dent dépendent de l'orientation des fibres.

Les mesures de température de coupe par caméra infrarouge ont permis de supposer que les endommagements susceptibles d'être engendrés par la température de coupe n'expliquent pas la variation de la contrainte à la rupture et que les seuls qui sont influant sont les endommagements mécaniques.

Le couplage entre le mode de sollicitation mécanique et l'action des dommages de coupe ont été confirmés par des essais sur des éprouvettes de cisaillement Iosipescu et de traction sur anneaux produits à partir de trois composites à matrice polymère [9].

Les auteurs ont constaté que l'endommagement n'a une influence significative sur le comportement des éprouvettes que si la rupture s'initie au niveau des surfaces coupées.

Des essais de perçage ont été effectués sur des composites renforcés par des fibres de verre, afin de vérifier l'effet des paramètres d'usinage sur la qualité de coupe et sur le comportement mécanique du matériau [10].

Les données expérimentales ont prouvé que la largeur de la zone endommagée est corrélée avec le rapport entre la vitesse de perçage et d'avance; en particulier, plus la valeur de $V_{\text{perçage}}/V_{\text{avance}}$ est haute, la qualité de coupe est meilleure.

La résistance à la traction subit une réduction marquée avec l'augmentation de la largeur de la zone endommagée quand cette dernière est grande. Pour de petites largeurs, aucune corrélation ne semble exister [5].

II. INFLUENCE DE LA VITESSE DE COUPE SUR LE COMPORTEMENT EN FATIGUE

La vitesse de coupe est prépondérante pour la durée de vie de l'outil. Augmenter la vitesse de coupe accroît la température et réduit ainsi la durée de vie.

Pour bien comprendre l'effet de la vitesse de coupe sur la durée de vie des pièces mécaniques plusieurs expériences étaient prises pour des types de matériaux différents.

II.1. Matériaux composites (Carbone/époxy)

Malgré les avancées dont a bénéficié le procédé d'élaboration des composites, leur usinage reste mal maîtrisé vu la complexité des phénomènes intervenant dans la zone de coupe. Les matériaux composites sont aujourd'hui largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, la construction automobile, le nucléaire, le génie biomédical...

Pendant l'enlèvement de la matière et en raison de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de ces matériaux, la coupe peut engendrer des endommagements qui vont croître avec la répétition des sollicitations imposées à la structure en service, et éventuellement conduire à sa ruine. Ces endommagements sont principalement le délaminage, l'arrachement des fibres, la décohésion et la dégradation d'origine thermique.

Le matériau composite étudié est un stratifié carbone/époxy tissé (2D), réalisée par moulage sous vide, par la technique dite du "sac". L'épaisseur du matériau composite est de 4 mm. La découpe de la plaque par détournage sous forme d'éprouvettes de traction est réalisée à l'aide d'une fraiseuse à commande numérique. L'usinage par fraisage en avalant est effectué avec une fraise 2 dents en carbone monobloc de diamètre 5,6 mm. La vitesse de rotation est de 13000 tr/min, l'avance par dent f_z est égale à 0,05 mm/dent.tr et la vitesse de pénétration est de 10 mm/s. Les éprouvettes obtenues sont de 200 mm de longueur et de 20 mm de largeur. Des trous sont percés ensuite au centre des éprouvettes avec des paramètres de coupe variables. L'outil utilisé est un foret à 2 dents, de diamètre 10,8 mm en carbure monobloc.

Les paramètres de coupe utilisés au cours du perçage des éprouvettes sont donnés dans le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 : Paramètres de coupe utilisés au cours du perçage.

Vitesse de rotation (tr / min)	Vitesse de coupe V_c (m / min)	Vitesse d'avance V_f (mm / s)	Avance f_z (mm / tr .dent)	Contrainte à la rupture σ_r (MPa)
1911	64,8	19	0,3	182,4
		44	0,69	310,3
		70	1,1	319
		95	1,5	211,3
3185	108	19	0,18	273,9
		95	0,9	296,5

Pour étudier l'influence de l'usinage sur le comportement mécanique, ces éprouvettes sont soumises aux sollicitations mécaniques en traction statique hors axe jusqu'à leur rupture avec une longueur entre les mors de 80 mm.

Les essais ont été effectués sur une machine de traction de capacité 50 kN. La vitesse de chargement utilisée est 20 mm/min.

Résultats discussion

L'observation macroscopique des éprouvettes après les tests de traction hors axe montre que leur rupture est due à l'arrachement des fibres au niveau du trou percé (figure 3.14). En effet, la rupture de fibres s'amorce au niveau des défauts présents dans ces dernières, quand la contrainte appliquée excède la contrainte à la rupture.

Les interfaces autour des fibres peuvent également se rompre et ainsi permettre un déchaussement des fibres.



Figure 3.14 : Observation des éprouvettes a) avant et b) après les essais de traction.

Les valeurs de contrainte observée à la rupture sont données sur le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Plan des essais de traction à deux facteurs.

Nombre d'essai	Contrainte à la rupture(MPa)	Vitesse de coupe (m /min)	
		1	2
1	182 ,4	182,4	
2	211,3		211,3
3	273,9	273,9	
4	296,5		296,5
Total	964,1	456,3	507,8
Moyenne	241	228,2	253,9

Les résultats des essais de traction illustrent l'évolution de la contrainte maximale à la rupture σ_r en fonction des paramètres de coupe étudiés.

A ce qui concerne la vitesse de coupe, il a été constaté qu'elle influe fortement sur la résistance mécanique à la traction (figure 3.15).

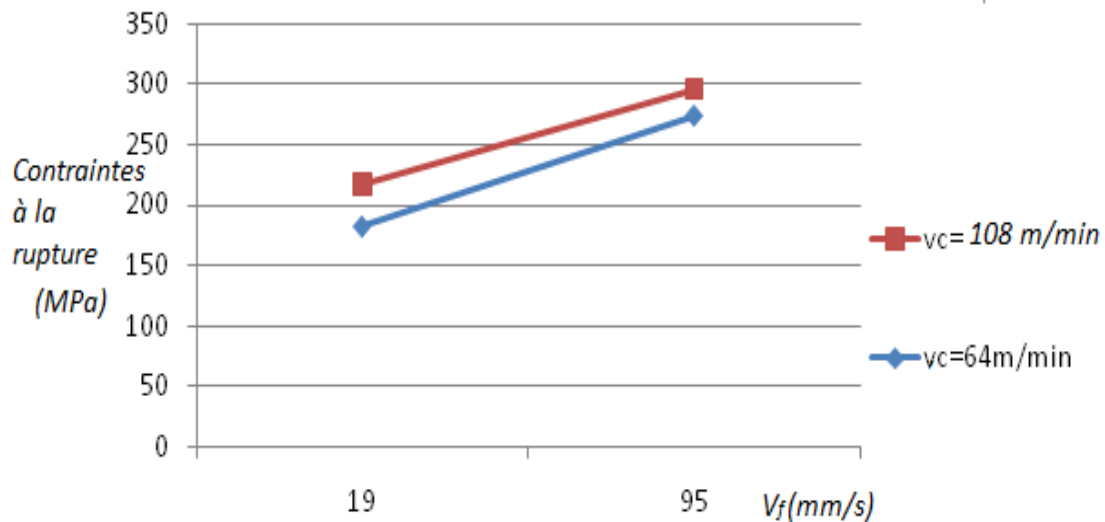


Figure 3.15 : Variation de la contrainte à la rupture en fonction de V_c [11].

La valeur de la contrainte à la rupture σ_r du matériau croit d'environ 30% lorsque la vitesse de coupe passe de 64,8 à 108 m/min (augmentation de 40%). Puisque le débit des défauts laissés augmente avec la diminution de la vitesse coupe, il est nécessaire d'accroître les valeurs de ce paramètre pour l'usinage de ce matériau afin d'obtenir une bonne résistance mécanique. Donc on peut dire que l'accroissement de la vitesse de coupe résulte un bon état de surface.

II.2. Acier AISI 4140

La figure ci-dessous montre que la vitesse de coupe a une influence sur la surface des pièces usinées avec l'acier AISI 4140 (sa composition chimique Carbone 0.42%, Silicium 0.30%, Molybdène 0.20%, Manganèse 1.00%, Chrome 1.00%) ou elle joue un grand rôle pour l'obtention d'une surface finie. Lorsqu'on augmente la vitesse de coupe la rugosité de surface diminue ce qui résulte un bon état de surface. À basse vitesse de coupe, les paramètres de rugosité sont très élevés, ce qui diminue considérablement avec l'augmentation de la vitesse de coupe de 15 à 60 mm/min. La diminution de la rugosité de surface est moins importante à des vitesses de coupe.

