



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
La République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique



جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم

Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم المهندسة الميكانيكية

Département Génie Mécanique

N° d'ordre : M96/GM/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**ETUDE DES PARAMÈTRES DES TRAITEMENTS
MÉCANIQUES DE SURFACE EN VUE D'UNE DURÉE DE VIE
MAXIMALE EN FATIGUE**

Présenté par :

- ❖ SAAD AZZOUZ ADDA
- ❖ ZEBLOUDJI SIDAHMED ELHABIB

Soutenu le 07/07/2022 devant le jury composé de :

Président

Université de Mostaganem UMAB

Examineur

Université de Mostaganem UMAB

Encadrant

Dr. Benkhettab.M

Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021/ 2022

RESUME

ABSTRACT

ملخص

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur,
Dr BENKHETTAB.M pour son soutien, ses encouragements et surtout
sa disponibilité pendant cette année.

Je remercie également très sincèrement Pr GUECHICHI HOCINE pour
avoir accepté à présider le jury de soutenance ; son assistance est un
honneur pour nous.

Nous exprimons nos plus vifs remerciements et notre gratitude à Mme
CHENINE qui a aimablement accepté de faire partie de notre jury

Nous adressons notre respect et notre profonde reconnaissance à nos
enseignants, sans exception.

Nous tenons à remercier sincèrement tous ceux qui nous ont aidé de
prés ou de loin.

Nous ne saurons jamais assez à remercier les responsables et le
personnel de la faculté des sciences et de la technologie de L'Université
Abdelhamid ibn badis, dont la disponibilité et la courtoisie ont été
constantes à notre égard.

Merci à tous les membres de nos familles qui ont su nous apporter le
soutien moral indispensable à la réalisation de ce modeste travail ; qu'ils
en soient remerciés.

DEDICACES

Sommaire

LISTES DE FIGURES LISTES DU TABLEAUX

NOTATION

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| CHAPITRE I LES TRAITEMENTS DE SURFACE | 2 |
| I.1 INTRODUCTION | 3 |
| I.2 Traitements de précontrainte | 3 |
| I.2.1 Traitements thermiques | 4 |
| I.2.2 Traitements thermochimiques | 4 |
| I.2.3 Traitement mécanique | 4 |
| I.3 Le grenailage de précontrainte | 5 |
| I.3.1 Grenailleuses | 6 |
| I.3.2 Grenailleuses à air comprimé | 6 |
| I.3.3 Grenailleuses à turbine | 6 |
| I.4 Paramètres du grenailage | 7 |
| I.4.1 Paramètres intrinsèques au procédé..... | 7 |
| I.4.1.1 Vitesse de projection..... | 7 |
| I.4.1.2 Diamètre de la bille..... | 8 |
| I.4.1.3 Angle d'incidence θ | 9 |
| I.4.1.4 Débit | 9 |
| I.4.1.5 Durée d'exposition..... | 9 |
| I.4.1.6 Taux de recouvrement | 9 |
| I.4.2 Paramètres intrinsèques aux matériaux | 9 |
| I.4.2.1 Masse volumique (billes) : | 9 |
| I.4.2.2 Duretés (billes et pièce) : | 10 |
| I.4.2.3 Loi de comportement : | 10 |
| I.4.2.4 Contrôle du procédé..... | 10 |
| I.4.2.5 Intensité d'Almen, courbe de saturation | 10 |
| I.5 Effet mécanique du grenailage | 12 |
| I.6 Facteurs influençant un traitement de grenailage | 13 |
| I.6.1 Effets des traitements de grenailage | 13 |
| I.7 Les principales conséquences du grenailage | 13 |
| I.7.1 Répartition de contraintes résiduelles | 13 |

| | |
|---|------------------------------------|
| I.7.2. Etat de surface | 13 |
| I.7.3 Galetage | 14 |
| I.7.4 Le choc laser | 15 |
| I.8 L'effet des traitements de surfaces sur la tenue en fatigue : | 16 |
| I.8.1 Grenailage et Choc laser : | 16 |
| Chapitre II: Généralités sur La Fatigue et Les Critères Multiaxiaux | 17 |
| II.1 Introduction Générale..... | 18 |
| II.2 Définition d'un phénomène de fatigue: | 18 |
| II.3 Courbes d'équiprobabilité de rupture | 19 |
| II.4 Les critères de fatigue uniaxiaux diagrammes d'endurance [4, 1,12]..... | 20 |
| II.4.1 Diagramme de Haigh : | 20 |
| II.4.2 Diagramme de Goodman : | 22 |
| II.4.3 Diagramme de Rôs : | 23 |
| II.4.4 Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers : | 24 |
| II.5 Courbe de Wöhler | 24 |
| II.5.1 Différents domaines d'endurance..... | 25 |
| II.5.2 Modélisation des courbes d'endurance | 25 |
| II.6 Classification des critères de fatigue multiaxiale | 26 |
| II.7 Critères empiriques | 26 |
| II.7.1 Critère de Hohenemser & Prager | 26 |
| II.7.2 Critère de Gough et Pollard | 26 |
| II.8 Critères globale | 27 |
| II.8.1 Critère de Sines | 27 |
| II.8.2 Le critère de Crossland | 27 |
| II.8.3 Critère de Papadopoulos I | 27 |
| II.8.4 Critère de Papadopoulos II | 28 |
| II.9 Critères énergétiques | 28 |
| II.9.1 Critère d'Ellyin | 28 |
| II.9.2 Critère de Macha | 28 |
| II.10 Critère de plan critique | 29 |
| II.10.1 Critère de Findley | 29 |
| II.10.2 Critère de Robert | 29 |
| II.11 Conclusion..... | Erreur ! Signet non défini. |

LISTES FIGURES

- Figure I.1 Exemple d'une buse de grenailleuse à air comprimé** __ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.2 Illustration d'une turbine de grenailage** _____ 8
- Figure I.3 Schéma représentatif des paramètres du procédé** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.4 Influence de la vitesse sur les contraintes résiduelles** _ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.5 Influence du diamètre des billes de grenailage sur les contraintes résiduelles** Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.6 Norme de l'éprouvette d'Almen** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.7 Mesure de la flèche d'Almen** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.8 Courbe de saturation** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.9 Courbe et temps de saturation** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.10 Représentation schématique de l'état de contrainte résiduelle provoquée par le grenailage de précontrainte** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.11 Acier avant / après grenailage** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.12 Différents types de galetage** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.13 Variation des contraintes résiduelles transversale et longitudinale mesurées en fonction de la charge appliquée** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.14 Profils des contraintes résiduelles dans une pièce en Inconel 718 traitée par choc laser** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure I.15 Amélioration de la tenue en fatigue par choc laser en confinement eau** Erreur ! Signet non défini.
-
- Figure II.1 Courbe montre L'amplitude de contrainte** _____ 20
- Figure II.2 Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques)** Erreur ! Signet non défini.
- Figure II.3 Diagramme de Haigh (résultats théoriques)** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure II.4 Diagramme de Haigh** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure II.5 Diagramme de Goodman** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure II.6 Diagramme de RôS** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure II.7 Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure II.8 Exemple de la courbe de Wöhler et les trois domaines d'endurance** Erreur ! Signet non défini.
- Figure II.9 Diagramme de Sines** _____ Erreur ! Signet non défini.
- Figure II.10 Contrainte normale choisie comme variable de comptage** Erreur ! Signet non défini.

Listes tableaux

Tableau 1 Différents traitements de surface _____ Erreur ! Signet non défini.

Tableau 2 Différents traitements mécaniques de surface _____ Erreur ! Signet non défini.

Tableau 3 Quelques modèles mathématiques de la courbe S-N __ Erreur ! Signet non défini.

NOTATION

| | |
|--------------------------------|---|
| σ, σ_a | Amplitude de la contrainte |
| $\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$ | Contrainte minimale et maximale à la traction |
| N_I | Nombre de cycles correspondent à une durée de vie limitée. |
| N_k | Nombre de cycles correspondent à une durée de vie illimitée. |
| N_R | Nombre de cycles à la rupture |
| $a(N), b(N)$ | Paramètres de fatigue à N Cycles |
| a, b, c, α, β | Paramètres de fatigue liés aux critères de fatigue. |
| K_t | Coefficient de concertation contrainte |
| K_f | Facteur effectif de concentration de contrainte en fatigue |
| E | Module de Young |
| ν | Coefficient de Poisson |
| σ_e | Limite d'élasticité |
| f_{-1} | Limite d'endurance en traction alternée symétrique |
| τ_{-1} | Limite d'endurance en torsion alternée symétrique |
| G | module de cisaillement |
| P_{\max} | Pression hydrostatique maximal |
| P_m | Pression hydrostatique moyenne |
| J_2 | Deuxième invariant du tenseur déviateur de contraintes |
| J_{2a} | Deuxième invariant du tenseur déviateur des amplitudes |
| $f_{-1}(N)$ | Limite de fatigue en flexion alternée symétrique à N Cycles |
| $\tau_{-1}(N)$ | Limite de fatigue en torsion alternée symétrique à N Cycles |
| ξ_a | la racine carrée de deuxième invariant du déviateur de contrainte |
| σ_{eq} | Contrainte équivalente de Crossland |
| $\bar{\sigma}_m$ | Tenseur de contrainte moyenne. |
| $\bar{\sigma}_a$ | Tenseur de contrainte amplitude. |
| $\bar{\sigma}_R$ | Tenseur des contraintes résiduelles |
| $\bar{\sigma}_R$ | Contrainte résiduelle |
| ϵ_p | Déformation plastique |
| $\tau_{-1}(N, \epsilon_p)$ | Limite de fatigue à N cycles en torsion alternée pour un matériau traité à une déformation plastique ϵ_p . |
| $\tau(\epsilon_p)$ | Amélioration de la limite de fatigue due à une déformation plastique ϵ_p |

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I
Les Traitements de Surface

I.1 INTRODUCTION

Les traitements de surface sont des procédés industriels qui modifient l'état de la surface d'un matériau afin d'améliorer certaines propriétés comme résistance à la corrosion, résistance à l'usure et la résistance à la fatigue.

Ce chapitre est consacré aux traitements de surfaces qui améliorent la tenue en fatigue par création des contraintes résiduelles de compression dans les couches superficielles.

Nous allons démontrer dans ce chapitre que l'introduction des contraintes résiduelles de compression est associée à une augmentation de la tenue en fatigue.

Les traitements de surfaces permettent d'utiliser un matériau moins cher, en améliorant localement ses propriétés et d'allier les propriétés propres du matériau (propriétés à cœur) et les propriétés de surface.

I.2 Traitements de précontrainte

L'amélioration des propriétés locales de l'acier par un traitement de surface peut se faire par voies thermiques, thermochimiques ou encore mécaniques. Ces différents traitements ont en commun les qualités suivantes:

Ils permettent d'augmenter la dureté en surface, par écrouissage ou par transformations métallurgiques. L'augmentation de dureté garantit généralement une bonne résistance aux efforts de fatigues, en minimisant les dommages causés par l'usure et les effets en sous-couches dues aux chargements répétés [2].

Ils introduisent des contraintes de compression dans les couches superficielles, dues aux hétérogénéités de déformations au sein de la pièce (déformations plastiques, expansions volumiques dus aux changements de températures ou aux transformations des phases métallurgiques). Les contraintes résiduelles de compression améliorent significativement la limite d'endurance lors des efforts cycliques pour deux raisons: en s'opposant, d'une part, aux contraintes de traction résiduelles (causées par les procédés de fabrication par exemple) ou en service, elles diminuent l'effet de contrainte globale. Le risque de dépasser la valeur, de ce que Starker et al [3].

