



Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

***ETUDE COMPARATIVE DES CRITERES DE FATIGUE
MULTIAXIALE APPLIQUEES A DES PIECES TRAITÉES
SUPERFICIELLEMENT***

Présenté par :

- ❖ BOUTICH OUARDANI
- ❖ BELMADI NASSIR EDDINE

Soutenu le : 15/09 / 2022 devant le jury composé de :

Président	Pr. GUECHICHI HOCINE	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. BENKABOUCHE SALAH-EDDINE	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. BENKHETTAB MOHAMED	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au niveau de Laboratoire d'Elaboration et Caractérisation Physico Mécanique et Métallurgique des Matériaux, Département de génie mécanique, Faculté des Sciences et de la technologie, Université de Mostaganem.

Tout d'abord, Nous aimeront à remercier très chaleureusement

Encadreur : Dr. BENKHETTAB MOHAMED

Docteur à l'université de Mostaganem, qui a accepté de diriger ce thèse, pour ces aides tout au long la préparation de ce travail, avec ses encouragements, et sa modestie.

Nous remerciant également très sincèrement **Monsieur : GUECHICHI HOCINE** Professeur à l'université de Mostaganem pour avoir accepté de présider le jury.

Ensuite nous tiendront à remercier l'ensemble des membres de jury **Monsieur : Dr.BENKABOUCHE SALAH-EDDINE**, docteur à l'université de Mostaganem, pour l'honneur et l'importance qu'il nous a fait en participant à ce jury et d'accepter d'examiner cette thèse.

Enfin, nous remerciant toutes les personnes qui de près ou de loin n'ont aidé à réaliser ce travail.

DEDICACE

A l'âme de Mon père

A Ma mère

A Ma famille, A ma fille

*khaoula qui a né le : 15/09/2000 la
date de Soutenance*

A mes amis,...

BOUTICH



*A Mon père
A Ma mère
A Ma famille,
A mes amis,...*

BELMADI

RESUME

Prévoir le comportement des structures en fatigue est un atout de la conception, car pour être compétitive, l'étude doit être optimisée au plus juste afin de répondre à un cahier des charges toujours plus exigeant. L'avènement de plus en plus précoce de la fissuration par fatigue est aujourd'hui devenue un souci systématique dans toute démarche de dimensionnement. Il est important d'éviter ce phénomène en fournissant des facteurs et des conditions qui contribuent à l'augmentation de la durée de vie des structures industrielles. Les traitements de surface est l'une des procédures importantes permettant d'augmenté la durée de vie des structures.

Dans cette étude, nous avons proposé un nouveau critère de fatigue basé sur celui de Crossland, qui prend en compte le double effet du traitement de surface pour calculer la durée de vie. D'autre part, nous avons utilisé la méthode de plan d'expériences pour trouver l'optimum de l'acier **35NiCrMo16**.

Mots clés : *Fatigue, durée de vie, optimisation, simulation, éléments finis*

ABSTRACT

Predicting the behavior of structures in fatigue is an asset of the design, because to be competitive, the study must be optimized to the fair in order to meet ever more demanding specifications. The advent of increasingly early fatigue cracking has now become a systematic concern in any design approach. It is important to avoid this phenomenon by providing factors and conditions that contribute to increasing the life of industrial structures. Surface treatments are one of the important processes for increasing the service life of structures.

In this study, we proposed a new fatigue criterion based on that of Crossland, which takes into account the double effect of surface treatment to calculate the life span. On the other hand, we used the experimental design method to find the optimum. **35NiCrMo16** steel.