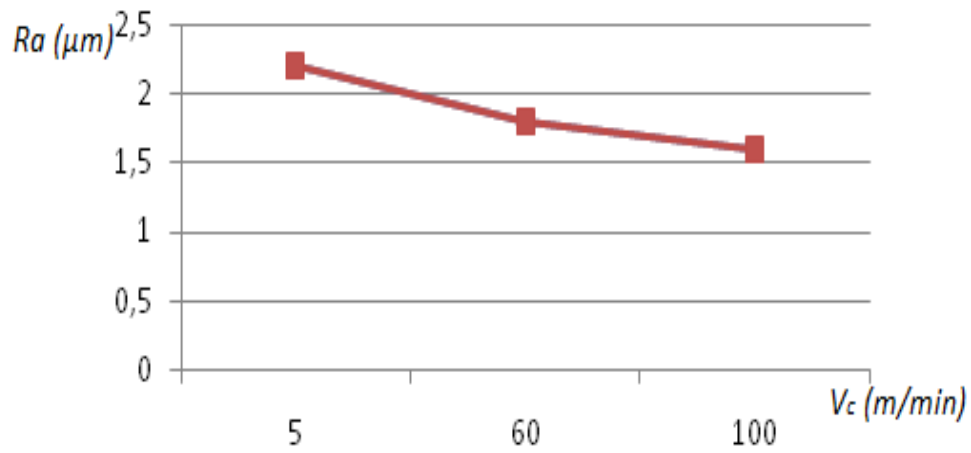


Figure 3.16.a : Influence de V_c sur la rugosité moyenne du profil (R_a) [12].

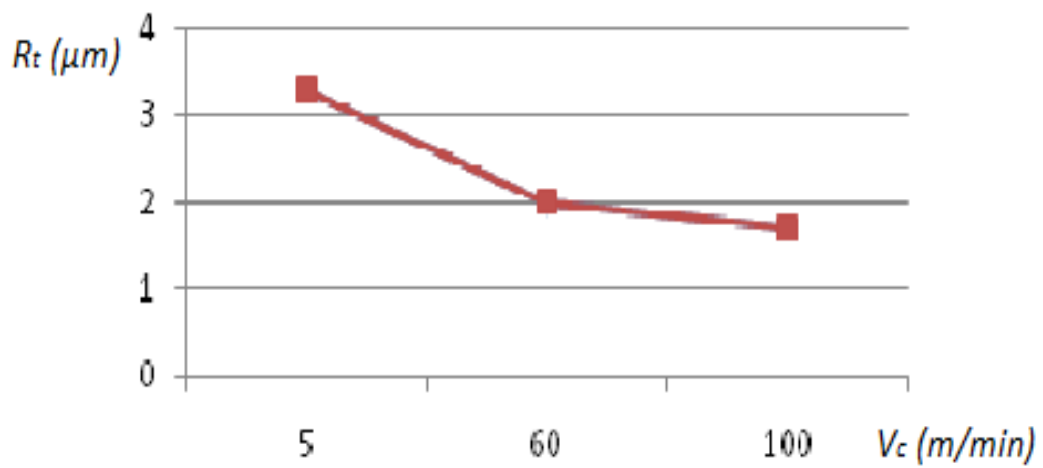


Figure 3.16.b : Influence de V_c la hauteur du profil total (R_t).

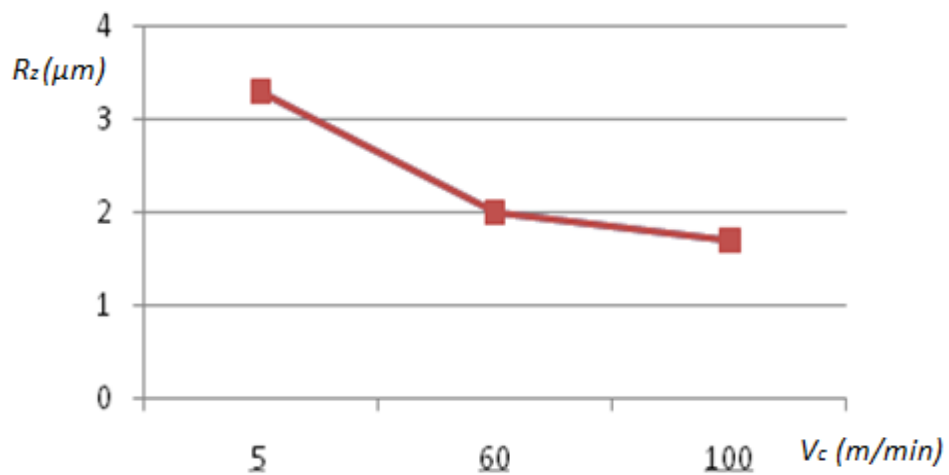


Figure 3.16.c : Influence de V_c sur la hauteur du profil maximum (R_z).

Les résultats ont montrés que la limite de la fatigue de l'acier AISI 4140 augmente de façon presque linéaire avec l'augmentation de la vitesse de coupe comme il est indiqué dans la figure 3.17. Ce résultat était prévu car l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à plus petite rugosité des valeurs. En outre, la vitesse de coupe n'a aucune influence sur la dispersion de la limite de fatigue.

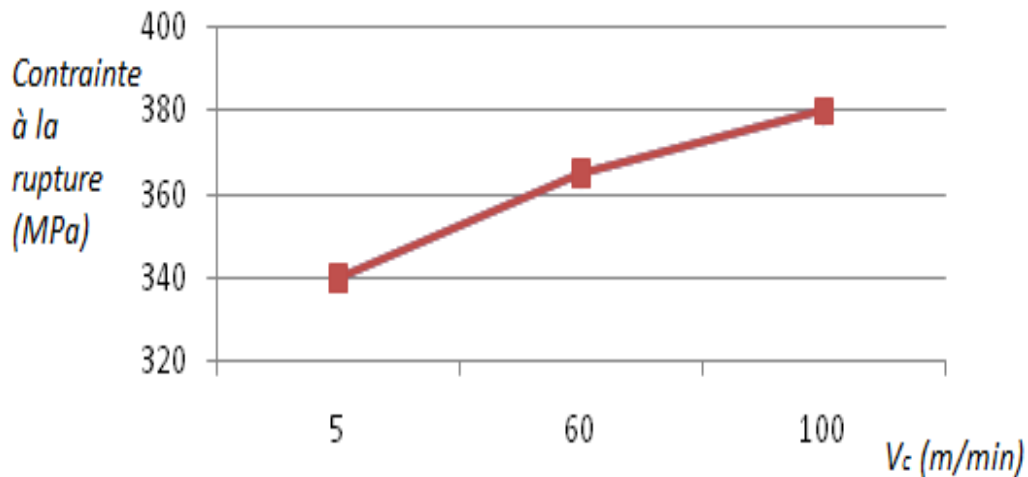


Figure 3.17 : Influence de V_c sur la limite de fatigue de l'acier AISI 4140.

Donc pour avoir une bonne résistance à la fatigue, on doit augmenter les vitesses de coupe afin de diminuer la rugosité de surface des pièces réalisées avec l'acier AISI 4140.

II.3. Acier 42 CRMO 4 à l'état recuit

Pour connaître l'effet de ce paramètre sur ce type de matériau (42CrMo4), plusieurs essais ont été réalisés pour des opérations de chariotage à sec on utilisant un tour rigide qui a une puissance de ($P=6.6$ KW), un microscope optique type HUND (W-AD), un Rugosimètre Mitutoyo et plate forme Kistler. L'outil utilisé pour cette manipulation est un carbure métallique GC 3015 (K10) avec triple revêtement. Cette manipulation a été réalisée avec deux régimes de coupe. Les conditions du premier régime ($V_c= 78,5$ m/min ; $V_f= 0,08$ mm/tr). Par contre, le deuxième régime a connu une augmentation de la vitesse de coupe ($V_c= 111$ m/min ; $V_f= 0,08$ mm/tr). L'usure admissible selon ISO est $[VB_{max}] = 0.5$ mm.

Résultats et discussion

Les figures (3.18.a, b, c et 3.19.a, b, c) illustrent à titre indicatif l'évolution de la rugosité en fonction de l'usure pour les deux régimes du matériau de coupe du plan d'expériences. L'analyse conclut que l'augmentation de VB entraîne une détérioration de la qualité de la surface usinée. Donc un bon état de surface exige un degré d'usure très faible afin d'obtenir une surface douce. Elles contiennent les résultats de la rugosité pour les différentes combinaisons du plan.