L'efficacité d'un traitement provient à la fois de l'effet de durcissement et de l'introduction de contraintes résiduelles de compression. Plusieurs auteurs ont essayé de séparer l'apport de ces deux phénomènes. Ils en ont conclu que le durcissement est surtout profitable à un matériau initialement doux, et que les contraintes sont favorables pour un matériau dur. Le tableau ci dessous regroupe les différentes catégories de traitements rencontrés dans l'industrie automobile et aéronautique [4] :

| Type de traitement | Origines principales des contraintes | Dénomination des traitements |
|---------------------------|---|--|
| Mécanique | Déformation plastique locale | Sablage, grenailage, martelage, galetage, polissage... |
| Thermique | Dilatation différentielle et | Trempe superficielle |

CHAPITRE I Les Traitements de Surface

| | | |
|----------------|--|---|
| | transformation de phase | |
| Thermochimique | Diffusion, dilation différentielle et transformation de phase, précipitation | Cémentation, nitruration, carbonituration.... |

Tableau I.1 Différents traitements de surface [4]

I.2.1 Traitements thermiques

Le procédé de traitement thermique d'un acier consiste à lui faire subir une variation de la température en fonction du temps. Le but étant d'améliorer les caractéristiques des matériaux pour une meilleure adaptation aux conditions en service. Il permet également de réduire les contraintes internes des matériaux, générées de par son histoire, qui peuvent être néfastes pour la pièce [5].

I.2.2 Traitements thermochimiques

Le traitement thermochimique consiste en une modification de la composition chimique de la couche superficielle par enrichissement d'un métal en éléments tels que carbone azote. Le milieu extérieur sature les couches superficielles en cet élément et celui-ci sera transporté par diffusion vers l'intérieur de la pièce. Il est utilisé pour obtenir une dureté superficielle encore plus élevée, tout en gardant la ductilité au cœur [5].

I.2.3 Traitement mécanique

Le traitement de surface mécanique est de plus en plus utilisé dans l'industrie pour améliorer les performances des pièces mécaniques, notamment leur résistance à la fatigue. C'est en raison des contraintes de contraintes résiduelles introduites dans la pièce qu'elles sont efficaces, mais les modifications de la microstructure et de la rugosité qu'elles provoquent sont également importantes. Il existe une série de méthodes de traitement entre les méthodes de traitement bien connues (telles que le grenailage) et les méthodes de traitement plus récentes (telles que le traitement par explosion). Il comprend le traitement de surface des pièces et des composants utilisent des billes d'acier, de céramique ou de verre pour effectuer des impacts multiples industriels, lancés à grande vitesse. Ces diverses méthodes sont présentées dans le tableau [5].

| Dénomination | Mises-en oeuvre | Profondeur de traitement | Avantages et inconvénients |
|---------------|--------------------------------|--|---|
| Tribofinition | Frottement | De 0,01 à 0,03 mm | Long et coûteux |
| Grenailage | Projection contrôlée de billes | De 0,1 à 0,6 suivant les conditions et matériaux | Quelques problèmes d'incrustation, de micro défauts et parfois de rugosité. |

CHAPITRE I Les Traitements de Surface

| | | | |
|----------------------------|--|---------------|---|
| | | | Adaptation à toutes les Géométries |
| Martelage | Impact d'aiguille à extrémité sphérique | De 1 à 2 mm | Problèmes d'état de surface, ne s'applique qu'aux géométries simples |
| Galetage | Roulement d'un galet avec une forte force d'appui. | De 2 à 3 mm | Variation dimensionnelle, nécessite une géométrie particulière |
| Préconformage Autofrettage | Flexion, expansion avec passage en plasticité | Quelques mm | Traitement directionnel |
| Ondes de choc | Explosion laser impulsionnelle de très forte puissance | Jusqu' à 4 mm | S'adapte à toutes les géométries (pour le laser), pas de modification de l'état de surface (traitement en cours de développement) |

Tableau I.2 Différents traitements mécaniques de surface [6]

L'effet de ces traitements sur des matériaux permet de créer des déformations plastiques ainsi d'améliorer la tenue en fatigue. Les contraintes résiduelles et les déformations plastiques sont engendrées par une action mécanique (pression ou choc).

I.3 Le grenailage de précontrainte

Le grenailage de précontrainte (également appelé Shot Peening) est un traitement mécanique de surface dans le but de générer des contraintes résiduelles de compression, permettant d'améliorer la durée de vie d'une pièce. Il consiste à marteler la surface d'une pièce de grenailles (petites billes sphériques, en acier, céramique ou en verre), projetées à grande vitesse sous des conditions contrôlées. Les impacts déforment plastiquement la couche superficielle. La déformation en sous couche reste élastique. L'équilibrage global de la structure introduit des contraintes résiduelles de compression sur quelques dixièmes de millimètre. Le recouvrement total de la surface par un réseau d'empreintes suffisamment denses marque la fin de l'opération. Un profil uniforme de contraintes résiduelles est alors obtenu. De par son intérêt économique manifeste, comparé aux autres types de traitements, le grenailage demeure aujourd'hui le procédé le plus utilisé dans les industries [7].

I.3.1 Grenailleuses

Deux types principaux de grenailleuses sont utilisés dans l'industrie : les machines à air comprimé et les machines à turbine [5].

I.3.2 Grenailleuses à air comprimé

Les billes sont propulsées par de l'air comprimé au travers d'une buse (cf. figure I.1). Cette machine présente l'intérêt d'être maniable et automatisable. Les paramètres sont bien maîtrisés. Elle propose un jet de billes relativement directionnel. Ce procédé est ainsi utilisé pour des pièces à géométrie complexe ou pour des zones peu accessibles (surfaces intérieures). Les pièces sont traitées de manière unitaire. On peut également intégrer plusieurs buses d'orientations différentes pour traiter une pièce de forme complexe. Toutefois, cette machine nécessite un investissement et une maintenance lourds. Elle présente par ailleurs une capacité de production faible [5].



Figure I.1 Exemple d'une buse de grenailleuse à air comprimé [8].

I.3.3 Grenailleuses à turbine

Dans ces machines, les billes sont introduites au centre de la turbine, qui tourne à une vitesse de rotation bien définie. Sous l'effet de la force centrifuge, les billes sont entraînées et accélérées vers l'extérieur de la turbine pour enfin être projetées en gerbe sur la pièce. Comme on peut le voir sur la Figure I.2, la zone grenillée est beaucoup plus importante qu'avec le procédé précédent. Les paramètres sont moins maîtrisables, et plus particulièrement l'angle d'incidence (qui sera, du coup, compris dans une fourchette de valeurs). Ce procédé est plutôt destiné à des pièces de géométrie plus simple, ou à des pièces plus massives. Il est adéquat pour les chaînes de production où l'on traitera des quantités importantes de pièces similaires. Il en est de même pour des structures longues défilant en continu dans des machines en tunnel prévues à cet effet [5].

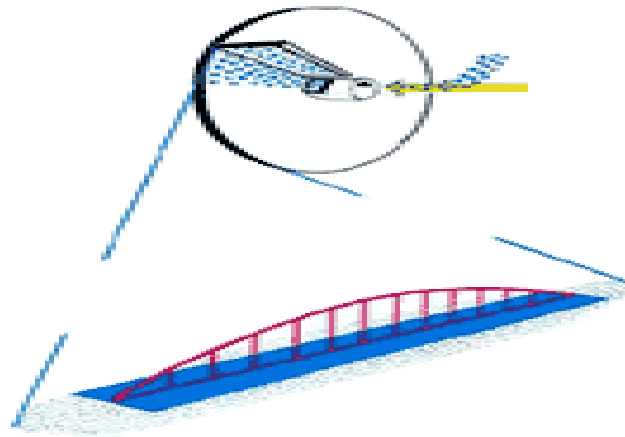


Figure I.2 Illustration d'une turbine de grenailage [9].

I.4 Paramètres du grenailage

Tous paramètres pouvant augmenter l'intensité de l'impact sont des facteurs importants et influents sur le résultat du grenailage [10]. Ces paramètres sont liés soit aux matériaux (billes et pièce), soit au procédé lui-même. Ces derniers sont multiples et à maîtriser impérativement. Non seulement pour atteindre l'objectif prévu pour la pièce, mais aussi pour éviter de la détériorer. En effet, les impacts provoquent obligatoirement de l'endommagement. Il s'agit constamment de trouver un meilleur compromis entre les avantages et les inconvénients. Le but étant naturellement d'éviter que les inconvénients ne surpassent les effets bénéfiques [11].

I.4.1 Paramètres intrinsèques au procédé

La figure I.3 illustre les différents paramètres liés au procédé du grenailage.

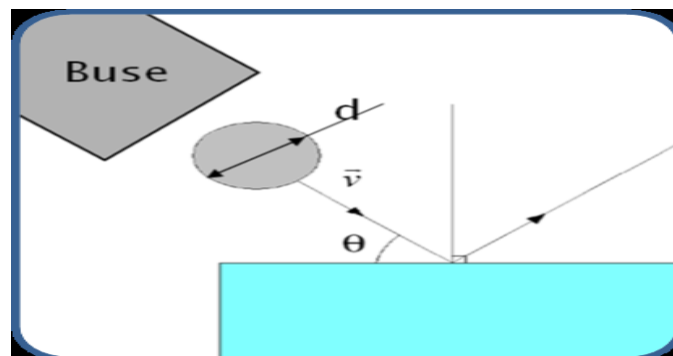


Figure I.3 Schéma représentatif des paramètres du procédé

I.4.1.1 Vitesse de projection

Elle intervient directement dans l'expression de l'énergie cinétique de la bille, ce qui en fait un paramètre primordial. Elle est généralement comprise entre 20 et 100 m/s pour les grenailleuses traditionnelles. Elle augmente la zone affectée par le traitement et le niveau maximal de contrainte (figure I.4). Peu de méthodes permettent de mesurer cette vitesse expérimentale. La société WHEELBRATOR ALLEVARD a développé une méthode de mesure nommée TRAVEL. Les variables qui influent sur la vitesse sont la vitesse de rotation

de la turbine ou de l'air, le diamètre de la buse de tir, le diamètre et la position de l'injecteur sur le jet d'air et la distance entre la pièce à grenailler et la buse. Une distance trop éloignée peut en effet causer une perte de vitesse du média, donc de l'énergie cinétique [12].

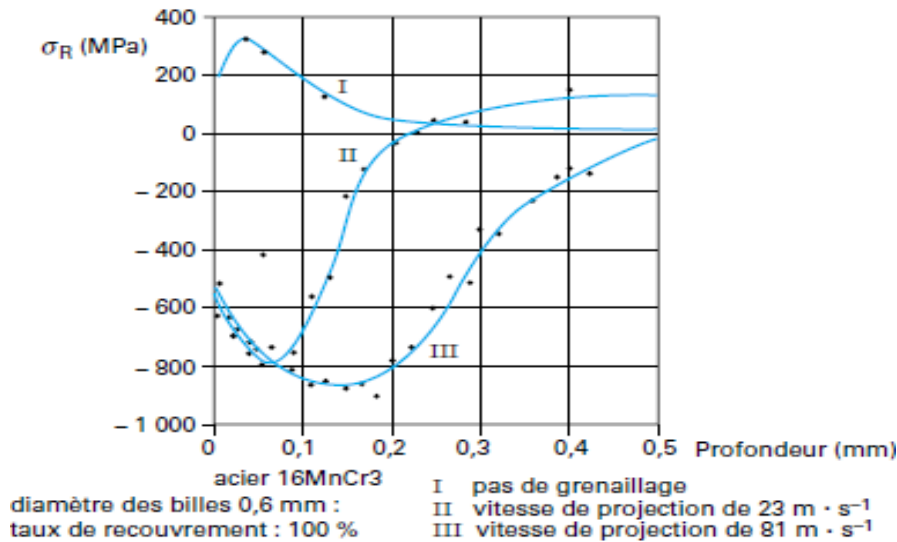


Figure I.4 Influence de la vitesse sur les contraintes résiduelles [13].

I.4.1.2 Diamètre de la bille

Il détermine le poids de la bille pour un matériau donné. Il aura une influence sur les déformations engendrées, et donc sur la rugosité. Il affecte la durée de traitement dans la mesure où toute géométrie angulaire est à proscrire afin d'éviter de créer des amorces de rupture en surface de la pièce lors des impacts. On attache donc une grande importance au tri des billes usagées afin de contrôler leur usure. La zone en compression augmente avec la dureté. La profondeur où le niveau de contrainte est maximal s'éloigne de la surface quand la taille de la bille augmente, comme l'illustre la figure I.5. Mais, celle-ci ne semble pas affecter de façon notable la valeur de ce niveau maximal de contrainte [13].