Keywords: *Fatigue, lifetime, optimization, simulation, finite elements.*

ملخص

إن التنبؤ بسلوك الهياكل في كلال هو أحد أساسيات تصميم قطع ميكانيكية ، لأنه لكي تكون لك القدرة على المنافسة ، يجب ان تلبي الدراسة جميع المواصفات الأكثر طلب التي تستجيب إلى دفتر الشروط . أصبح ظهور تشققات الناتجة عن التعب المبكر بشكل متزايد مصدر قلق منتظم في أي نهج للتصميم ذلك من المهم تجنب هذه الظاهرة من خلال توفير العوامل والظروف التي تسهم في زيادة حياة الهياكل الصناعية. و من بين هذه الطرق تعتبر المعالجات السطحية واحدة من العمليات المهمة لزيادة عمر خدمة الهياكل. في هذه الدراسة ، اقترحنا معياراً جديداً للتعب يعتمد على معيار كروسلاندر ، والذي يأخذ في الاعتبار التأثير المزدوج للمعالجة السطحية لحساب العمر الافتراضي. من ناحية أخرى ، استخدمنا طريقة التصميم التجريبي للإيجاد الذروة التي تمثل اقصى مدة حياة للمادة المعالجة . الصلب 35NiCrMo16.

كلمات مفاتيح : الكلال , مدة الحياة , التحسين , محاكاة , طريقة العناصر المنتهية

NOTATIONS

R	Rapport de chargement
σ, σ_a	Amplitude de la contrainte
$\Delta\sigma$	Etendue de la contrainte
σ_a	Amplitude de la contrainte
$\varepsilon(t)$	Déformation en fonction du temps
E	Fonction de fatigue
σ_{\min}	Contrainte minimale à la traction
σ_{\max}	Contrainte maximale à la traction
N	Nombre de cycles à la rupture
$\sigma(t)$	Contrainte en fonction du temps
σ, ε	Contrainte, déformation
K_t	Coefficient théorique de concentration de contraintes
E	Module d'Young
ν	Coefficient de poisson.
$\Delta\sigma_N$	Etendue de la contrainte nominale
$\Delta\varepsilon_N$	Etendue de la déformation nominale
$\Delta\varepsilon$	Etendue de la déformation totale
$\Delta\varepsilon^e$	Etendue de la déformation élastique
$\Delta\varepsilon^p$	Etendue de la déformation plastique
N_a	Nombre de cycle à l'amorçage
b	Exposant de Basquin
a	Exposant de ductilité en fatigue
σ_e	Limite d'élasticité
P	Contrainte de compression
T	Période
σ_u	Contrainte ultime à la traction
t	Temps
s	Seconde
σ_m	Contrainte moyenne
R_m	Résistance maximale à la traction monotone
σ_D	Limite d'endurance en traction
σ_{eq}	Contrainte équivalente de Von Mises
σ_{eqa}	Amplitude de σ_{eq}
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Contraintes principales
σ_{-1}	Limite d'endurance en traction alternée symétrique

σ_0	Limite d'endurance en traction répétée
f_0	Limite d'endurance en flexion répétée
f_{-1}	Limite d'endurance en flexion alternée symétrique.
τ_0	Limite d'endurance en torsion répétée
τ_{-1}	Limite d'endurance en torsion alternée symétrique
P_m	Pression hydrostatique moyenne
τ_a	Amplitude de la contrainte de cisaillement
f_a	Amplitude de la contrainte de flexion
τ_m	Contrainte moyenne de cisaillement
τ_u	Contrainte ultime de cisaillement
σ_n	Contrainte moyenne normale
σ_n^{\max}	Contrainte normale maximale
P_{\max}	Pression hydrostatique maximale
J_2	Deuxième invariant du tenseur déviateur de contraintes
J_{2a}	Deuxième invariant du tenseur déviateur des amplitudes de contraintes
ξ_m	Contrainte moyenne de $\sqrt{J_2}$
P_H	Pression hydrostatique
ξ_a	Amplitude de la racine carrée du deuxième invariant de déviateur de contraintes
$\tau(t)$	Contrainte de cisaillement en fonction du temps
σ_{EQ}	Contrainte équivalente de Crossland
D	Domage total
n_i	Nombre de blocs
$N_{i,f}$	Nombre de cycles à la rupture correspondant
σ_{ai}	Amplitude de la contrainte correspondante
F_a	Amplitude de la force de flexion alternée
F_{at}	Amplitude de la force de torsion alternée
$F(t)$	Force en fonction du temps
$\sigma_{ij}(t)$	Composantes du tenseur de contrainte à l'instant t
\vec{S}_n	Vecteur contrainte
$\underline{\underline{\sigma}}$	Tenseur des contraintes