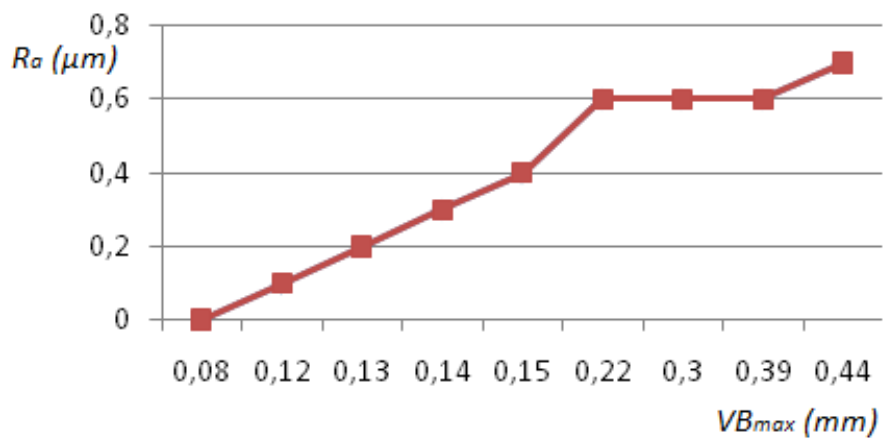


Figure 3.18.a : Evolution de R_a en fonction de l'usure en dépouille pour le premier régime.

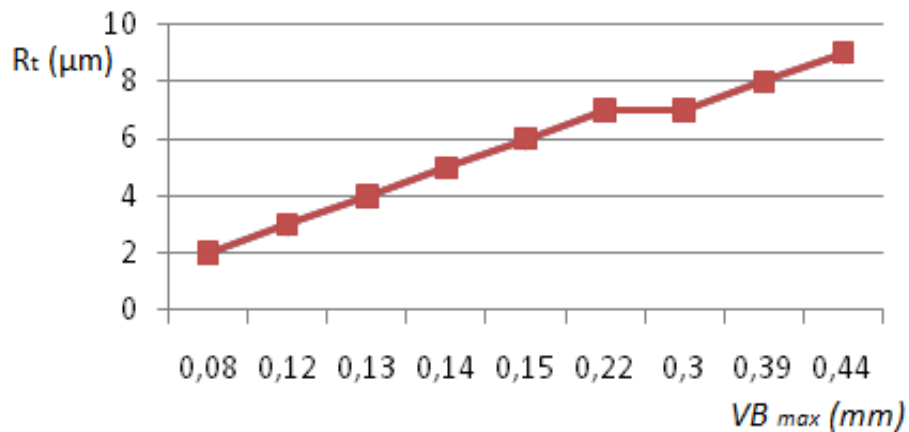


Figure 3.18.b : Evolution de R_t en fonction de l'usure en dépouille pour le premier régime.

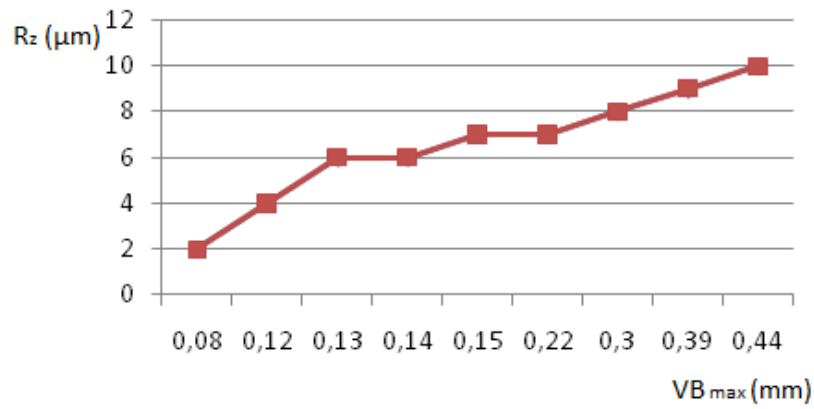


Figure 3.18.c : Evolution de R_z en fonction de l'usure en dépouille pour le premier régime.

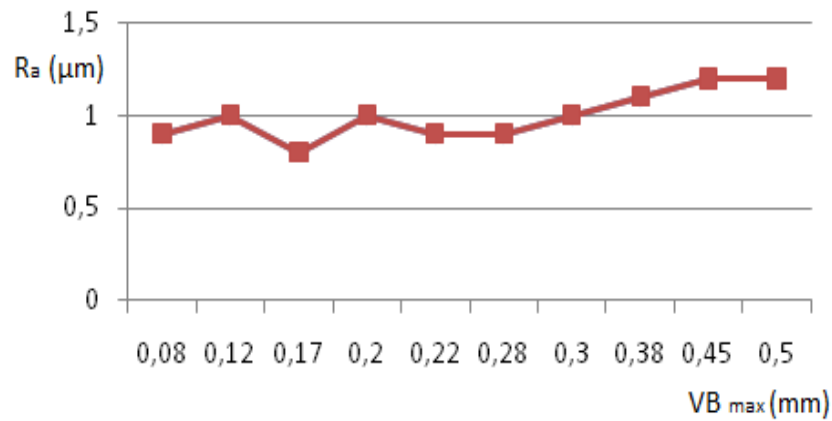


Figure 3.19.a : Evolution de R_a en fonction de l'usure en dépouille pour le deuxième régime.

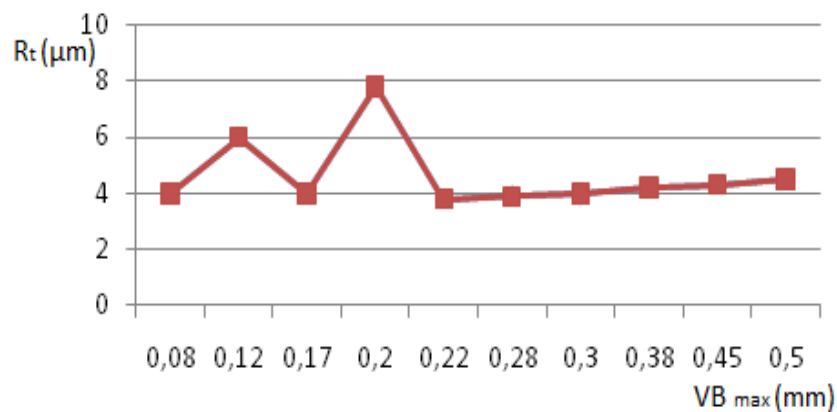


Figure 3.19.b : Evolution de R_t en fonction de l'usure en dépouille pour le deuxième régime.

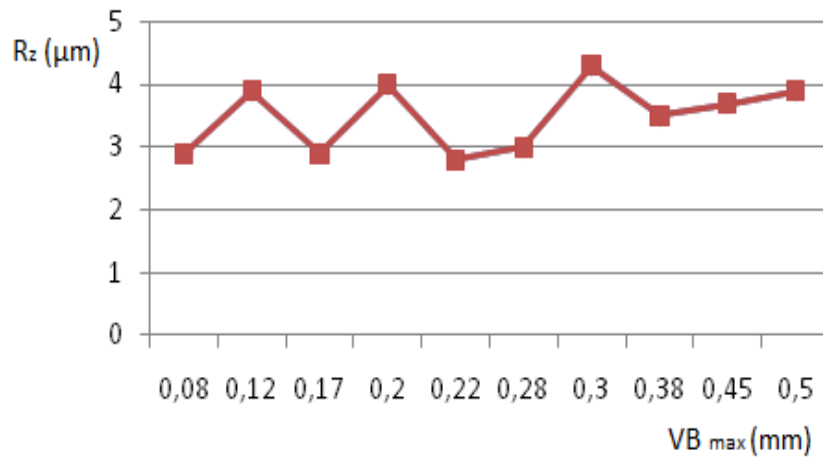


Figure 3.19.c : Evolution de R_z en fonction de l'usure en dépouille pour le deuxième régime.

L'analyse des résultats des efforts de coupe lors de l'usinage avec la nuance GC3015, fait ressortir que ces derniers diminuent avec l'augmentation de la vitesse et augmentent avec l'accroissement de la section du copeau ($f \times a_p$). Les résultats montrent que la diminution du degré d'usure accroît la rugosité de surface.

La vitesse a une influence relativement plus faible que celle de la profondeur de passe et de l'avance. Ceci est dû à l'adoucissement de la couche enlevée suite à l'élévation de la température et à la diminution du coefficient de frottement aux interfaces « outil – pièce ». La durée de vie des plaquettes en carbure revêtu (GC3015) dépend essentiellement du rôle physico - chimique et mécanique du revêtement. Au cours de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec le carbure revêtu (GC3015) l'usure par abrasion, se trouve freiné par le triple revêtement (Ti N, AL₂ O₃, et Ti(CN)) [14].