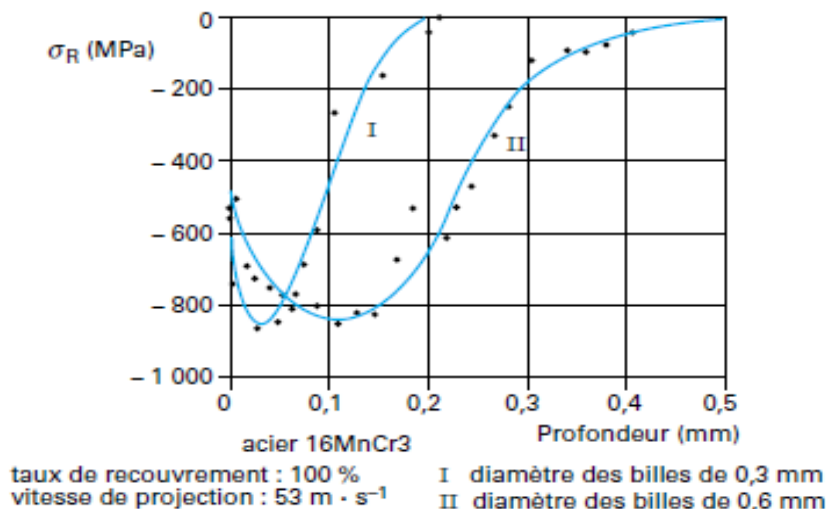


Figure I.5 Influence du diamètre des billes de grenailage sur les contraintes résiduelles [13].

I.4.1.3 Angle d'incidence θ

En général l'angle d'incidence est d'environ 85° [14] pour éviter des interférences entre les billes projetées et celles ayant rebondi sur la pièce. Cependant cet angle d'incidence peut varier entre 30° et 90° en fonction de la géométrie à traiter. L'angle d'incidence influe sur l'énergie emmagasinée par la pièce [15].

I.4.1.4 Débit

Le débit correspond au nombre de billes projetées par unité de temps. Il dépend des réglages de la grenailleuse : diamètre de la buse ou de l'injecteur, pression d'utilisation, de la granulométrie du produit rejeté et du nombre de turbines. Il influence considérablement l'intensité du grenailage. En effet, l'énergie cinétique diminue avec la quantité de grenailles projetées, du fait de l'interaction entre elles [15].

I.4.1.5 Durée d'exposition

C'est le temps pendant lequel la surface à traiter est soumise au bombardement des grains. De sa durée découlera un état de surface plus ou moins propre ou mécaniquement traité. La durée conditionne le nombre d'impacts sur la pièce. Elle conditionne les déformations plastiques cumulées dans la couche affectée par le traitement. Le temps ayant une incidence directe sur le coût, on s'efforcera de le réduire. Par l'augmentation du débit, par la mise en œuvre de mouvements des pièces ou mouvements du jet les plus efficaces possibles pour obtenir la meilleure couverture [15].

I.4.1.6 Taux de recouvrement

Le taux de recouvrement est le rapport entre la surface des impacts et la surface à grenailer. Un taux de 100% indique que la surface de la pièce est entièrement grenillée.

Le temps nécessaire pour obtenir ce recouvrement est appelé temps de base. On parle du taux de recouvrement de 200 ou 300% quand ce temps est multiplié par 2 ou 3 [16]. Il est à noter qu'un temps de recouvrement de 100% ne signifie pas forcément que le matériau ait atteint son état de saturation. Certains matériaux (alliage d'aluminium) peuvent atteindre un taux de recouvrement de 800%. Dans la pratique, la sécurité impose de limiter le temps de grenailage correspondant à un taux de recouvrement environ 150%. L'examen visuel à la loupe reste la méthode la plus utilisée pour déterminer ce paramètre [17].

I.4.2 Paramètres intrinsèques aux matériaux

Ces paramètres correspondent aux caractéristiques mécaniques et physiques des matériaux utilisés, tant pour la bille que pour la pièce. Le choix de billes à employer doit être fait selon les caractéristiques du matériau à traiter [17].

I.4.2.1 Masse volumique (billes) :

Elle détermine le poids de la bille pour une dimension donnée, et, donc, entrera en compte dans l'énergie cinétique de la bille [17].

I.4.2.2 Duretés (billes et pièce) :

Le procédé étant basé sur la déformation plastique, il est souvent nécessaire que les billes soient au moins aussi dures que la pièce afin que ce soit cette dernière qui subisse les déformations principales. La rugosité superficielle finale est influencée par la dureté de la bille et de la pièce. Une bille de faible dureté est, dans certain cas, utilisée en augmentant l'intensité afin de répondre aux exigences particulières de l'état de surface [17].

I.4.2.3 Loi de comportement :

On notera aussi l'importance du comportement élasto-visco-plastique du matériau de la pièce. Chaque point de la surface peut être impacté plusieurs fois pour assurer un bon recouvrement. Sous l'effet de l'écroutissage, certains matériaux vont se durcir, d'autres vont avoir tendance à s'adoucir, et les autres ne vont pas évoluer. Le caractère dynamique de l'impact complexifie d'avantage le phénomène. Hakimi explique que pour les matériaux dont la dureté est inférieure à celle de la bille, cet effet dynamique n'affecte qu'une petite couche proche de la surface. Il augmente la valeur de contrainte résiduelle en extrême surface [18].

I.4.2.4 Contrôle du procédé

Les facteurs qui agissent sur le résultat du grenailage sont variés. Et les innombrables combinaisons possibles de traitement rendent le procédé difficilement paramétrable. Des méthodes ont donc été élaborées afin d'assurer la robustesse et la répétitivité de l'opération. De plus, une exposition trop longue ou trop intense au jet de grenaille peut entraîner un phénomène de « sur-grenailage » à l'origine de l'apparition de défauts superficiels tels que replis et fissures [19].

I.4.2.5 Intensité d'Almen, courbe de saturation

Il s'agit d'un repère technologique mis au point par Almen (Général Motors, USA) et universellement adopté (Norme AFNOR NFL 06-832, présentée à la figure I.6). On utilise une éprouvette en acier au carbone de type XC65 trempée et revenue, bridée sur un support et exposée à un jet de grenaille, au voisinage immédiat des pièces à grenailer. Lorsque l'éprouvette est libérée de ses brides, elle se déforme car la face grenailée est allongée. On observe alors une flèche caractéristique appelée flèche d'Almen (figure I.7). Les normes définissent trois types d'éprouvettes N, A, C. A titre d'exemple, un grenailage d'intensité Almen F15A se traduit F: Norme Française, 15: flèche de 0.15mm, A: éprouve de type A [20].

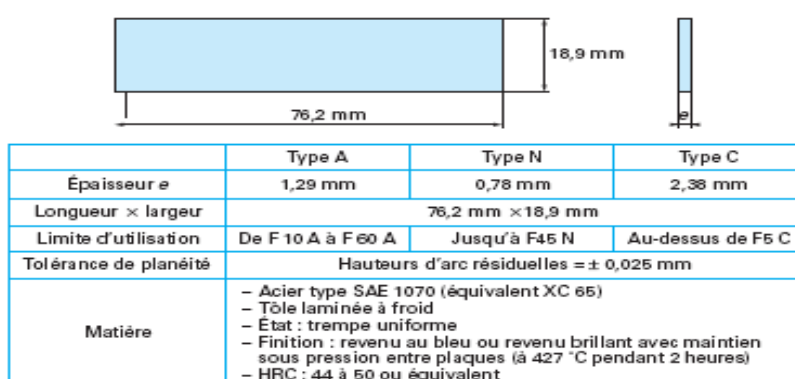


Figure I.6 Norme de l'éprouvette d'Almen [16].

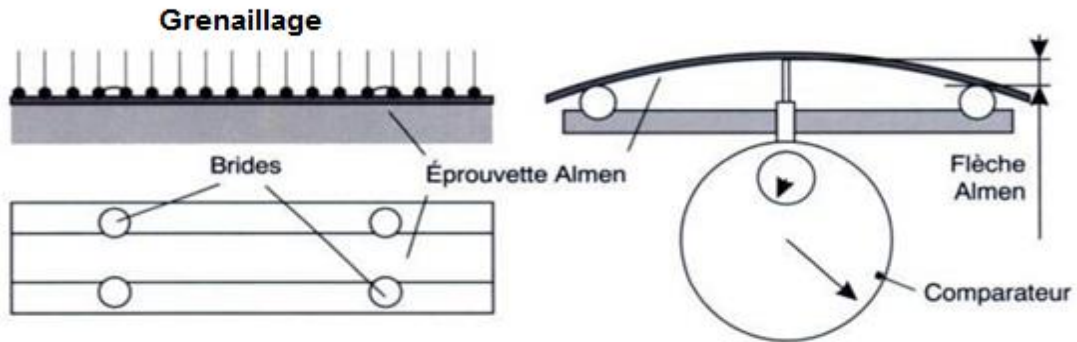


Figure I.7 Mesure de la flèche d'Almen [21].

La Figure I.9 illustre l'utilisation de la flèche d'Almen. Elle est obtenue en traçant la courbe de saturation en fonction du temps d'exposition. Au bout d'un certain temps de grenaillage, la flèche n'évolue quasiment plus. Selon la norme, le temps de saturation est défini comme étant le temps d'expositions nécessaire pour obtenir la flèche Almen souhaitée dans des conditions telles que la flèche n'augmente pas plus de 10% lorsqu'on expose la pièce pendant $2t_s$ comme c'est illustré à la figure I.8 [21].

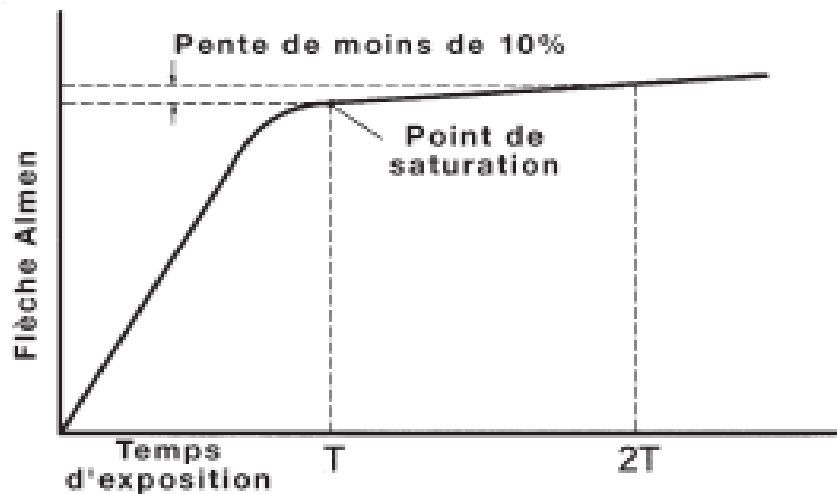


Figure I.8 Courbe de saturation [22].

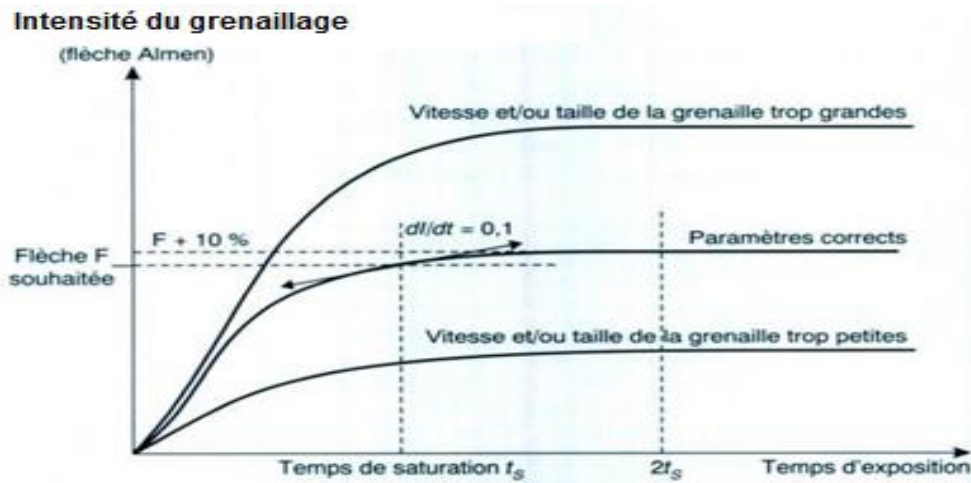


Figure I.9 Courbe et temps de saturation [21].