σ_n^{\max}	Contrainte normale maximale
$f_{-1}(N)$	Limite de fatigue en flexion alternée symétrique à N Cycles
$\tau_{-1}(N)$	Limite de fatigue en torsion alternée symétrique à N Cycles
$a(N), b(N)$	Paramètres de fatigue à N Cycles
A, B, C, m	Paramètres statistiques liés aux modèles des courbes de Wöhler
a, b, c, α, β	Paramètres de fatigue liés aux critères de fatigue.
H.D.	Hors Domaine.
CL	Conditions aux Limites
S	Symétrie
M	Moment de flexion
Q	l'effet déformation plastique
S-N	stress number of sciences.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Différents traitements mécaniques de surface [17].....	17
Tableau III.1. Caractéristiques mécaniques du matériau	35
Tableau III.2. Composition chimique de l'acier SM45C.....	35
Le tableau III.3 présente la variation de quelques paramètres en fonction de l'ordre de maillage jusqu'à la convergence.....	41
Tableau III.4. Détermination de la zone critique.....	41
Tableau III.5. Chargements appliqués et les paramètres des critères	43
Tableau III.6. Chargements appliqués et les durées de vie calculée pour chaque critère	44
Tableau III.7- Résultats du raffinement du maillage.....	47
Tableau III.8- Matrice standard pour un plan de type 3^k	54
Tableau III.9 Plan d'expériences de type 2^{5-2}	56
Tableau III.10 Tableau de variation des paramètres.	57
Tableau III.11 Déplacement vers l'optimum [73].	58

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Courbe de Wöhler.....	4
Figure I.2.(a): charges appliquées (traction-compression/torsion/flexion)(b) :paramètres de la sollicitation.....	5
Figure I.3. Accommodation.....	6
Figure I.4. Rochet.....	6
Figure I.5. Adaptation.....	7
Figure I.6. Amorçage et propagation des fissures.....	11
<hr/>	
Figure II.1. Trajet de déformation élasto-plastique à champ de déformation hétérogène.....	18
Figure II.2 Principe du grenailage de précontrainte	19
Figure II.3 Grenailleuse à turbine	19
Figure II.4 Roue à palettes	19
Figure II.5. Schéma d'une machine à air comprimée	20
Figure II.6. Principe d'érosion par ultrasons	20
Figure II.7. Influence du diamètre de la grenaille sur les états contrainte résiduelle en profondeur.....	21
Figure II.8 Influence de la vitesse sur les contraintes résiduelles	22
Figure II.9. Influence du diamètre des billes sur les contraintes résiduelle.....	22

Figure II.10. Influence du taux de recouvrement sur les contraintes résiduelles	23
Figure II.11. Effet de la loi de comportement du matériau de la bille.....	23
Figure II.12. Effet de la loi de comportement du matériau.....	24
Figure II.13. Montage pour la détermination de l'intensité Almen (a), Plaques Almen (b).....	24
Figure II.14. Définition de la courbe de saturation de la flèche Almen	25
Figure II.15. Courbe et temps de saturation	25
Figure II.16. Origine des contraintes résiduelles générées par grenailage	26
Figure II.17. Différents types de galetage	27
Figure II.18. Variation des contraintes résiduelles transversale et longitudinale mesurées en fonction de la charge appliquée	27
Figure II.19. Profils des contraintes résiduelles dans une pièce en Inconel 718 Traitée par choc laser.....	28
Figure II.20. Contraintes résiduelles dans une couche cémentée et trempée.....	29
Figure II.21. Contraintes résiduelles après nitruration gazeuse.....	29
Figure II.21. Amélioration de la tenue en fatigue par choc laser en confinement eau	30
—————	
Figure III.1. Position de composants (P_{max}, ζ_a) dans le diagramme de <i>Crossland</i>	32
Figure III.2. Positions des composantes ($\xi a, \xi m$) sur le diagramme de Marin.....	33
Figure III. 3 Diagramme de Sines.....	33
figures III.4 et III.5. Les courbes de Wöhler	36
Figure III.6. Organigramme de calcul de la durée de vie	37
Figure III. 7. Représentation Géométrie de structure.	39
Figure III. 8. Forme du signal de la contrainte alternée.	39
Figure III. 9. Modélisation en 2D de structure.	40
Figure III.10 Position de l'élément 271.....	41
Figure III.11. Zone critique due au chargement en traction monotone.....	42
Figure III.12. Zone critique due à la force F_a	42
Figure III.13. Position d'élément 271 plus claire.....	42
Figure III.14- Maillage de la cellule et de la bille.	46
Figure III.15. Les conditions aux limites de la cellule de forme parallélépipédique.....	46
Figure III.16- Recherche de la convergence des résultats.....	47
Figure III.17 Surface traitée de façon complète et représentation des indentations (taux de recouvrement 100%).....	48
Figure III.18 Représentation schématique de la simulation du processus de grenailage.....	49
Figure III.19 - profil de contrainte résiduelle.....	50
Figure III.20 - profil de déformation plastique.....	50
Figure III.21. Diagramme de Crossland pour un matériau traité et non traité.....	51
Figure III.22. Représentation du plan de type 2^3	52
Figure III.23. Plan d'expériences du type 3^3	53