II.4. Acier HDBE-80

Puisque l'état de surface a une influence très importante sur la durée de vie, cette étude a été prise pour simuler l'effet des paramètres de coupe lors de l'usinage d'une pièce en acier HDBE-80. L'opération était effectuée sur éprouvettes en acier HDBE-80. Les plaquettes de coupe utilisées sont amovibles de forme carrée en carbure métallique. Pour la mesure de la rugosité un rugosimètre surf test 301 a été utilisé. Cette mesure a été réalisée directement sur la machine sans démontage de la pièce. Cette expérience a pour but de constater l'effet de la vitesse de coupe ou ils ont gardés l'avance, la profondeur de passe et variés le paramètre considéré.

Tableau 3.5 : Différentes valeurs de vitesse de coupe.

v_c (m/min)	30	65	90	125	180
f (mm/tr)	0.14				
a (mm)	3				

La figure 3.19 représente les résultats de l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité. L'analyse de ces résultats fait expliquer que pendant l'usinage, la rugosité de l'acier trempé diminue légèrement avec de la vitesse de coupe jusqu'à 140 m/min puis elle a tendance à se stabiliser à 180m/min. Cette amélioration de l'état de surface s'explique par le fait que la matière est ductile et les vitesses de coupe choisies sont élevées, ce qui ne favorise pas la formation de l'arête rapportée.

Donc il n'y a pas de dégradation de l'état de surface par l'adhésion de particules ou fragments du copeau sur la surface déjà usinée. En travaillant avec des vitesses de coupe élevées supérieures à 180 m/min la rugosité augmente légèrement à cause des vibrations du système usinant.

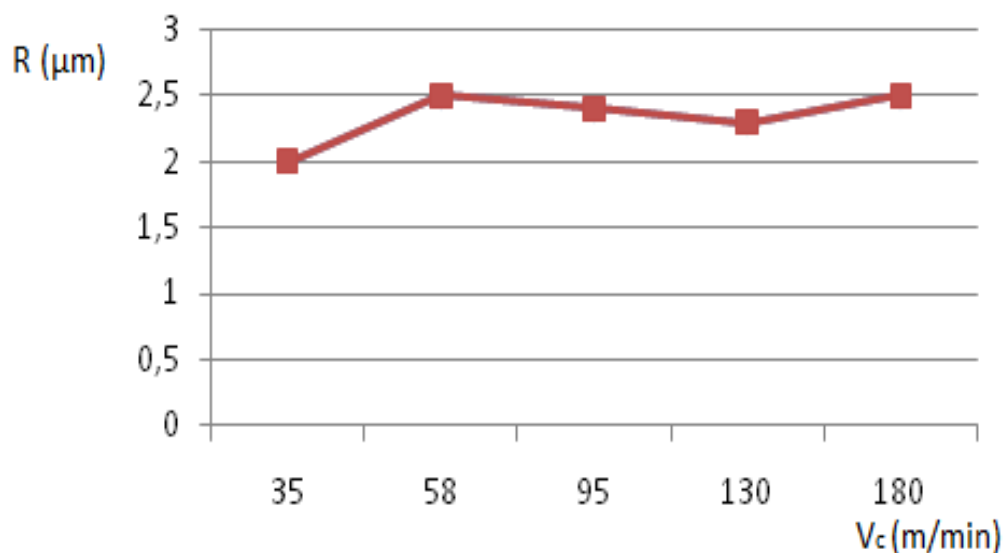


Figure 3.20 : Influence de V_c sur la rugosité de surface.

III. INFLUENCE DE LA VITESSE D'AVANCE SUR LE COMPORTEMENT EN FATIGUE

Pour définir l'influence de la vitesse d'avance sur le comportement en fatigue, une étude sur plusieurs types de matériaux est réalisée.

III.1. Les matériaux composites (carbone/époxy)

Pour la même expérience étudiée précédemment, cette fois ci on vérifie l'effet de la vitesse d'avance de sur la durée de vie du même matériau composite.

Tableau 3.6 : Plan des essais de traction à deux facteurs.

Nombre d'essai	Contrainte à la rupture (MPa)	Vitesse d'avance (m /min)	
		1	2
1	182 ,4	182,4	
2	211,3	211,3	
3	273,9		273,9
4	296,5		296,5
Total	964,1	393,7	570,4
Moyenne	241	196,9	285,2

Le taux de croissance dépend de la vitesse d'avance V_f . De plus, ces courbes montrent que l'effet de l'avance est moins important que celui de la vitesse de coupe. En effet, contrairement à l'effet de la vitesse de coupe, une diminution de 80% de la vitesse d'avance se traduit par une faible baisse de la contrainte à la rupture. Cette baisse varie de 7 % à 13 % seulement. Les influences des deux paramètres de coupe sur la contrainte à la rupture sont indépendants l'un de l'autre et les effets de V_c et V_f sont additifs. Afin de mieux comprendre l'influence de la vitesse d'avance sur la résistance mécanique du matériau, différentes valeurs d'avance (19, 44, 70 et 95 mm/s) ont été testées avec une même vitesse de coupe égale à 64,8 m/min. Les résultats sont donnés sur la figure 3.21. Ils montrent la présence de trois zones. Au niveau de la première, la résistance mécanique varie sensiblement avec la vitesse d'avance. Une amplification de 41,2% est observée lorsque la vitesse passe de 19 à 44

mm/s. Par contre, dans la deuxième zone, entre 44 et 70 mm/s, l'effet de l'avance est presque négligeable (on note une augmentation de 2,7%). Dans cet intervalle, la valeur de la contrainte est stationnaire. Pour des vitesses supérieures à 70 mm/s, une diminution importante de la contrainte est observée. Celle ci peut s'expliquer par le fait qu'une augmentation de l'avance à tendance a engendrer des délaminages importants au niveau de la zone percée qui se traduirait par une chute spectaculaire de la contrainte à la rupture qui reste néanmoins supérieure à celle obtenue par une vitesse d'avance de 19 mm/s [6].

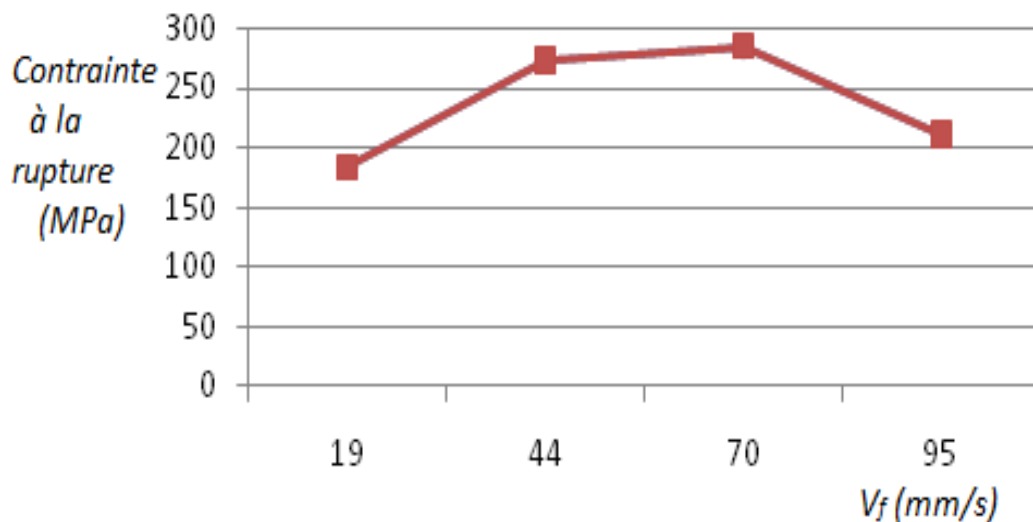


Figure 3.21 : Variation de la contrainte à la rupture en fonction de V_f pour $V_c = 64,8 \text{ m.min}^{-1}$.

III. 2. L'acier AISI 4140

Pour le même matériau et la même expérience prise précédemment, la vitesse d'avance influe aussi le comportement des aciers en fatigue. Une augmentation de la vitesse d'alimentation entraîne une augmentation quasi-linéaire de tous les paramètres mesurés de la rugosité de surface, comme le montre la figure 3.22, a, b, c.