L'essai Almen permet de contrôler la reproductibilité d'une opération de grenailage dans des conditions données. Ce test n'est valable que dans des conditions précises appliquées à un matériau donné. En d'autres termes, deux flèches d'Almen obtenues dans des conditions d'essais différentes ne caractérisent pas le même effet. La flèche Almen ne définit ni le taux de recouvrement ni les contraintes résiduelles de la pièce. Elle ne prédit pas non plus l'évolution du matériau à traiter. Chaque matériau possède en effet sa propre loi de comportement.

I.5 Effet mécanique du grenailage

La création des contraintes résiduelles de compression sur la couche superficielle est le but principal du grenailage. Les contraintes résiduelles de compression permettent au matériau de subir des sollicitations plus importantes en service, et par conséquent d'améliorer la résistance de fatigue [23].

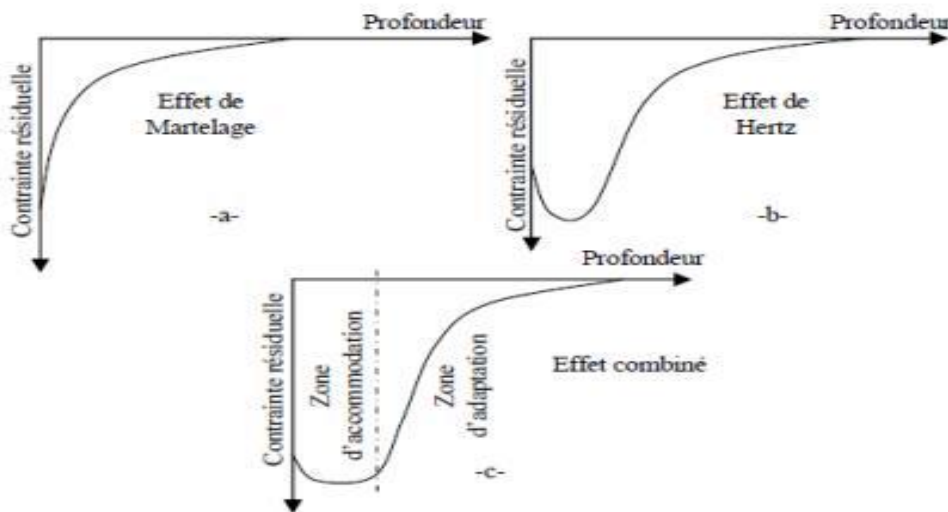


Figure I.10 Représentation schématique de l'état de contrainte résiduelle provoquée par le grenailage de précontrainte [23].

I.6 Facteurs influençant un traitement de grenailage

Le processus de grenailage a fait l'objet d'une vaste étude expérimentale au cours des dernières décennies. Tous les auteurs coïncident pour souligner la complexité du processus, en raison des multiples facteurs impliqués: vitesse de l'impact, angle d'impact, flux massique des projectiles, type de projectile utilisé, degré de couverture (pourcentage de matériau ayant subi au moins un impact) et, bien sûr, les caractéristiques du matériau à traiter. La difficulté de mesurer certains de ces facteurs a conduit à la définition et au contrôle du processus en définissant les paramètres dits "de contrôle": intensité d'Almen, type de projectile (matériau et diamètre) et degré de couverture [24].

I.6.1 Effets des traitements de grenailage

Les traitements de grenailage induisent, dans une plus ou moins grande mesure, des effets différents sur les pièces traitées. Les principes fondamentaux sont :

- La modification de l'état de surface,
- La génération d'un champ de contraintes résiduelles de compression à la surface de la pièce.
- Le durcissement de la surface [24].

I.7 Les principales conséquences du grenailage

I.7.1 Répartition de contraintes résiduelles

Ces contraintes peuvent résulter de l'effet de sollicitations extérieures ou être résiduelles. Les contraintes résiduelles de compression sont déplacées au cœur de la pièce, et sont par conséquent, moins dangereuses. L'efficacité de contraintes résiduelles produites par le grenailage dépend de sa bonne répartition dans le matériau, du niveau maximal de contraintes de compression atteint et de sa position, de la zone déformée plastiquement, et surtout de sa stabilité lors des chargements en service [5].

I.7.2. Etat de surface

Le grenailage peut permettre d'atténuer ou d'éliminer des effets de défauts dus aux procédés de fabrication, et de générer un état de surface isotrope dans toutes les directions du plan de la pièce. L'état de surface dépend de l'intensité du grenailage, donc de la vitesse de projection, de la nature de matériau de la bille et de la pièce. L'influence de la taille des grenailles sur l'état de surface n'est pas bien claire. Pour un matériau de dureté donnée, il existe une taille optimale de bille qui produit un meilleur état de surface. Afin d'améliorer l'état de surface, il est parfois nécessaire de recourir à un double grenailage, qui n'affecte pas énormément l'état de contraintes résiduelles obtenues avec un simple grenailage [5].

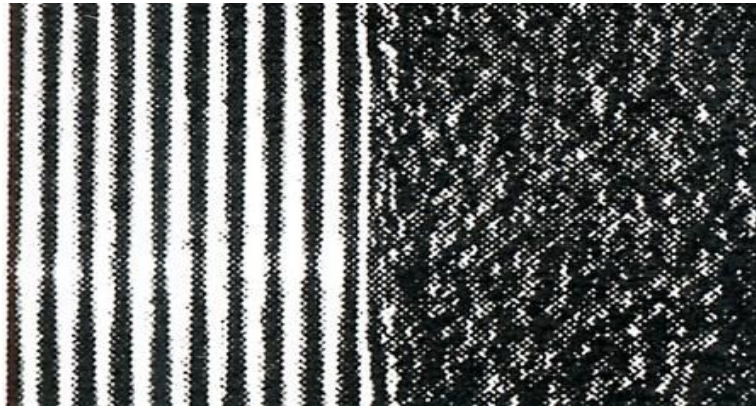


Figure I.11 Acier avant / après grenailage [25].

I.7.3 Galetage

Le galetage consiste à introduire une déformation plastique superficielle par application d'une force suffisante sur des pièces ébauchées par galets ou des billes qui roulent. Pour écraser le métal en surface on applique une force suffisante (la pression d'Hertz) exercée par l'outil sur la surface du matériau. Par conséquent on obtient, après décharge, des contraintes résiduelles de compression.

Le galetage est très employé, pour le traitement des congés de raccordement, en particulier sur les vilebrequins afin d'augmenter la résistance à la fatigue et d'obtenir des durées de vie supérieures à 10^9 cycles.

Les profils des contraintes résiduelles engendrées par galetage sont semblables à celles obtenues par grenailage (figure I.13) [26].

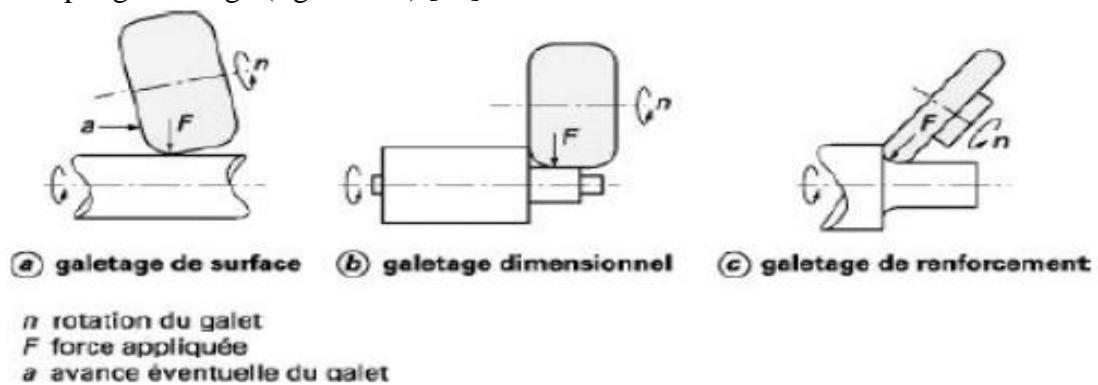


Figure I.12 Différents types de galetage [26].

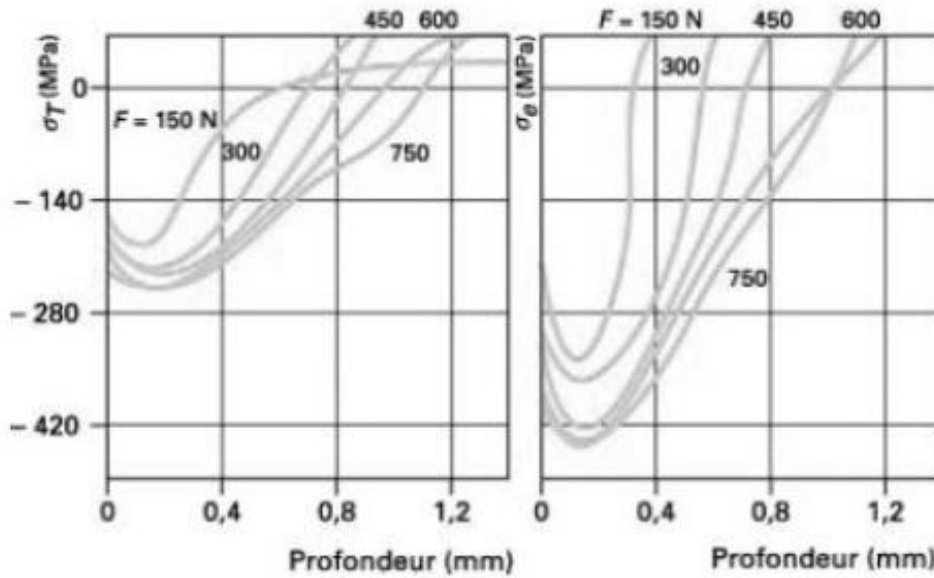


Figure I.13 Variation des contraintes résiduelles transversale et longitudinale mesurées en fonction de la charge appliquée [26].

I.7.4 Le choc laser

La puissance générée par une explosion ou par des impulsions laser est très grande. Cette puissance permet d'obtenir des pressions suffisantes pour créer une déformation plastique dans les couches superficielles de la pièce lorsque la limite d'élasticité du matériau est dépassée. Ce traitement consiste à soumettre la surface d'un matériau à un choc pendant quelques dizaines de nanosecondes, à une densité surfacique d'énergie allant de 100 à 200 J·cm⁻². Ceci provoque des pressions de choc, de l'ordre de 1 000 à 10 000 MPa, lesquelles introduisent localement des déformations plastiques dans les couches superficielles. La figure I.14 représente le profil de la distribution des contraintes résiduelles obtenues sur une pièce en Inconel 718 traitée par choc laser [27].

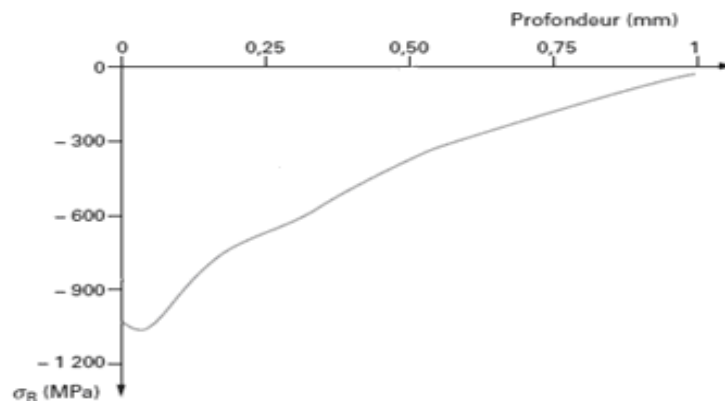


Figure I.14 Profils des contraintes résiduelles dans une pièce en Inconel 718 traitée par choc laser [27].