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA FATIGUE

I.1.Introduction.....	1
I.2.Phénomène de la fatigue	1
I.3. Historique sur la fatigue	2
I.4. Courbe de fatigue	3
I.4.1. Représentation de la courbe de Wöhler	3
I.5. Les 3 domaines de la courbe de Wöhler	5
I.6. Discussion sur la limite de fatigue	7
I.7. Paramètres d'influence sur la fatigue	8
I.8.Limite de fatigue	9
I.9. Amorçage des fissures de fatigue.....	9
I.10. Les critères de fatigue multiaxiaux.....	10
I.10.1. Critères de plasticité.....	10
I.10.1.a. Critère de Von Mises.....	10
I.10.1.b. Critère de Tresca	11
I.10.2. Formalisme d'un critère defatigue	11
I.10.3. Les critères d'approche globale.....	12
I.10.3.a. Critère de Marin	12
I.10.3.b. Critère deSines.....	12
I.10.4. Critères de type plan critique	13
I.10.4.a. Critère deMatake.....	13

I.10.4.a. Critère de Dang-Van.....	14
I.10.5. Critères empiriques.....	14
I.10.5.a. Critère de Gough et Pollard :.....	14
I.10.5.b. Critère de Hohenemser et Prager :.....	15
I.10.5.c. Critère de Davies	15

CHAPITRE II: LES TRAITEMENTS DE SURFACE

II.1.Introduction.....	16
II.2.L'origine des contraintes résiduelles.....	16
II.3. les traitements mécaniques superficiels.....	16
II.3.1 .Les avantages des traitements mécaniques superficiels.....	17
II.3.2.Grenailage de précontrainte (shot peening)	17
II.3.2.1.La machine de projection.....	18
II.3.2.2.Nature et dimensions des grenailles.....	19
II.3.2.3.Paramètres du grenailage.....	20
II.3.2.4.Contrôle du procédé de grenailage (Intensité Almen).....	23
II.3.2.5.Effet du grenailage de précontrainte.....	24
II.3.3.Galetage.....	25
II.3.4.Le choc laser.....	26
II.4.Les traitements thermochimiques de surfaces.....	27
II.4.1.La cémentation.....	27
II.4.2.Nitruration.....	28
II.4.3. L'effet des traitements de surfaces sur la tenue en fatigue.....	28

CHAPITRE III :

CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

III.1. introduction	30
III.2.1- Critère de Crossland	30
III.2.2- Critère de Marin	32