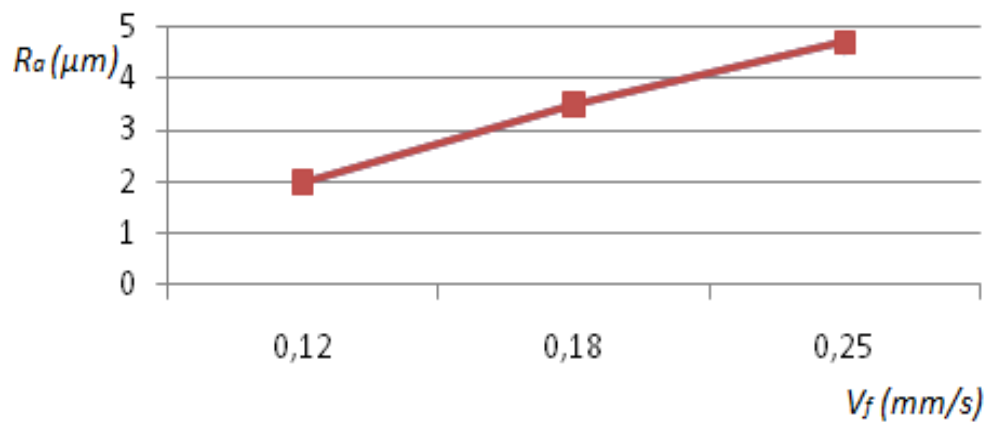


Figure 3.22.a : Influence de V_f sur la rugosité moyenne de profil (R_a).

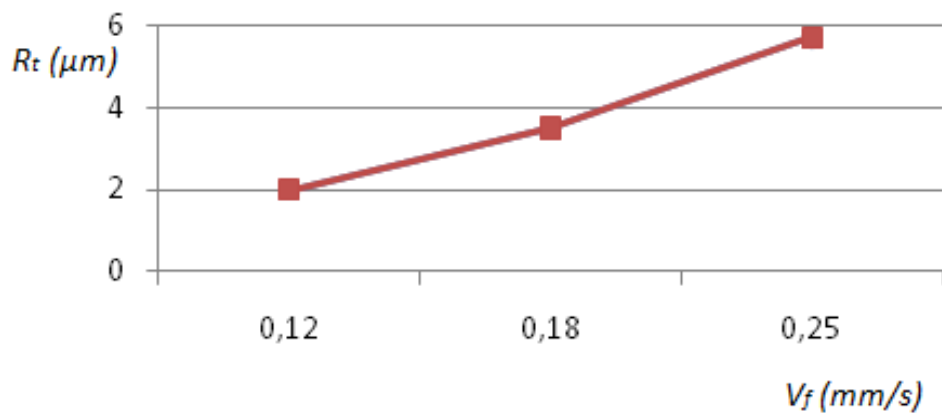


Figure 3.22.b : Influence de V_f sur la hauteur du profil total (R_t).

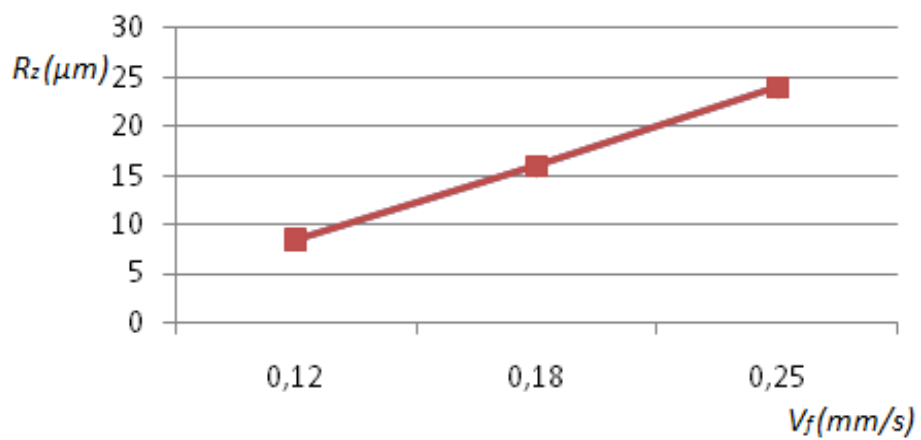


Figure 3.22.c : Influence de V_f sur la hauteur du profil maximum (R_z).

La limite de fatigue de l'acier AISI 4140 n'est que légèrement influencée lorsque la vitesse d'avance est élevée. Une forte diminution de la limite de fatigue est observé lorsque la vitesse est porté à 0,25 mm / tr. Il a été précédemment montré que la rugosité de surface accroit d'une façon linéaire lorsque la vitesse d'avance augmente. Ainsi, on s'attendait à un comportement similaire entre la limite de la fatigue et de l'avance. Il devient évident que la limite de fatigue est déterminée non seulement par les valeurs de rugosité. Les contraintes résiduelles origine par usinage sont également importantes. Le paramètre le plus influent sur la limite de la fatigue est la vitesse d'avance. Toutefois, les changements de la limite de fatigue avec des paramètres de coupe sont très inférieurs à celle observée par les paramètres de rugosité.

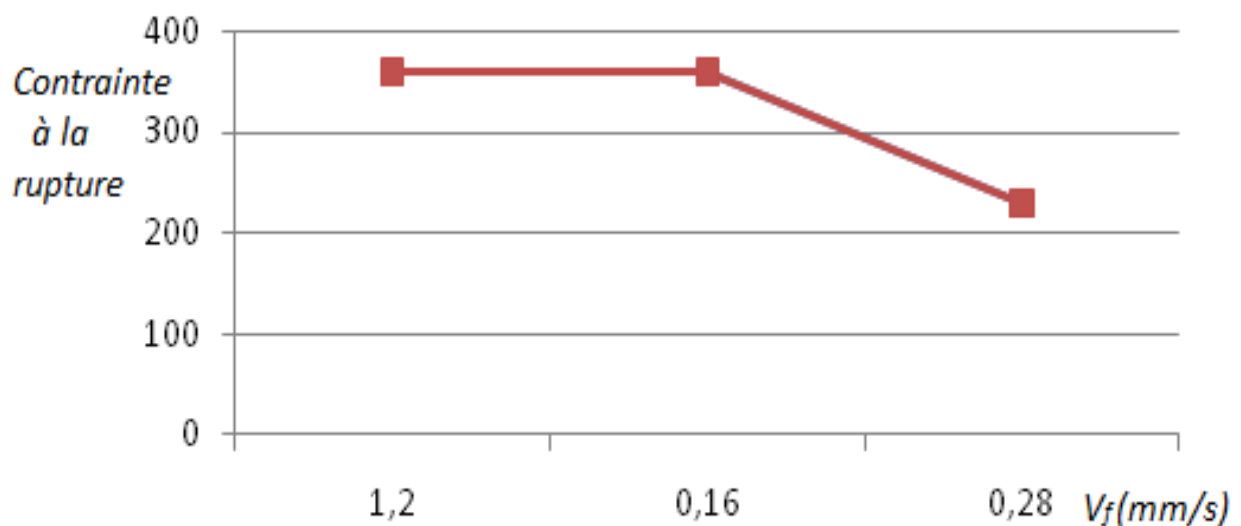


Figure 3.23 : Influence de V_f sur la limite en fatigue.

Au cours de l'usinage, la couche superficielle de la surface est soumise à plusieurs phénomènes, qui se traduisent par des changements structuraux, l'écrouissage et les contraintes résiduelles, tandis que les irrégularités puissent paraître, la création d'une rugosité de surface. La limite de fatigue est déterminée par tous ces paramètres. Pour analyser l'influence des contraintes résiduelles sur la limite de fatigue, plusieurs échantillons ont été soumis pour l'essai de fatigue. La limite de fatigue de ces échantillons traités à la chaleur a augmenté de près de 30% par rapport à la limite de fatigue des échantillons non traitées. Par ailleurs, l'influence de la vitesse d'avance sur la limite de fatigue est devenue presque linéaire, similaire aux résultats précédemment présentés entre le taux d'alimentation et des valeurs de rugosité. Enfin, il peut

également être observé que la dispersion des échantillons traités à la chaleur est inférieure à celle de la chaleur non traitée.