I.8 L'effet des traitements de surfaces sur la tenue en fatigue :

I.8.1 Grenailage et Choc laser :

Des nombreuses études ont montré l'intérêt du procédé vis-à-vis de la tenue en fatigue. A titre d'exemple sur les alliages d'aluminium (Al 7075) on a montré une amélioration de la limite d'endurance à 10^7 cycles (+25 % environ) par rapport aux limites atteintes par le grenailage de précontrainte (+12 %). L'origine de cette amélioration est attribuée à l'état de surface qui est meilleur dans le cas du choc laser, limitant ainsi les micro-concentrations de contrainte, ce qui engendre des durées d'amorçage plus importantes [28].

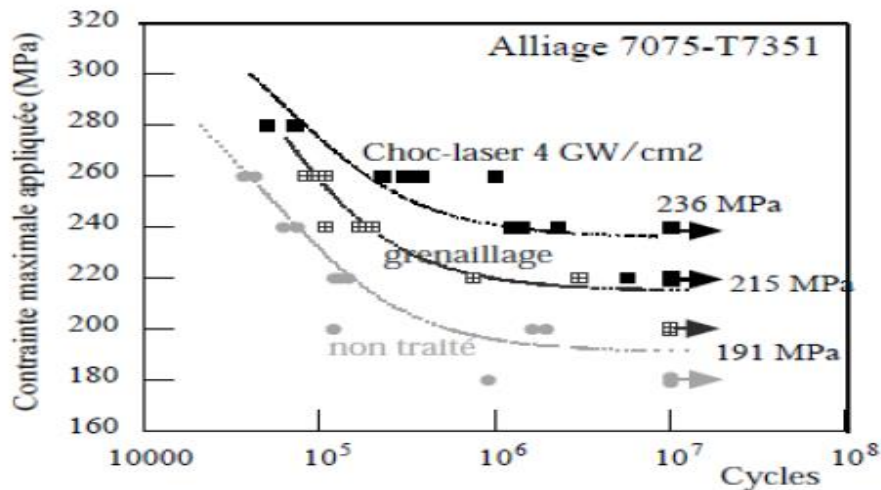


Figure I.15 Amélioration de la tenue en fatigue par choc laser en confinement eau [28].

Ce traitement permet aussi l'amélioration des propriétés tribologiques des surfaces. Ce traitement est utilisé surtout pour les pièces travaillant en milieu agressif (corrosion).

Chapitre II:
Généralités sur La Fatigue et
Les Critères Multiaxiaux

II.1 Introduction

La fatigue ou endommagement par fatigue est une des principales causes de rupture des matériaux. On entend par ce terme, la dégradation progressive d'une structure soumise à des chargements cycliques, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures qui entraînent la rupture des structures. Ce qui caractérise la fatigue et qui la rend néfaste est qu'elle peut se produire à des niveaux de contrainte apparemment faible et inférieur à la limite d'élasticité du matériau.

Historiquement la fatigue des matériaux a été testée, pour la première fois, sur des éprouvettes de petites dimensions et pour différents matériaux avec l'application de différents modes de sollicitation (traction, torsion, flexion, ...). La modélisation mathématique du phénomène et l'estimation de durée de vie des structures est nécessaire pour éviter les arrêts et les pannes des mécanismes et des machines. Dans le cas des sollicitations multiaxiales les chargements sont dirigés suivant différentes directions. Par exemple un arbre de transmission est soumis à des forces de torsion et de flexion. Pour estimer la durée de vie de cet arbre nous utilisons les critères de fatigue. Pour élucider ce problème nous avons consacré ce chapitre à l'étude de la fatigue ainsi qu'aux critères de fatigue.

II.2 Définition d'un phénomène de fatigue:

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés du matériau suite à l'application de cycles d'efforts, dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces [32].

Ou fatigue des matériaux : détérioration progressive des matériaux sans déformation apparente, aboutissant à une rupture. La fatigue d'un matériau résulte de l'application répétée de contraintes. La rupture par fatigue apparaît de façon soudaine et imprévisible, contrairement à l'usure, à la déformation ou à la corrosion, qu'il est possible de détecter bien avant la rupture. L'étude de la fatigue des matériaux est particulièrement importante ; elle permet de déterminer la résistance mécanique d'éléments de machines et de structures soumises à des contraintes périodiques ou à des vibrations [33].

Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle et σ par la valeur moyenne de la contrainte $\sigma(\mathbf{m})$; et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

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

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

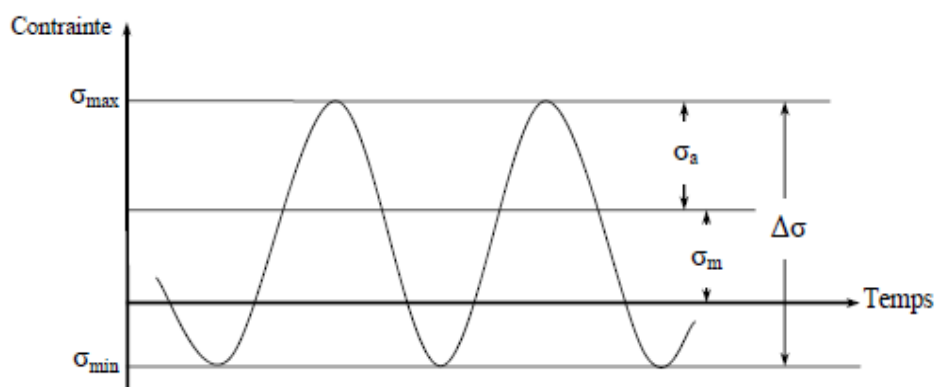


Figure II.1 Courbe montre L'amplitude de contrainte

Alternée symétrique : $\sigma_m = 0$, $R = -1$

- Alternée dissymétrique : $0 < \sigma_m < \sigma_a$, $-1 < R < 0$

- Répétée : $\sigma_m = \sigma_a$, $R=0$

- Ondulée : $\sigma_m > \sigma_a$, $0 < R < 1$

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 définir car à titre préventif, il détermine sa vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident.

II.3 Courbes d'équiprobabilité de rupture

(Courbes (P.S.N) dans les pays anglo-saxon)

La courbe de *Wöhler* dont nous venons de parler étant une courbe moyenne, son utilisation peut s'avérer délicate du fait que les valeurs relevées indiquent seulement que la pièce a « autant de chances de se rompre que de ne pas se rompre ».

Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de *Wöhler* constitue un cas particulier ($p=50\%$ de rupture) sont alors tracées en sous trayant à la valeur moyenne une certaine valeur fonction de la probabilité de rupture recherchée [34].

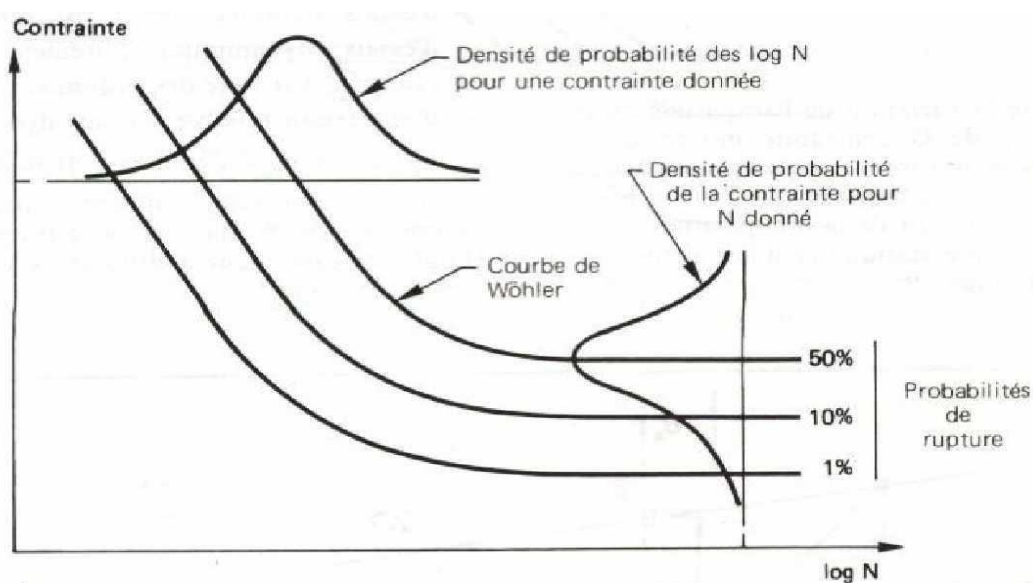


Figure II.2 Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [34].

II.4 Les critères de fatigue uniaxiaux diagrammes d'endurance [4, 1,12]

La courbe de Wöhler et la limite d'endurance sont déterminées pour une contrainte moyenne σ_m . Si cette contrainte moyenne augmente, la valeur de limite de fatigue diminue. On peut tracer l'évolution de $\sigma_D(N)$ pour différentes valeurs de la contrainte moyenne.

II.4.1 Diagramme de Haigh :

Ce diagramme représente la variation de l'amplitude de la contrainte σ_a en fonction de la contrainte moyenne σ_m , pour un nombre de cycles à rupture [35].

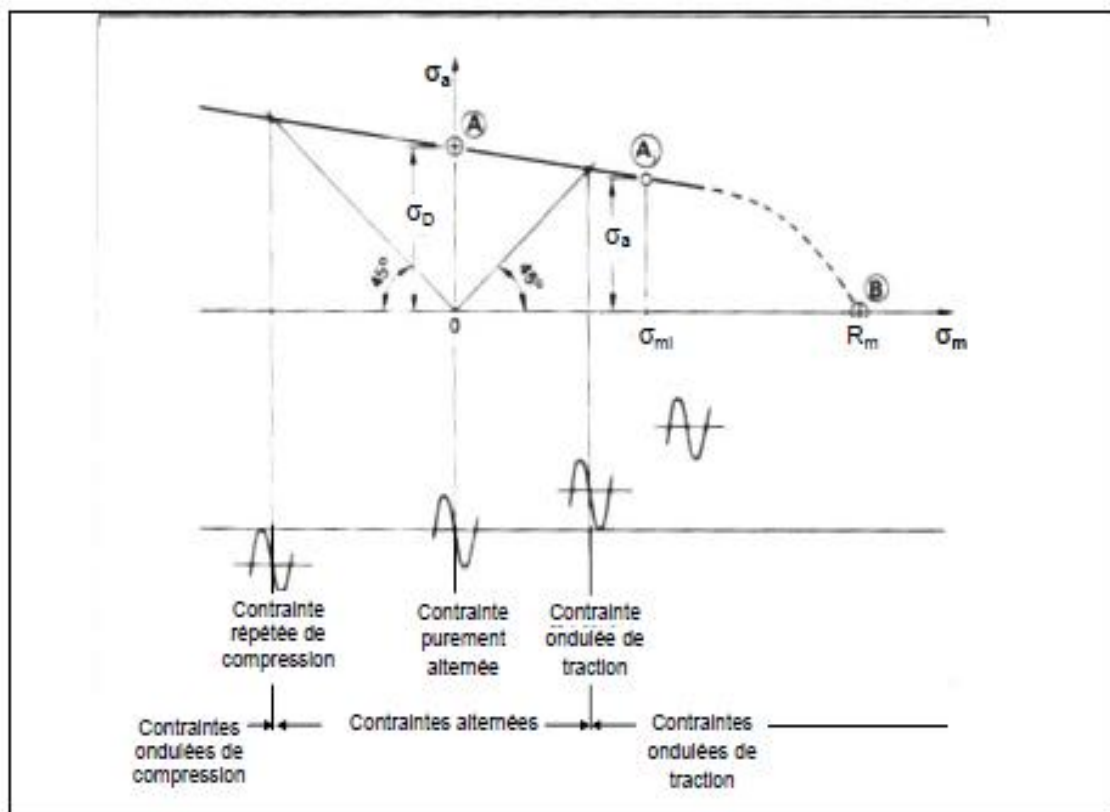


Figure II.3 Diagramme de Haigh (résultats théoriques) [35].