III.2.3 -Critère de Sines	33
III.3-Méthodologie de travail.....	34
III.4- Courbes de Wöhler	35
III.5- Méthode de calcul des durées de vie des structures	36
III.5.1. La fonctions inverse	37
III.5.2. Critère de Crossland	37
III.5.3. Critère de Marin	38
III.5.4. Critère de Sines	38
III.6. Structure	38
III.6.1. La géométrie de structure	39
III.6.2. Chargement et conditions aux limites	39
III.6.3. Maillage de la structure I	40
III.6.4. Raffinement du maillage de la structure	40
III.6.5. Détermination de la zone critique	41
III.6.6. Calcul la durée de vie	43
III.7-Simulation numérique de grenailage.....	45
III.7-1. Maillage	46
III.7-2. Conditions aux limites	46
III.7-3. Test de convergence	47
III.8. Deuxième cas (multi-impact)	48
III.8.1 Simulation du procédé du grenailage	48
III.8.2- influence des contraintes résiduelles sur le trajet de chargement	50
III.8.3 -Effet de déformation plastique sur les critères	51

III.9- Les critères proposés	52
III.9.1 - Calcule la durée de vie après traitement de surface	51
III.9.2 - Comparaison de la durée de vie	53
III.9.3 –Commentaires des graphes	54
III.10- CONCLUSION	55

INTRODUCTION GENERALE

La fiabilité des équipements mécaniques est l'une des caractéristiques recherchée, dans les études de dimensionnement des pièces de ces équipements, elle présente la continuité de fonctionnement sans risque d'avoir des anomalies, ou des ruptures de ces composants. Généralement les structures sont sollicitées à plusieurs types de chargements (traction-compression, flexion, torsion, ou combinaison de l'une avec l'autre), sous différentes formes : cycliques ou monotones, leurs réponses se traduisent soit par une résistance, chose recherchée, ou soit par un endommagement.

Les ingénieurs des bureaux d'études ont investis dans le domaine de la fatigue, des essais expérimentaux ont été réalisés, des formules sous les noms de critères de fatigues ont été établis aussi, afin de déterminer la durée de vie des structures. Cela dépend des caractéristiques des matériaux utilisés, la géométrie des structures, le type de chargement,...

L'étude envisagée dans ce mémoire, est une continuité d'un travail déjà réalisé au niveau du laboratoire de l'Elaboration et Caractérisation Physico-Mécanique et Métallurgie des Matériaux de notre université, il s'agit d'un modèle de prédiction des durées de vie des structures, basé sur le critère de fatigue de Crossland. Nous avons utilisé un matériau et structures différents, afin de prédire la durée de vie des structures utilisées.

Le premier chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur le phénomène de la fatigue, en développant les différents domaines de la courbe de Wöhler, les paramètres d'influences sur la tenue en fatigue des structures, suivi d'un aperçu sur quelques critères de fatigue multiaxiale, lesquels comptent parmi les outils incontournables des méthodes d'estimation de durée de vie.

Le deuxième chapitre, est consacrée aux traitements de surfaces qui améliorent la tenue en fatigue par la création des contraintes résiduelles de compression dans les couches superficielles. Nous allons démontrés dans ce chapitre que l'introduction des contraintes résiduelles de compression est associée à une augmentation de la tenue en fatigue.

Le troisième chapitre, est réservé à l'application du modèle de prédiction de la durée de vie, basé sur le critère de fatigue de Crossland, ce dernier permet de transformer les contraintes appliquées en une contrainte équivalente via le code Ansys (version 12.1), sur une plaque de forme carré avec faible épaisseur présente un défaut de forme.

Une conclusion ainsi que quelques perspectives de ce travail seront présentées en fin de ce mémoire.

CHAPITRE I
GENERALITES
SUR LA FATIGUE

I.1.Introduction

Les charges appliquées sur des pièces mécaniques, modifient progressivement les propriétés de leurs matériaux, la répétition cyclique des chargements provoque la formation, puis la propagation des microfissures qui entraînent l'endommagement de ces pièces ou la rupture se produit lorsque le matériau ne peut plus supporter ces chargements, ce phénomène est appelé la fatigue, qui se caractérise par la formation de «microfissures» dans les zones de fortes concentrations de contraintes dues aux effets géométriques (entailles) ou métallurgiques (inclusions). Ces microfissures donnent ensuite naissance progressivement à une fissure macroscopique qui se propage jusqu'à la ruine finale

Le dimensionnement d'une structure à la fatigue est plus difficile par rapport à l'application des charges monotones ou statiques, car la rupture par fatigue dépend de plusieurs paramètres : contraintes locales, géométries, forme du signal de la charge, la multiaxialité des sollicitations,...etc.