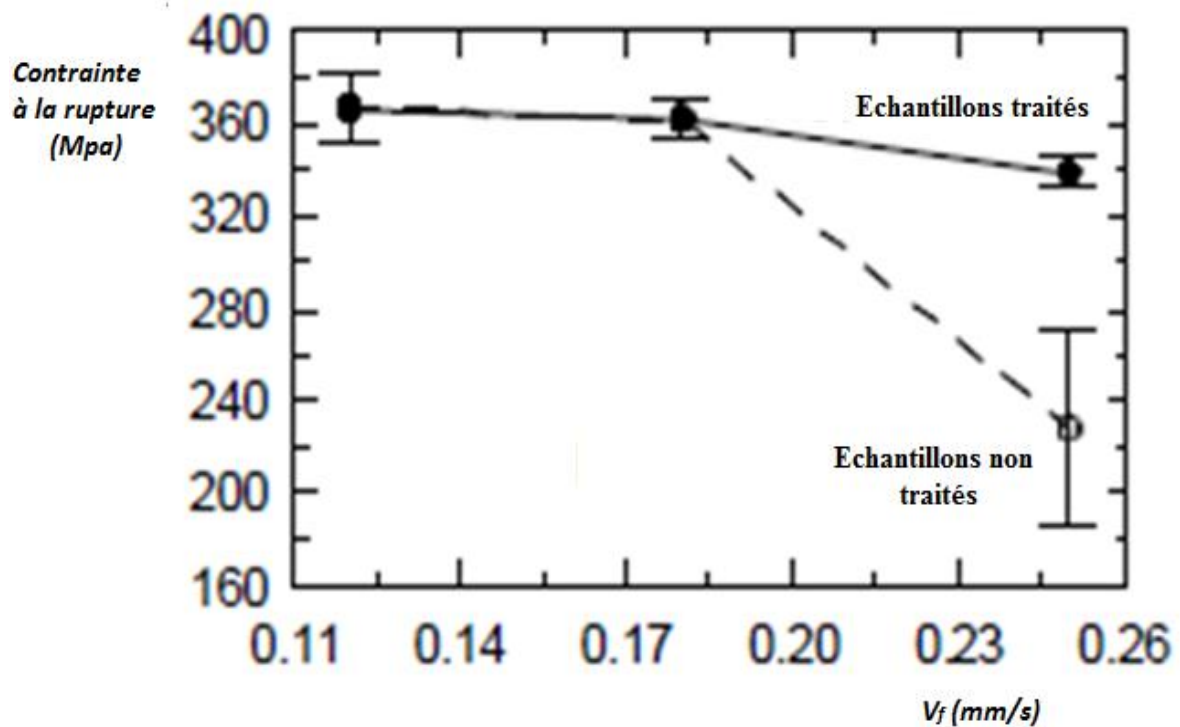


Figure 3.24 : Influence de V_f et le soulagement des contraintes résiduelles sur la limite de fatigue.

Ainsi, le traitement thermique de soulagement du stress a entraîné une diminution de près de 23% de la limite de fatigue des échantillons recuits à portail avec ceux des non soumis à traitement thermique. Une augmentation du débit d'alimentation provoque une augmentation presque linéaire de tous les paramètres mesurés de rugosité de surface comme il est montré dans la figure 3.24 [7].

III.3.L'acier HDBE-80 :

Ils ont gardés la vitesse de coupe, la profondeur de passe et variés l'avance.

Tableau 3.7 : Différentes valeurs de l'avance.

V_f (mm/tr)	0.14	0.24	0.36	0.4	0.56
V_c (m/min)	35				
a (mm)	3				

La figure 3.25 illustre les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction de l'avance. L'analyse des courbes montre que ce paramètre a une influence très significative sur la rugosité. En effet, L'avance est le facteur déterminant de la qualité des surfaces usinées, en tournage par exemple, la surface engendrée comporte des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons sont autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée, ce qui nécessite d'employer de faibles avances lors du tournage de finition .

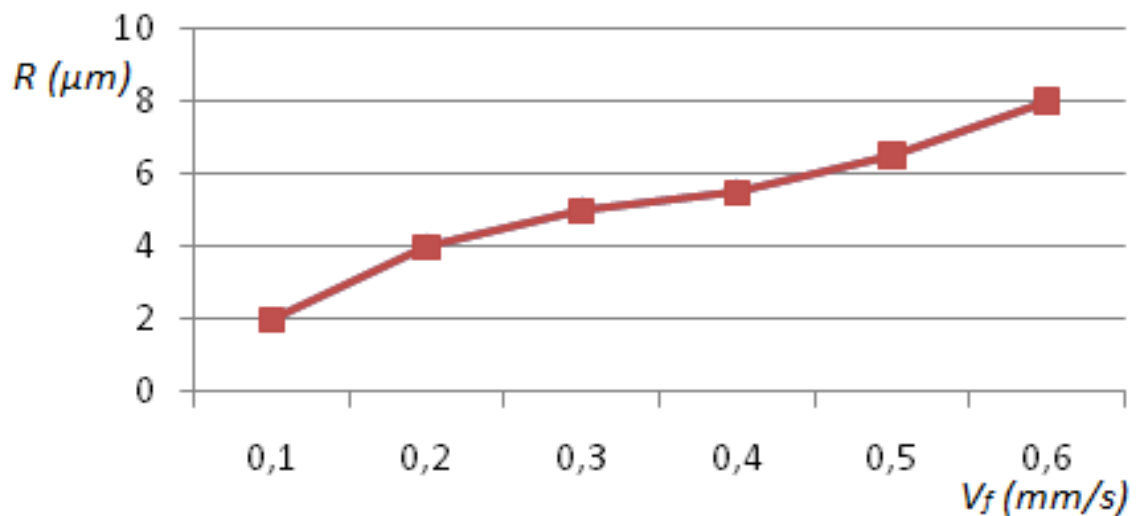


Figure 3.25 : Influence de V_f sur la rugosité de surface.

IV. INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DE PASSE SUR LE COMPORTEMENT EN FATIGUE

IV. 1. L'acier AISI 4140 :

La rugosité de surface diminue avec l'augmentation de la profondeur de coupe. À la profondeur de coupe de 0,4 mm, les paramètres de rugosité sont très élevés, ce qui diminue considérablement avec l'augmentation de la profondeur de coupe de 1,2 mm. Nouvelle augmentation de la profondeur de coupe de 2,0 mm causé aucun changement significatif de la rugosité de surface de l'acier.

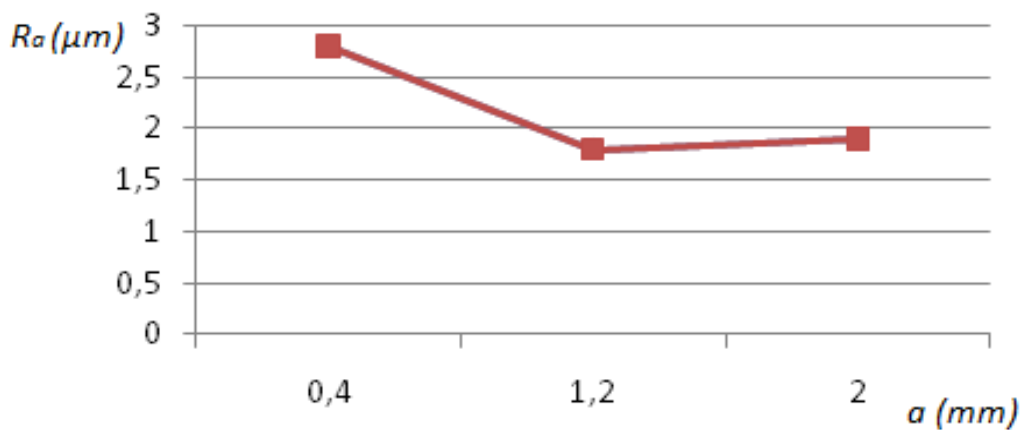


Figure 3.26.a : Influence de a_p sur la rugosité moyenne de profil (R_a).

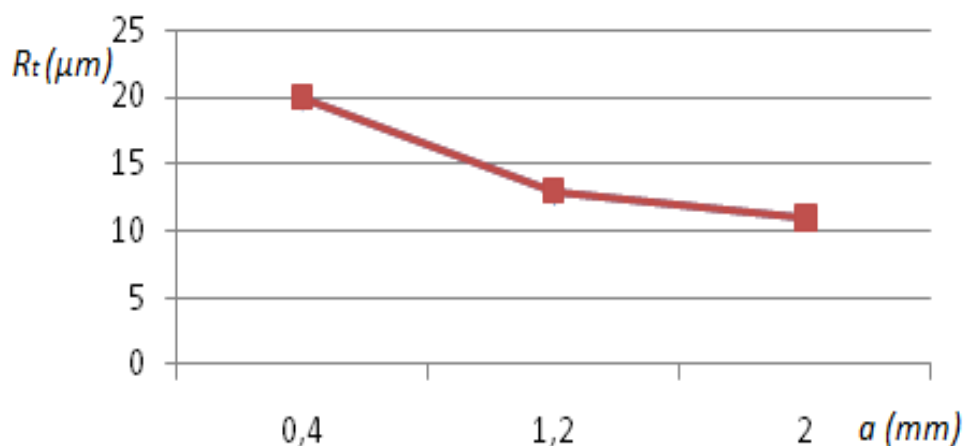


Figure 3.26.b : Influence de a_p sur la hauteur de profil total (R_t).