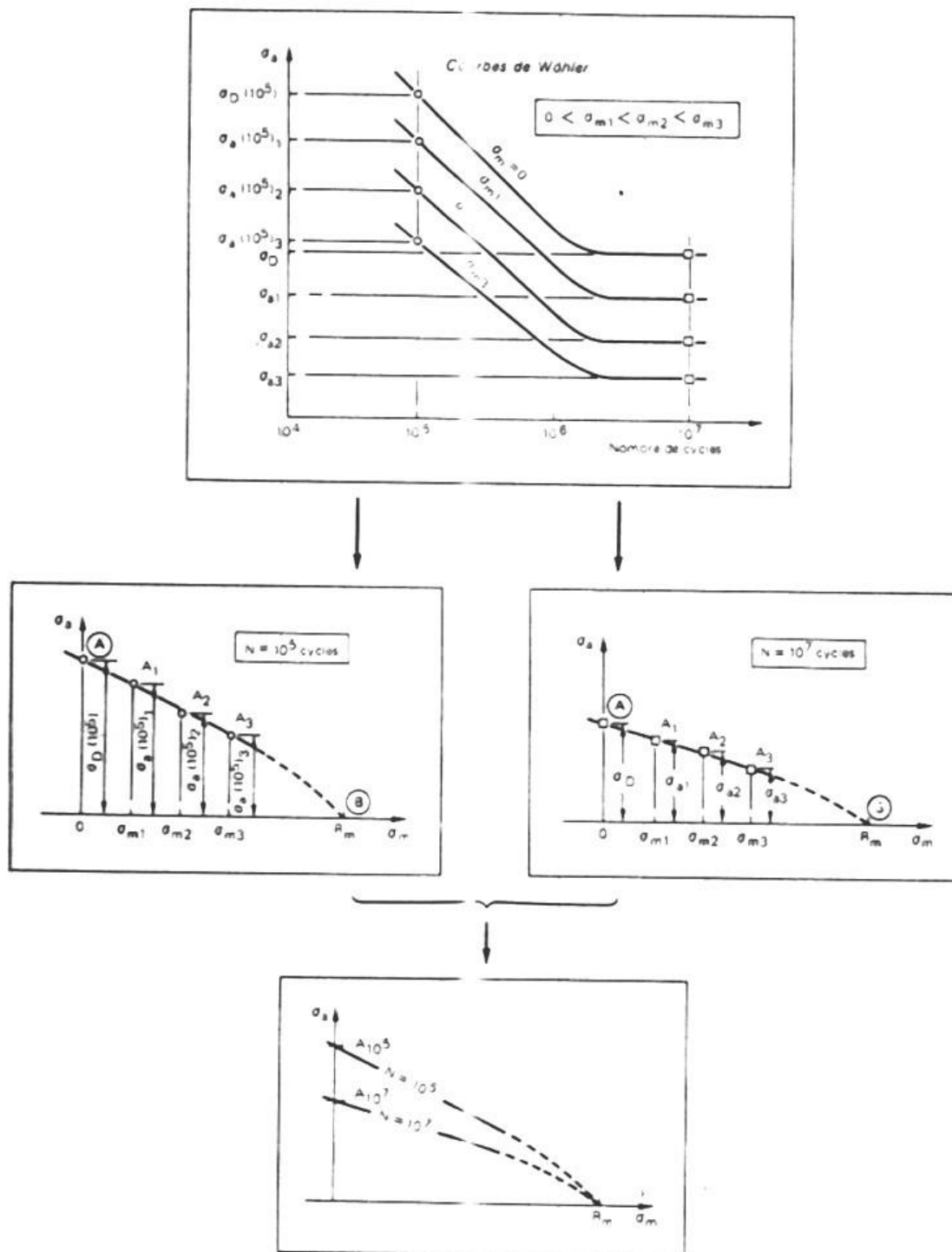


Figure II.4 Diagramme de Haigh [35].

II.4.2 Diagramme de Goodman :

Ce diagramme représente la variation des contraintes maximales σ_{max} et minimales σ_{min} en fonction de la contrainte moyenne figure (II.5) [35].

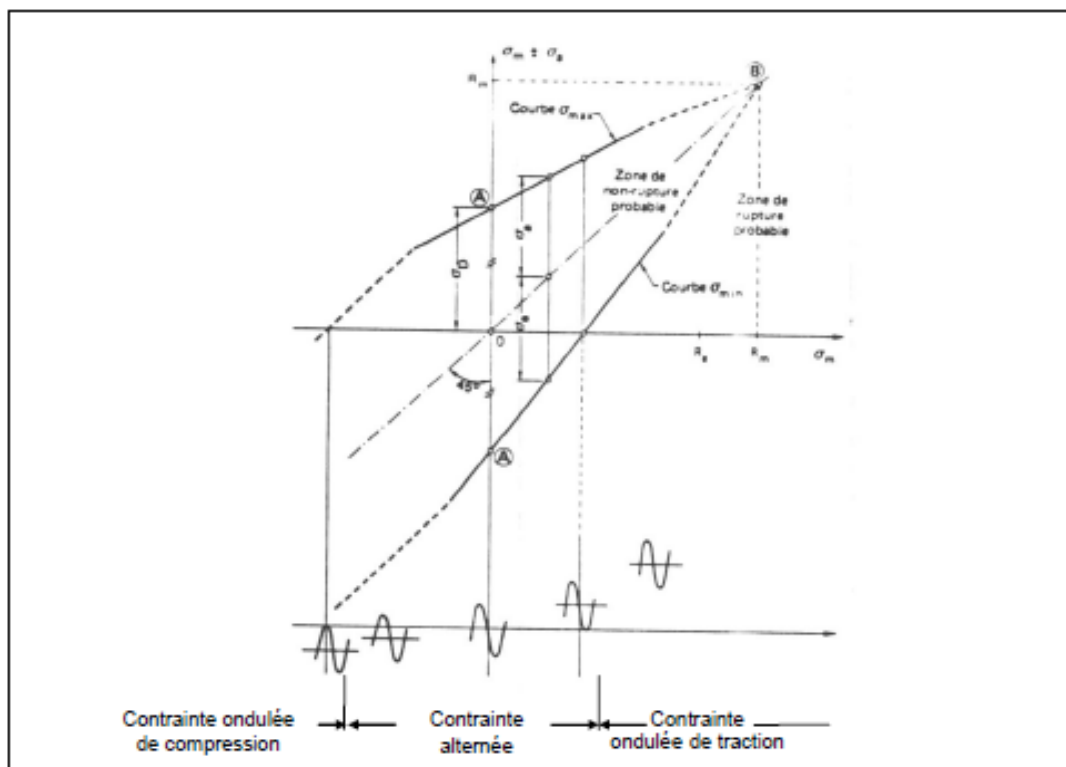


Figure II.5 Diagramme de Goodman [35].

II.4.3 Diagramme de Rôts :

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxon ce diagramme représente la variation de la contrainte maximale σ_{max} en fonction de la contrainte minimale σ_{min} figure (II.6) [35].

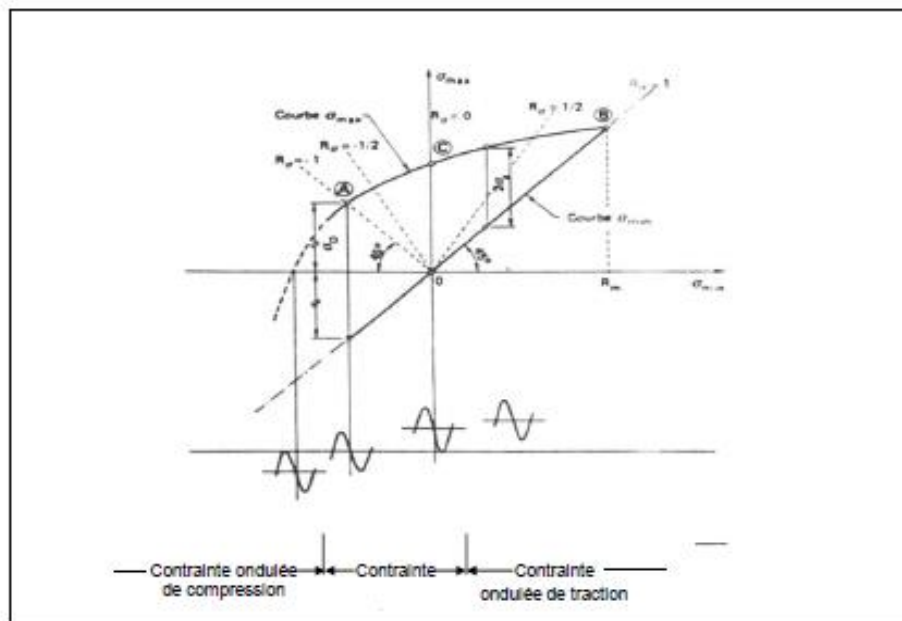


Figure II.6 Diagramme de Rôts [35]

II.4.4 Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers :

Relativement peu connu, essentiellement utilisé dans les pays germaniques, ce diagramme présente la variation de la contrainte maximale σ_{max} en fonction du rapport des contraintes $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ figure (II.7) [35].

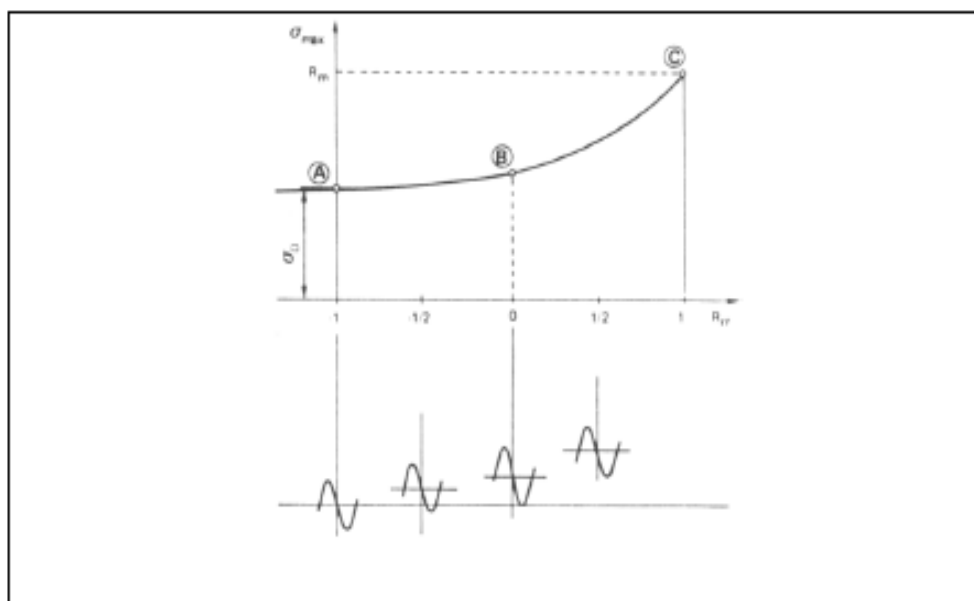


Figure II.7 Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers [35].

II.5 Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler (dite aussi la courbe S-N) représente la relation observée expérimentalement entre la durée de vie N , reportée conventionnellement en abscisse et l'amplitude du cycle contrainte $a \sigma$ (ou S), reportée en ordonnée.

Son tracé est issu d'une analyse statistique d'essais de fatigue. Les essais sont conduits à une valeur donnée de la contrainte moyenne sur un nombre aussi élevé que possible et suivant une méthode appropriée. Ainsi la courbe S-N représente, pour une probabilité de non rupture (en général 50%), la contrainte en fonction du nombre de cycles (à rupture).