La multiaxialité des sollicitations provient de l'application de plusieurs chargements dans différentes directions. Une roue mal équilibrée d'une voiture roulant sur une route présentant des irrégularités, caractérise le phénomène de la fatigue multiaxiale, l'état de contraintes résultant au niveau des zones de forte concentration de contraintes est un état multiaxial [1].

I.2.Phénomène de la fatigue [2]:

Habituellement, le phénomène de la fatigue est présenté comme un processus par lequel des dommages s'accroissent dans le matériau lors de l'application de charges variables. Ces dégradations peuvent éventuellement provoquer une rupture, même si la charge maximale est bien inférieure à celle qui est requise pour atteindre la limite d'élasticité du matériau. En fait la fatigue est un phénomène qui produit localement une diminution de la résistance du matériau de construction. Ce matériau peut être un alliage métallique, un polymère ou un matériau composite comme le béton armé ou un plastique renforcé par des fibres.

Afin de préciser les différents aspects de la fatigue des métaux, nous donnons les définitions nécessaires du phénomène de fatigue des éprouvettes de petites dimensions, sollicitées dans des conditions simples, permettant de distinguer les différents domaines où la fatigue peut apparaître ou non. Nous décrirons ensuite les modifications des propriétés physiques et structurales qui accompagnent la répétition des cycles d'efforts et qui conduisent à la fissuration du métal. Enfin, nous énumérerons brièvement les principaux facteurs dont dépend l'endurance d'une pièce, qu'ils soient d'ordre métallurgique, géométrique, liés aux conditions de sollicitation, ou dépendants des conditions d'environnement.

Cette dernière est aussi un phénomène qui provoque l'évolution des propriétés d'un matériau soumis à des sollicitations variables. La répétition des cycles d'efforts peut conduire à la rupture. Cette rupture se produit pour des contraintes le plus souvent inférieures à la limite d'élasticité du matériau. La vérification des projets de ponts métalliques ou mixtes en fatigue, la mise au point de règlements de calcul et les problèmes de maintenance et d'évaluation de la sécurité résiduelle des ouvrages en service font appel à des calculs de dommages en fatigue d'assemblages soudés. Il s'agit de modéliser par la mécanique de la rupture le phénomène de l'endommagement dans la zone critique d'un élément de poutre principale. En raison du caractère aléatoire des charges de trafic et des incertitudes importantes sur les résistances en fatigue de tels assemblages, les calculs déterministes de durées de vie sont insuffisants pour apprécier la sécurité réelle des ouvrages dans leur contexte. Les méthodes probabilistes, permettant de "chiffrer" le niveau de sécurité ou de fiabilité d'une structure, sont nécessaires. Des méthodes de calcul approché des probabilités de ruine vis-à-vis d'un état limite donné ont été développées dans les années 70, dont celle dite de premier ordre et deuxième moment (Rackwitz et Fiessler, 1978), en utilisant la notion de l'indice de fiabilité β . Les premières applications de cette méthode pour des états limites de fatigue ont été présentées lors du séminaire AIPC de Lausanne en mars 1990 (IABSE). Celles-ci avaient un aspect théorique et peu opérationnel à cause du manque de données sur les véritables grandeurs aléatoires comme le trafic ou les résultats d'essais de fatigue. Depuis cette vingtaine d'années, la connaissance des actions du trafic sur les ponts et de leurs lois de probabilité a beaucoup progressé grâce à l'acquisition de données abondantes (Bruis, Jacob et Sedlacek, 1989). Il en est même sur les lois de fatigue et les résistances en fatigue correspondantes, grâce à de très nombreux essais (Brozzetti, Ryan et Sedlacek, 1989).