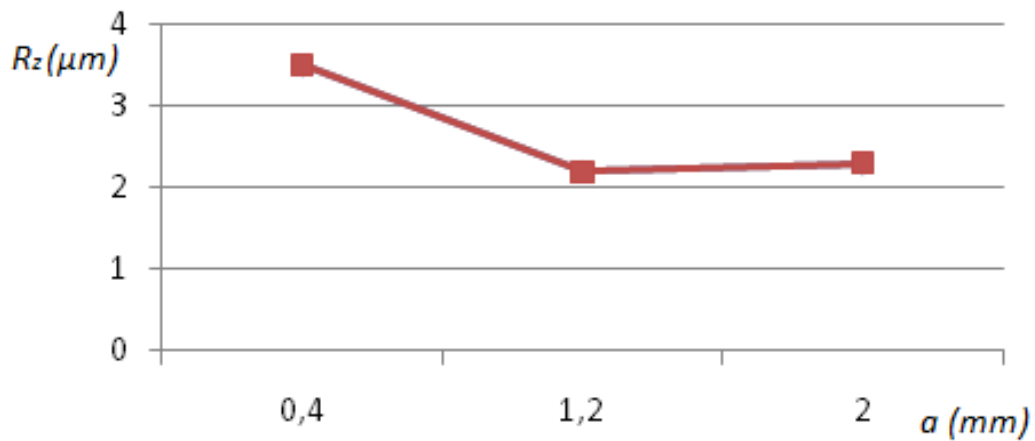


Figure 3.26.c : Influence de a_p sur la hauteur de profil maximum (R_z).

La limite de fatigue de l'acier AISI 4140 augmente de près de 18% avec la profondeur de coupe accroit de 0,4 à 1,2 mm. Nouvelle augmentation de la profondeur de coupe à 2,0 mm n'a pas marquée d'influence sur la limite moyenne de fatigue de cet acier. Toutefois, la dispersion de la fatigue limite les augmentations avec la profondeur de coupe. L'influence de la profondeur de coupe sur la limite de fatigue est similaire à ceux observés dans la figure 3.27.

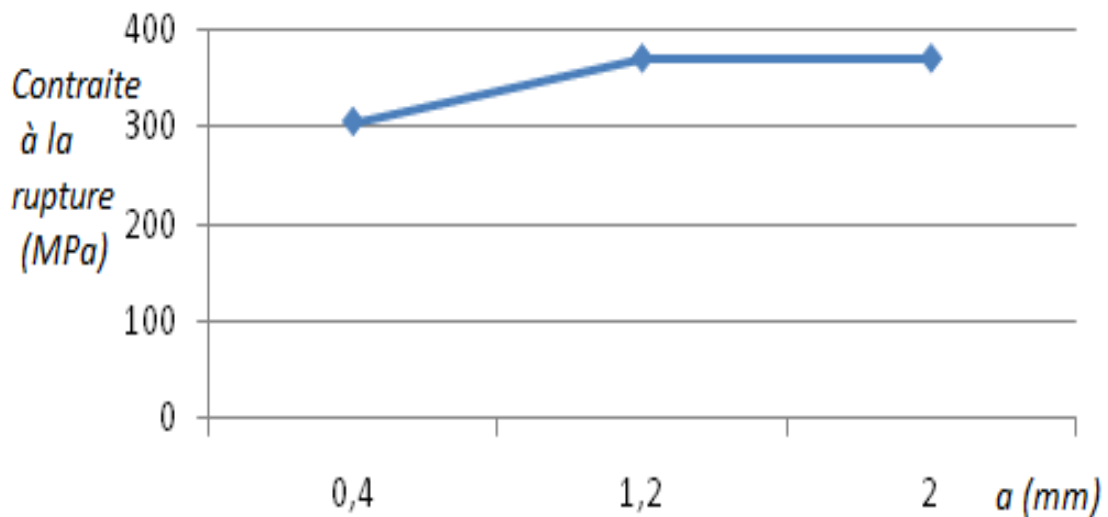


Figure 3.27 : Influence de a_p sur la limite de fatigue.

IV.1. L'acier HBDE-80

Pour vérifier si la profondeur de passe a une influence sur la durée de vie de ce matériau la même expérience a été prise, ou ils ont gardés la vitesse de coupe, l'avance et variés la profondeur de passe.

Tableau 3.8 : Différentes valeurs de profondeur de passe.

a (mm)	2	3	4
V_c (m/min)	35		
V_f (mm/tr)	0.14		

La figure 3.28 représente les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe. Les résultats montrent que la profondeur de passe n'a pas une grande influence sur l'état de surface de ce type d'acier par rapport aux autres paramètres qui sont la vitesse de coupe et la vitesse d'avance. Ces résultats montrent aussi que la surface de la pièce usinée devient plus rugueuse avec l'augmentation de la profondeur de pénétration. Cette augmentation de la rugosité s'explique par le travail avec les grandes profondeurs de passe qui génère des efforts de coupe important et influe sur la stabilité du système usinant, ce qui entraîne une élévation de la rugosité [9].

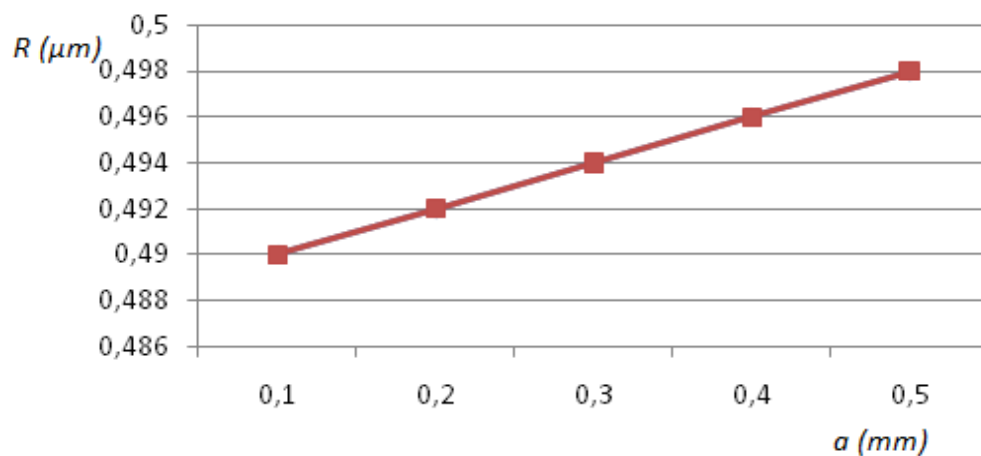


Figure 3.28 : Influence de a_p sur la rugosité de surface.

CONCLUSION GENERALE

La fatigue est l'une des maladies des métaux, elle survient sur toutes structures soumises à des sollicitations répétées à amplitude constante ou variable. Ce terme signifie des endommagements qui conduisent à la rupture des pièces mécaniques. Elle a des conséquences très néfastes et malgré tous les travaux réalisés sur ce domaine elle reste toujours méconnue. C'est pour cette raison que plusieurs auteurs ont consacré leurs travaux sur le comportement en fatigue afin d'éviter leurs ruptures et améliorer leurs durées de vie.

La majorité des fissurations des pièces mécaniques obtenues par le procédé d'enlèvement de matière prennent dans la couche superficielle de la nouvelle surface qui est définie par trois paramètres (géométrique, mécanique et métallographique) qui peuvent varier séparément en fonction des conditions d'usinage.

Les conditions de coupe idéales sont la réduction du temps d'usinage, une longue durée de vie et une grande précision d'usinage. Pour obtenir ces conditions, il est nécessaire de bien sélectionner l'outil en fonction de la matière, la dureté de la géométrie et de la capacité de la machine à utiliser. Ils ont une inspiration indirecte sur le comportement en fatigue car ils résultent des irrégularités qui ont un caractère micrographique ou macrographique appelées rugosité ou plusieurs modèles pour l'estimation des durées de vie se sont basés sur ce paramètre géométrique.

Dans la conception technique, les effets des paramètres qui définissent l'état de la nouvelle surface sont généralement comptabilisés en utilisant des facteurs de réduction empiriques qui modifient la limite d'endurance du matériau. Les facteurs de réduction sont définis pour chaque type des processus d'usinage. Par ailleurs, au sein de chaque catégorie de processus d'usinage l'utilisation de ces facteurs de réduction conduit à des spécifications de surface (généralement en termes de rugosité) liés aux paramètres d'usinage comme la vitesse de coupe, d'avance En effet, le changement du processus d'usinage ou des paramètres d'usinage doit alors être accompagné d'une nouvelle définition des facteurs de réduction et / ou spécifications de surface qui doit être validé en effectuant de nouveaux essais de fatigue.