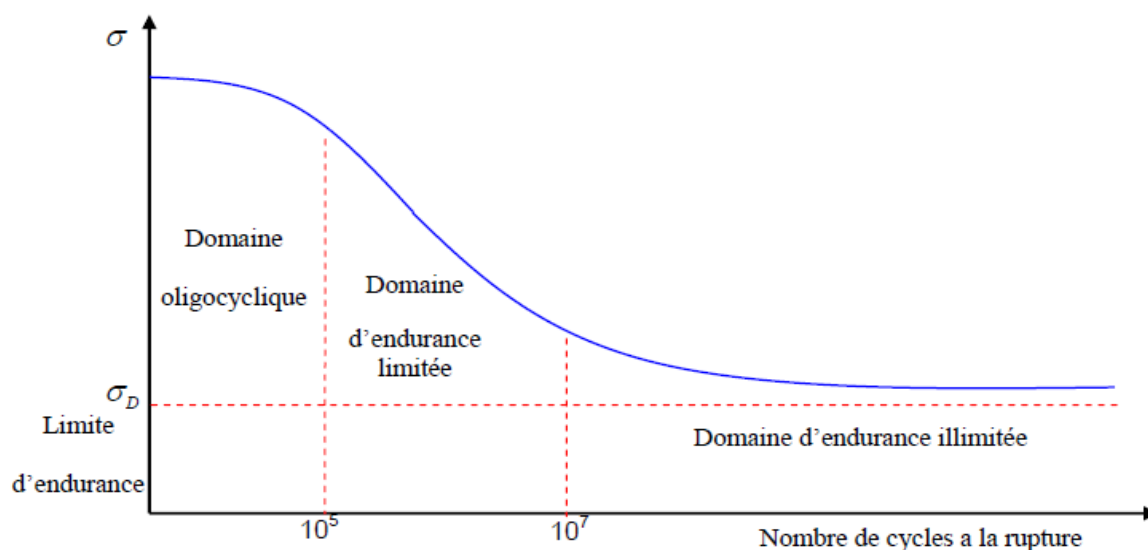


Figure II.8 Exemple de la courbe de Wöhler et les trois domaines d'endurance

II.5.1 Différents domaines d'endurance

Sur la courbe S-N, on peut distinguer trois domaines :

- Le premier se caractérise par le fait que les contraintes dépassent ou avoisinent le niveau de la limite d'élasticité; ce domaine correspond à la fatigue oligocyclique (faible nombre de cycles inférieur à 10^4).
- Le second traduit le domaine d'endurance limitée, la rupture qui intervient apparaît après l'application d'un nombre limité de cycles compris approximativement entre 10^4 et 10^6 selon le matériau; c'est le domaine dans lequel travaillent les structures qui, pour diverses raisons, doivent avoir des masses et des volumes impérativement réduits.
- Le troisième est le domaine d'endurance illimitée; au-dessous d'un certain niveau de contrainte (appelé limite d'endurance) et quel que soit le nombre de cycles effectués, la structure ne peut pas être rompue.

II.5.2 Modélisation des courbes d'endurance

Il existe, dans la littérature scientifique, plusieurs modélisations pour représenter les courbes de Wöhler comportant un nombre plus ou moins grand de paramètres, et traduisant une partie ou la totalité des trois domaines d'endurance.

Les plus connues sont représentées dans le tableau II.1 [36].

| Formule | Auteur |
|---|----------------------------|
| $\log(N) = a - b \sigma$ | WOHLER (1850) |
| $\log(N) = a - b \log(\sigma - E)$ ou $\sigma = E + (A/N)C$ Avec $A = ea$ et $C = 1/b$ | STROMEYER (1914) |
| $\sigma_a = \sigma_D + \left(\frac{C}{A + N_r} \right)^{\frac{1}{b}}$ | PALMGREEN (1924) |

| | |
|--|------------------------------|
| $\frac{\sigma_a - \sigma D}{\sigma_u - \sigma D} = \left(\frac{C}{A + N_r} \right)^{\frac{1}{b}}$ | WEIBULL (1949) |
| $N = \frac{A}{\sigma - E} \exp [-C \cdot (\sigma - E)]$ | CORSON (1955) |
| $N = \frac{A}{\sigma - E} \exp \left[-\left(\frac{\sigma - E}{B} \right)^c \right]$ | BASTENAIRE (1974) |
| $\log (N) = a - b \log (\sigma)$ | BASQUIN (1910) |

Tableau II.1 : Quelques modèles mathématiques de la courbe S-N [36].

A, B, C, E, a et b son des constantes déterminé par des essais expérimentales.

II.6 Classification des critères de fatigue multiaxiale

La bibliographie recense plus de 40 critères de fatigue multiaxiale. Au début des années 50, un nombre important de ces critères sont développé sont basés sur une fonction, généralement noté par *E*, cette fonction établit un paramètre, qui est en fonction de type de sollicitation et les propriétés de fatigue de matériaux étudié. La durée de vie *N* pour un état de chargement multiaxiale $[\sigma_{ij}(t)]$ est estimée lorsque la fonction de fatigue du critère *E* égale à l'unité (*E=1*).

II.7 Critères empiriques

II.7.1 Critère de Hohenemser & Prager [37]

Le critère de Hohenemser & Prager est établi en 1933, il a été obtenu à partir d'essais de traction-torsion où le cisaillement est variable et la contrainte normale de traction σ_m est statique.

$$\left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{Rm} \right)^2 \leq 1$$

II.7.2 Critère de Gough et Pollard [38]

A partir de nombreux essais de torsion-torsion combinées alternées symétriques sur différents aciers et deux fontes, Gough et Pollard ont déduit une relation empirique qui corrélait au mieux leurs résultats expérimentaux. Ils distinguent les matériaux ductiles des matériaux fragiles en proposant deux formulations décrivant des courbes de résistance à la fatigue dans le diagramme $(\sigma_a - \tau_a)$ pour une durée de vie donnée

- Pour les matériaux ductiles :

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{Fp,-1}^D} \right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}^D} \right)^2 \leq 1$$

Ou σ_a et τ_a sont respectivement les amplitudes des contraintes de flexion et de torsion, $\sigma_{Fp,-1}^D$ et τ_{-1}^D désignent les limites de fatigue respectivement en flexion plane et en torsion alternée symétriques. L'équation II.05 est l'équation d'une ellipse.

- Pour les matériaux fragiles :

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{F_{P,-1}}^D}\right) \times \left(2 - \frac{\sigma_{F_{P,-1}}^D}{\tau_{-1}^D}\right) + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}^D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{F_{P,-1}}^D}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_{F_{P,-1}}^D}{\tau_{-1}^D} - 1\right) \leq 1$$

Cette équation est un arc elliptique. Les deux formulations coïncident pour $\left(\frac{\sigma_{F_{P,-1}}^D}{\tau_{-1}^D}\right) = 2$

II.8 Critères globale

II.8.1 Critère de Sines [39]

En 1955, Sines a établi un critère basé sur une combinaison linéaire entre la pression hydrostatique moyenne et la racine carrée de deuxième invariant du déviateur de contrainte alternée. Sa formulation est la suivante:

$$\tau_a + aP_m \leq b$$

Les constantes a, b sont identifiables par des essais en torsion alternée et en flexion répétée :

$$b = \tau_{-1}$$

$$a = \frac{\tau_{-1} - \frac{f_0}{\sqrt{3}}}{\frac{f_0}{3}}$$

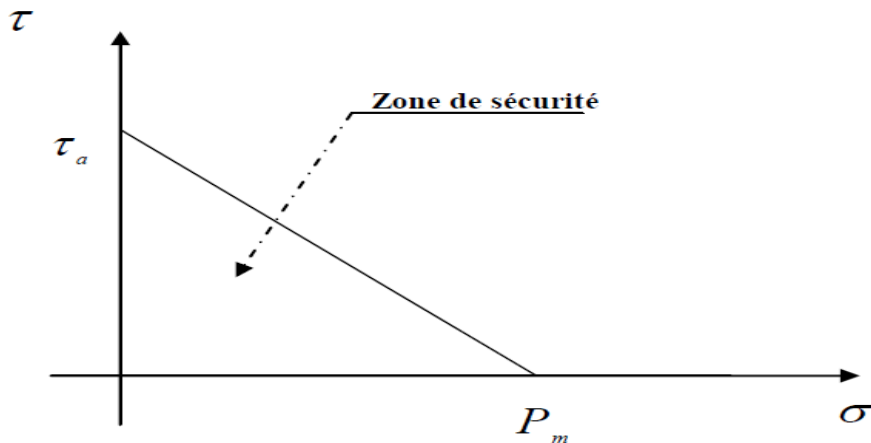


Figure II.9 Diagramme de Sines [39].

II.8.2 Le critère de Crossland [40]

Le critère est expliqué dans le chapitre trois.

II.8.3 Critère de Papadopoulos I [41]

Papadopoulos propose son premier critère en 1987, faisant partie des critères microscopiques, ce critère basé sur une intégration des amplitudes de cisssion sur un volume élémentaire, l'auteur propose la formulation suivante :

$$\frac{\max \sqrt{J_a^2(t) + \alpha P_{H\max}}}{\beta} \leq 1$$

Avec α et β des constantes de matériau peuvent être identifiées à l'aide de deux limites de fatigue, par exemple, en torsion alternée τ_{-1} et en flexion alternée σ_{-1} .

II.8.4 Critère de Papadopoulos II [42]

En 1993, Papadopoulos propose deux critères en distinguant entre les métaux doux et durs (la distinction est faite en fonction du rapport τ_{-1}/σ_{-1} des deux limites d'endurance propres au matériau).

-1) Pour les métaux doux : $\left(0.5 < \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} < 0.6\right)$

Dans ce premier cas, le critère s'écrit :

$$\frac{\max[T\sigma(\varphi, \gamma) + \alpha_1 \Sigma H_{\max}]}{\beta_1} \leq 1$$

Avec :

$$T\sigma(\varphi, \gamma) = \sqrt{\int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \tau_a^2(\psi, \varphi, \gamma) d\varphi}$$

Le calcul de l'amplitude de la contrainte tangentielle τ_a est effectué par l'utilisation d'un plan défini en coordonnées sphériques en considérant une droite faisant un angle ψ sur le plan dont la normale est définie par ϕ et ϕ en coordonnées sphériques.

Les expressions des constantes α_1 et β_1 sont suivantes:

$$\alpha_1 = \sqrt{\pi} \frac{\tau_{-1}^{\frac{\sigma_{-1}}{2}}}{\sigma_{-1}^{\frac{3}{2}}}$$

$$\beta_1 = \sqrt{\pi \tau_{-1}}$$

-2) Pour les métaux durs $\left(0.6 < \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} < 0.8\right)$

II.9 Critères énergétiques [43]

Le concept de l'énergie de déformation plastique a été utilisé pour corréler la résistance à la fatigue multiaxiale, en particulier dans le domaine oligocyclique. Il y a également eu un certain nombre de recherches, dans laquelle l'énergie de déformation élastique est ajoutée à l'énergie de déformation plastique afin de faire face à la fatigue multiaxiale du polycyclique. Dans cette section nous allons citer les Critères énergétiques les plus utilisés.

II.9.1 Critère d'Ellyin [44]

Ellyin a supposé comme point de départ que l'endommagement d'un matériau est le résultat de l'énergie de déformation plastique sur un cycle de chargement. L'auteur a proposé ce critère en premier lieu pour le domaine oligocyclique, en suite il a fait une extension à la fatigue à grand nombre de cycles. Ellyin propose de relier la densité d'énergie de déformation à la durée de vie des métaux en fatigue multiaxiale, équation (II-32).

$$\Delta W = \Delta W_p + \Delta W_e = k N^\alpha + c$$

Où ΔW correspond à la densité d'énergie de déformation et k , α et c sont des coefficients de matériau. D'autres travaux reprennent ce critère dans sa forme initiale [41-44], ces travaux sont basés sur l'hypothèse que la déformation plastique est nulle pour les sollicitations en fatigue à grand nombre de cycles [45-46]. Ainsi, le terme de ΔW_p devient nul.

II.9.2 Critère de Macha [45]

En 1999, Macha propose un critère de fatigue multiaxiale valable dans le domaine polycyclique, ce critère est basé sur le paramètre énergie de déformation de cisaillement $W_c(t)$ calculée sur un plan critique, il suppose que cette énergie et la cause de la fissuration par fatigue.

$$W_c(t) = \frac{1}{2} s_{aij}(t) e_{aij}(t)$$

Où $s_{aij}(t)$ et $e_{aij}(t)$ représentent respectivement les tenseurs des contraintes et des déformations déviatoriques alternés.

$$s_{aij} = \sigma_{aij} - \frac{1}{3} \sigma_{akk} \delta_{ij}$$

$$e_{aij} = \delta_{aij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{akk} \delta_{ij}$$

II.10 Critère de plan critique

Les critères multiaxiaux de fatigue de type plan critique, se singularisent par leur choix du plan critique. En effet, ils définissent le plan dit critique comme celui où la contrainte tangentielle est maximale, ou comme celui où l'amplitude de la contrainte tangentielle est maximale. Le plan critique défini, le calcul de la fonction de fatigue représentative de l'endommagement de la matière au point considéré.