I.3. Historique sur la fatigue [3] :

August Wöhler, (1819-1914), a montré très tôt des capacités en mathématiques et a obtenu une bourse pour étudier à la Technicien Hochschule d'Hanovre, sous la direction de Karl Karmarsch. En 1840, il a été recruté dans l'entreprise Bersig à Berlin où il a travaillé à la fabrication des voies ferroviaires. En 1843, après un bref séjour à Hanovre, il a reçu une formation dans la conduite des locomotives en Belgique. Il est ensuite retourné en tant qu'ingénieur à Hanovre sur la ligne de Lehrte. En 1847, Wöhler était surveillant en chef des matériels de transport sur le chemin de fer de la Silésie- Brandenburg. Sa réputation croissante l'a conduit à rencontrer en 1852 le ministre prussien du commerce pour étudier les causes de Rupture des axes de chemin de fer, travail qui devait occuper Wöhler pendant les deux décennies suivantes.

Le chemin de fer a été nationalisé en 1854 en Allemagne. La reconnaissance de ses qualités d'administrateur et de ses Compétences techniques ont eu comme conséquence sa nomination comme directeur des chemins de fer impériaux nouvellement formés, dont le siège social était basé à Strasbourg, un poste qu'il a occupé jusqu'à sa retraite en 1889.

Wöhler a commencé ses investigations de recherche dans la théorie de l'élasticité et a proposé, en 1855, une méthode pour prévoir la flèche d'une poutre treillis, ceci avant le travail d'Emile Clapeyron. Il a également présenté une méthode de support des extrémités d'un pont sur roulements à rouleaux pour tenir compte de la dilatation thermique.

Son travail sur la fatigue des matériaux marque la première recherche systématique des courbes SN, également connues sous le nom de courbes de Wöhler, pour caractériser le comportement de fatigue des matériaux. La présentation de son travail à l'exposition de Paris en 1867 lui a conféré une large audience internationale. En son temps, Wöhler était un ardent avocat de la standardisation des essais et certification du fer et de l'acier.

I.4. Courbe de fatigue :

Cette dernière consiste à soumettre chaque éprouvette de traction, compression, torsion ou de flexion (figure I.1.a) à des cycles d'efforts périodiques, la sollicitation de fatigue est caractérisée par l'étendue de contrainte $\Delta\sigma$, et par le rapport de chargement ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)[4], (figure I.1.b). Il est nécessaire de noter le nombre de cycles N au bout duquel la rupture se produit. On reporte ce nombre, en général sur une échelle logarithmique, en fonction de la contrainte appliquée. À chaque éprouvette correspond un point du plan (N, σ) . À partir d'un lot d'éprouvettes soumises à des contraintes maximales différentes, on obtient une courbe S-N : Stress – Nombre of cycles (voir figure1). Les courbes dites de **Wöhler** donnent l'amplitude de contrainte $\sigma_a = \Delta\sigma / 2$ en fonction du nombre de cycles à rupture, pour un rapport de chargement $R = -1$ (contrainte alternée).

I.4.1. Représentation de la courbe de Wöhler [5] :

La courbe S-N peut faire apparaître l'existence d'une « limite d'endurance », définie comme le niveau de contrainte sous lequel un matériau résistera aux contraintes cycliques « indéfiniment » sans rompre. Évidemment, la connaissance d'un tel niveau de contrainte est important pour un ingénieur puisqu'il lui donne une contrainte de référence réaliste sur lequel il peut baser sa conception. Cependant, pour beaucoup de matériaux, une telle limite n'est pas trouvée dans le temps pratique de l'expérience. Dans ces cas, le concepteur doit se référer directement à la courbe S-N pour la contrainte appropriée qui

correspond à la vie attendue de ce qu'il conçoit. Cette courbe peut en général être décomposée en trois zones (fig.1.1) :

Sur la courbe de Wöhler il y a une dispersion statistique de la durée de vie, pour une même sollicitation, cela est dû principalement à l'existence de défauts dans le matériau (tolérances d'usinage, défaut superficiels et surtout des facteurs métallurgiques), qui conduisent à l'amorçage et la propagation. des fissures. Leurs formes, tailles et positions étant variables. Donc la durée de vie de la pièce est aussi variable. Le dimensionnement des structures, à partir des courbes de Wöhler, doit prévoir une certaine probabilité de rupture. La dispersion des durées de vie augmente lorsque la durée de vie moyenne augmente. Cela limite l'application de courbe de Wöhler pour le dimensionnement des organes de sécurité des structures.