Le degré de fini des surfaces usinées dépend fortement des conditions d'usinage ce qui nécessite de connaître la relation entre ces conditions pour chaque procédé avec l'état de surface afin d'améliorer la qualité des surfaces obtenues et augmenter la durée des pièces réalisées par différents procédés d'usinage.

L'objectif général de cette étude est de bien comprendre le phénomène de fatigue en avisant la relation des paramètres de coupe avec ce phénomène, elle vise à mettre en évidence les paramètres responsables de la dégradation des matériaux usinés. Pour bien comprendre l'influence de ces paramètres, j'ai pris en considération des études déjà réalisées, ou chaque étude était menée pour observer l'effet de chaque paramètre de coupe sur la tenue en fatigue pour différents types de matériaux obtenus par plusieurs procédés.

Pour ce qui concerne les matériaux composites, l'augmentation des vitesses de coupe peut être bénéfique pour avoir une bonne résistance à la fatigue, car on remarque une augmentation d'environ 40% de la résistance à l'effort de traction.

Les expériences qui ont été consacré à l'étude des aciers ne résultent que la vitesse de coupe influe l'état de surface de ces aciers ou on remarque que l'augmentation des valeurs des vitesses utilisées assure un état de surface qui résiste aux efforts imposées.

En étudiant le deuxième paramètre qui est la vitesse d'avance, les résultats montrent que ce paramètre influe aussi les états des surfaces des matériaux examinés.

Pour les matériaux composites, on remarque que l'augmentation de la vitesse d'avance diminue la résistance du matériau étudié. Ce qui explique que la croissance des vitesses d'avance engendre des délaminages important au niveau de la zone percé. Pour les aciers et plus précisément pour les aciers AISI 4140 et HBDE-80, l'avance est le paramètre le plus influent car la croissance de la vitesse de d'avance signifie une augmentation des paramètres de rugosité ce qui résulte une diminution de la résistance mécanique. En tournage par exemple, la surface engendrée comporte des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons sont plus profonds et plus large lorsque l'avance est élevée ce qui explique d'utiliser des faibles vitesses d'avance lors de tournage de finition.

La profondeur de passe n'a pas une influence remarquable comme les deux premiers paramètres mais elle a des inspirations sur l'état de la surface car lorsqu'on augmente

les profondeurs de coupe les efforts augmentent aussi ce qui engendre des vibrations du système usinant par exemple.

L'observation des résultats nous a permis de vérifier qu'il existe vraiment un effet remarquable de ces paramètres sur la couche superficielle des matériaux étudiés.

Donc, on peut dire que la maîtrise des conditions d'usinage est très importantes pour avoir des produits parfaits qui résistent aux charges imposées . Ainsi, la connaissance des paramètres de la nouvelle surface nous permet la vérification de la qualité de la couche superficielle. En plus, l'état de surface est un paramètre difficile à gérer car on ne peut pas avoir un état idéal pour une surface usinée. On peut dire que la qualité de la couche superficielle est la liaison entre les paramètres du procédé utilisé et le comportement en fatigue.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] Jean- Paul Bailon et Claude Bathias. Livre de Fatigue des matériaux et des structures. 2^{ème} édition revue et augmenté-Paris : Hermès-1997. ISBN 2 – 86601-617-3.
- [2] Fatigue des matériaux et des structures Tome1 : introduction, endurance, amorçage et propagation des fissures, fatigue oligocyclique et gigacyclique, p.24 à 29, p.85 à 87, ISBN 978-2-7462-1711-9.
- [3] Introduction à la fatigue (Wilképédia) sur le site du centre technique de l'industrie de la mécanique (CETIM).
- [4] R. Cazaud, G. Pomey, P. Rabbe et Ch. Janssen, La fatigue des métaux, Dounod, Paris, 5^{ème} édition, 1969.
- [5] Cours de Technologie de fabrication, 3^{ème} année licence. Dpt GMP. Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen. Algérie.
- [6] <http://www.prof-mpk.fr/Centre d'intérêt>. Le 05/06/2012.
- [7] Paulo Davim J., Campos Rubio J., Abrao A.M., « A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates », Composites Science and Technology 67, pp. 1939–1945, 2007.
- [8] Marques A. T., Durão L. M., Magalhães A.G., Silva J. F., Tavares J. M. R. S., « Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill », Composites Science and Technology 69, pp 2376–2382, 2009.
- [9] Ghidossi P., El Mansori M., Pierron F., « Effets des endommagements induits par le fraisage grande vitesse des composites sur leur comportement mécanique », CPI 2003, Meknès-Maroc, 2003.

[10] Taliaferro V., Caprine G., Diterlizzi A., « Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites. » International Journal of Machine Tools & Manufacture, 30(1), pp. 77-84, 1990.

[11] Yosra Turki, Malek Habak, Raphaël Velasco, Pascal Vantomme, Hugues Tortajada. Influence des paramètres de coupe sur la résistance à la traction des composites carbone/époxy lors du perçage Laboratoire des technologies innovantes. IUT d'Amiens, Dpt.GMP. Université de Picardie Jules Vernes, Avenue des facultés – Bailly- 80001-Amiens Cedex 1, France.

[12] Influence of machining parameters on fatigue endurance limit of AISI 4140 STEEL. Karina S. S. Lopes, Wisely F. Sales and Ernani S. Palma. Mechanical Engineering – Pontifical Catholic University of Minas Gerais - PUC Minas – Brazil

[13] The effect of machining on the surface integrity and fatigue life

Ataollah Javidi, Ulfried Rieger, Wilfried Eichlseder. Department of Mechanical Engineering. University of Leoben, Franz-Josef-Strabe 18, 8700 Leoben, Austria

[14] Etude de l'usinage de l'acier 42 CrMo4 a l'état recuit. Kh. Bouacha, L. Boulanouar, M.A. Yallese, K. Khoualdia, S. Belhadi. Centre universitaire de Souk Ahras, 41000 Souk Ahras, Algérie. Laboratoire Mécanique et Structure (LMS), Université de Guelma, Algérie.

[15] Modélisation de l'influence de la rugosité de la surface usinée sur la durée de vie en fatigue des alliages d'aluminium M. Suraratchai, J. Limido, C. Mabru, R. Chieragatti.

[16] C. Wiesner, H.U. Kunzi, B. Ilschner, Characterization of the topography of turned surfaces and its influence on the fatigue life of AL-7075, Materials Science and Engineering A145 (1991).pp. 151-158

[17] M. Suraratchai, Influence de l'état de surface sur la tenue en fatigue de l'alliage d'aluminium 7010, Thèse de doctorat Université Paul Sabatier ENSICA (2006)

[18] Leskovar P. & Peklenik J. 1982 Influences affecting surface integrity in cutting Processes, Annals of the CIRP, Vol.31/1, pp.447-450.

- [19] Hua J., Umbrello D. & Shivpuri R. 2006 Investigation of cutting conditions and cutting edge preparations for enhanced compressive subsurface residual stress in hard turning of bearing steel J Mat Proc Tech 171, pp. 180-187.
- [20] Tonshoff H.K. & Brinksmeier E. 1980 Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhardness and residual stresses analysis, Annals of the CIRP, Vol29/2, pp.519-530.
- [21] Field M. & Kahles F. 1971 Review of surface integrity of machined components, Annals of the CIRP, Vol.20/2, pp.153-163.
- [22] Koster W. P., Fritz L.J. & Kohls J.B. 1971 Surface integrity in machining of 4340 steel and Ti-6Al-4V, Society of Manufacturing Engineers, SME Tech Paper no IQ71-237, Dearborn Mich.
- [23] Suraratchai M., Mabru R., Chieragatti R. & Aria F.R. 2005 Influence des gammes d'usinage sur la tenue en fatigue d'un alliage léger aéronautique, 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes.
- [24] Gaceb M. 1985 an investigation of micro crack formation on machined surfaces, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical and Production Engineering, Sheffield City Polytechnic, July.
- [25] Suhr R.W. 1986 the effect of surface finishes on high cycle fatigue of low alloy steel, Mechanical Engineering Publications, London, ISBN0-85298-614-7, pp.68-86
- [26] Bayomi M.R., Abdelatif A.K. 1995 Effect of surface finish on fatigue, Engineering. Fracture Mechanics 51(5), pp. 861-870
- [27] N. Guillemot, B.K. Mawussi, C. Lartigue, R. Billardon, Influence du fraisage sur l'intégrité de surface et la durée de vie en fatigue. 11ème colloque national AIP-Primeca (2009).