La base physique sur laquelle s'appuient ces critères est plus forte car à travers la notion de plan critique, on trouve la notion de plan de glissement préférentiel. Le plan critique sur lequel est calculé le critère de fatigue multiaxiale est souvent associé au plan sur lequel la fissure est supposée apparaître (plan de glissement préférentiel sur lequel apparaisse les bandes de glissement persistantes).

Il faut noter qu'on trouve parmi les critères énergétiques, des critères qui utilisent la notion de plan critique

II.10.1 Critère de Findley [46]

L'origine du critère de Findley remonte aux années cinquante, l'auteur définit le plan critique en recherchant celui où la fonction de fatigue atteint son maximum, c'est-à-dire où la combinaison linéaire $\tau_{ha} + \alpha \sigma_{hh \max}$ est maximale. Le critère s'écrit :

$$\frac{\tau_{ha} + \alpha \sigma_{hh \max}}{\beta} \leq 1$$

Où α et β sont des constantes de matériau

$$\alpha = 2 \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} - 1$$

$$\beta = \tau_{-1}$$

II.10.2 Critère de Robert [47]

En 1992, Robert propose une méthode d'estimation de durée de vie, qui fait appel au concept du dommage par plan. Ce concept a pour objectif de ne pas décrire le dommage de façon globale au point de la structure où est réalisé le calcul en fatigue, mais de se placer à l'échelle du plan où le dommage devient directionnel. L'auteur dissocie les influences respectives des parties moyenne et alternée de la contrainte normale et les combine avec la partie alternée de la contrainte tangentielle. Pour extraire et identifier des cycles multiaxiaux, il choisit une

CHAPITRE II : Généralités sur La Fatigue et Les Critères Multiaxiaux

variable de comptage particulière [48] : la contrainte normale $\sigma_{h_0h_0}(t)$ au plan fixe π_0 défini par les angles $\varphi_0 = \pi/\sqrt{7}$ et $\gamma_0 = \pi/\sqrt{19}$ (Figure II.11). Ces angles ont été choisis, selon l'auteur, de façon à présenter une partie décimale illimitée non périodique afin de dissocier facilement deux tenseurs consécutifs conduisant à des valeurs voisines de la contrainte normale.

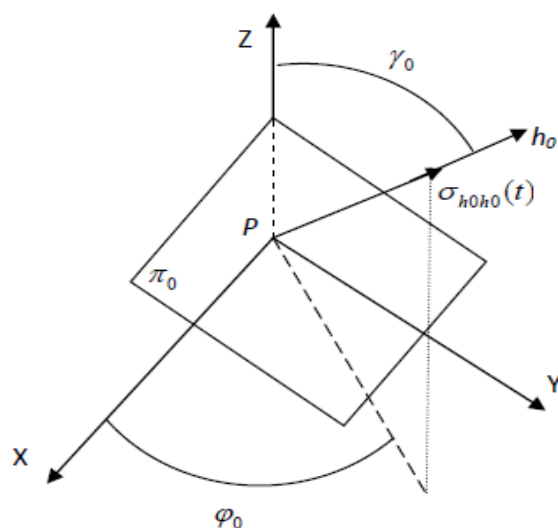


Figure II.10 Contrainte normale choisie comme variable de comptage

Le critère de Robert est défini comme suit :

$$\max_t \left(\frac{\tau_{na}(t) + \alpha(N_r)\sigma_{h_0h_0}(t) + \beta(N_r)\sigma_{hnm}}{\gamma(N_r)} \right) \leq 1$$

Se critère à subi plusieurs évolutions depuis sa première formulation [49].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Donato Gallitelli. Traitements de surface mécaniques : modélisation et caractérisations expérimentales. Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]. Université de Technologie de Troyes, 2018. Français.
- [2] M. BONIARDI et al., "Influence of carburizing and nitriding on failure of gears- A case study". Engineering Failure Analysis 13 312-339. - 2006.
- [3] P. STARKER, H. WOLHFART, E. MACHERAUCH, "Fatigue et Engineering Materials and Structures", 1, p. 297-305. - 1979.
- [4] W.P. EVANS et al., "Local atomic arrangements studied by X-Ray diffraction". Proc. Of Symposium in Chicago, chap 11. - 1965.
- [5] P. RENAUD, «MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU GRENAILLAGE DES PIÈCES INITIALEMENT CÉMENTÉES OU CARBONITRURÉES,» paris, 2011, soutenue le 17 juin 2011 THESE DE DOCTORAT.
- [6] Barralis J, Castex L, Maeder G. Précontraintes et traitements superficiels, Techniques de l'ingénieur, 1999, M1180-1.
- [7] H. WOHLFAHRT, "The influence of peening conditions on the resulting distribution of residual stress". Proceeding of second International Conference on Shotpeening. Chicago. - 1984.
- [8] Source: <http://images.google.com>. - 2010.
- [9] Source: <http://www.surfanet.org>. - 2010.
- [10] S. KYRIACOU, "Shot-peening mechanics, a theoretical study". Proceedings of the 6th international conference on shot peening. - 1996.
- [11] M. DESVIGNES, "Influence du Grenailage de Précontrainte sur la Tenue en Fatigue de l'acier 35CD4". Thèse ENSAM. - 1987.
- [12] Y. LECOFFRE et al., "a real time velocity measuring system for use in shot peening". Shot peening Conference. Wheelabrator Alleward. Grenoble. - 1993.
- [13] G.MAEDER, L.CASTEX, J. BARRALIS, "Précontraintes et traitements superficiels". Techniques de l'ingénieur [M1180]. - 1999.
- [14] S.A. MEGUID, G. SHAGAL, J.C. STRANART, J. DALY, "Three dimensional dynamique Finite element analysis of shot peening induced residual stresses". - 2001.
- [15] R. FATHALLAH, "Modélisation des procédés de grenailage incidence des billes et taux de recouvrement". Thèse ENSAM. - 1994.

BIBLIOGRAPHIE

- [16] J. LU, "Traitements de surface mécaniques-Principes". Techniques de l'ingénieur [M1190]. - 2006.
- [17] M. DESVIGNES, "Influence du Grenailage de Précontrainte sur la Tenue en. Fatigue de l'acier 35CD4". Thèse ENSAM. - 1987.
- [18] D. HAKIMI, "Caractérisation mécanique et métallurgique de la structure d'une couche grenailée". Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université de Paris Sud- Orsay. - 1984.
- [19] M. DESVIGNES, "Influence du Grenailage de Précontrainte sur la Tenue en. Fatigue de l'acier 35CD4". Thèse ENSAM. - 1987.
- [20] J. ALMEN, P.H. BLACK, "Residual stresses and fatigue in metals". Toronto. - 1963.
- [21] A. CORNE, "Physique et ingénierie des surfaces". EDP Science. - 1998.
- [22] MIC, "Guide d'Applications du Grenailage de Précontrainte". Disponible sur www.metalimprovement.com. - 2008.
- [23] B. MOHAMED, «OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DES TRAITEMENTS MÉCANIQUES DE SURFACE EN VUE D'UNE DURÉE DE VIEDONNÉE EN FATIGUE,» Mostaganem, 2020; thèse doctorat; Soutenue le 28 Juin 2020.
- [24] B. KOUALEF et. B. S. BENAMAR, «Traitement de surface shotpeening sur différents types d'aciers : simulation numérique,» Ain-Temouchent, 2018/2019, thèse de master.
- [25] A. NIKU-LARI, "Traitements et revêtements des métaux". Hermes. - 1987.
- [26] Lu J. Traitements de surface mécaniques-Principes. Techniques de l'ingénieur, 2006, M1190.
- [27] Barralis J, Castex L, Maeder G. Précontraintes et traitements superficiels, Techniques de l'ingénieur, 1999, M1180-1.
- [28] Chaieb I. Analyse et simulation des contraintes résiduelles induites par des traitements mécaniques de précontrainte en grenailage et choc laser, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2004.
- [29] Bardia ESMAEILLOU (2011) **Approche cinétique du comportement en fatigue du Polyamide 66 renforcé par 30% de fibres de verre** Thèse de Doctorat, ENSAM SMI de paris. École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'Ingénieur. Doctorat ParisTech.

BIBLIOGRAPHIE

- [30] Mohamad JABBADO (2006) **Fatigue polycyclique des structures métalliques : durée de vie sous chargements variables** Thèse de Doctorat, de l'Ecole Polytechnique Spécialité : Mécanique et Matériaux de Bordeaux.
- [31] Thomas DELAHAY (2004) **Développement d'une méthode probabiliste de calcul en fatigue multiaxiale prenant en compte la répartition volumique des contraintes.** Thèse de Doctorat l'ENSAM CER de Bordeaux.
- [32] Claude Bathias André Pineau (2008) **Fatigue des matériaux et des structures tome, Introduction, endurance, amorçage et propagation des fissures, fatigue oligocyclique et gigacyclique** [Hermes Science Publications](#).
- [33] Hichem DJABALI Hichem YOUSFI (2009) **Étude expérimentale de la fatigue en flexion rotative** Thèse d'Ingénieur d'état Département de génie mécanique. Faculté de technologie Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [34] Jérôme BENABES (18 décembre 2006) **Approche énergétique non local du calcul de durée de vie de structure en fatigue multiaxiale sous chargement d'amplitude variable l'application a une roue de train ferroviaire'** Thèse de Doctorat, ENSAM, CER de Bordeaux.
- [35] Marc Blétry 2007 **Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux**
- [36] **G. Fortuné ANAGO, 2000.** Endommagement par fatigue de l'aluminium cas du 1200 et 5005, thèse de doctorat, Université Nationale de Benin, p 103.
- [37] **K. Hohenemser, W. Prager, 1993.** The problem of fatigue strength under complex stresses, Metallwirtschaf XII, 24.
- [38] **J.H. Gough, H.V. Pollard, 1935.** The strength of metals under combined alternating stresses, proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, vol.131, N0 3.
- [39] **G. Sines, 1959,** Behaviour of metals under complex static and alternating stresses, dans Metal fatigue, Sines G, Waisman JL, editors, Mc Graw Hill, New York, pp. 145-169.
- [40] **Benkhettab M** «OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DES TRAITEMENTS MÉCANIQUES DE SURFACE EN VUE D'UNE DURÉE DE VIE DONNEE EN FATIGUE»; Mostaganem; These doctorat; Soutenue le 28 Juin 2020.
- [41] **I.V. Papadopoulos, 1987.** Fatigue polycyclique des métaux: une nouvelle approche. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 18 décembre 1987, 443 p.
- [42] **I.V. Papadopoulos, 1993.** Fatigue limit of metals under multiaxial stress conditions – The microscopic approach. Technical Note N°I.93-101, (ISPRA): Commission of the European Communities, Joint Research Centre, ISEI/IE 2495/93, 46 p.

BIBLIOGRAPHIE

- [43] **W. Ott, O. Baumgart, K. H. Trautmann, H. Nowack, 1996** A new crack initiation life prediction method for arbitrary multiaxial loading considering mean stress effect. In: Proc Sixth Int Fatigue Congress, FATIGUE 96, Berlin, 1007–112.
- [44] **F. Ellyin, 1988.** Cyclic strain energy density as a criterion for multiaxial fatigue failure, dans: M. Brown, K.J. Miller, Biaxial and Multiaxial Fatigue, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, pp. 571-583.
- [45] **E. Macha, C.M. Sonsino, 1999.** Energy criteria of multiaxial fatigue failure. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 22 :1053{1070).
- [46] **W. N. Findley, 1957.** Fatigue of Metals Under Combinations of Stresses, Transactions of ASME (vol. 79).
- [47] **B. Kenmeugne, 1996.** Contribution à la modélisation du comportement en fatigue sous sollicitations multiaxiales d'amplitude variable. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon. No ordre 96 ISAL 0064.
- [48] **M. Jabbado, 2006.** Fatigue polycyclique des structures métalliques: durée de vie sous chargements variables. Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique.
- [49] **B. Weber, A. Carmet, B. Kenmeugne, J. L. Robert, 1999,** On a global stress based approach for fatigue assessment under multiaxial random loading. In Engineering Against Fatigue, J. Beynon, M. Brown, R. Smith, T. Lindley, and B. Tomkins, Eds., pp. 407–414.