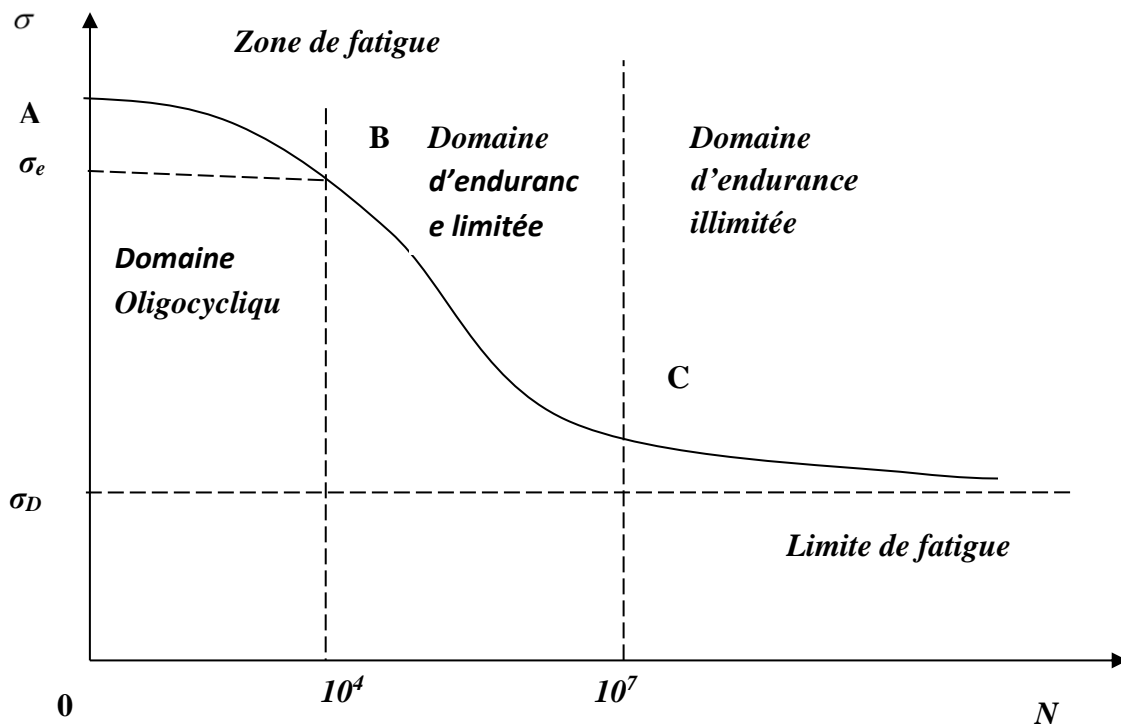
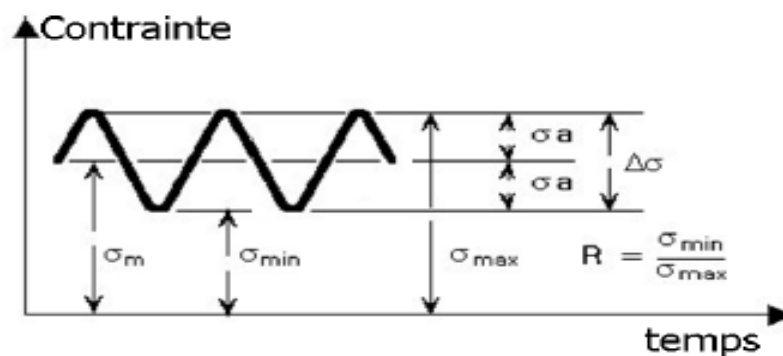
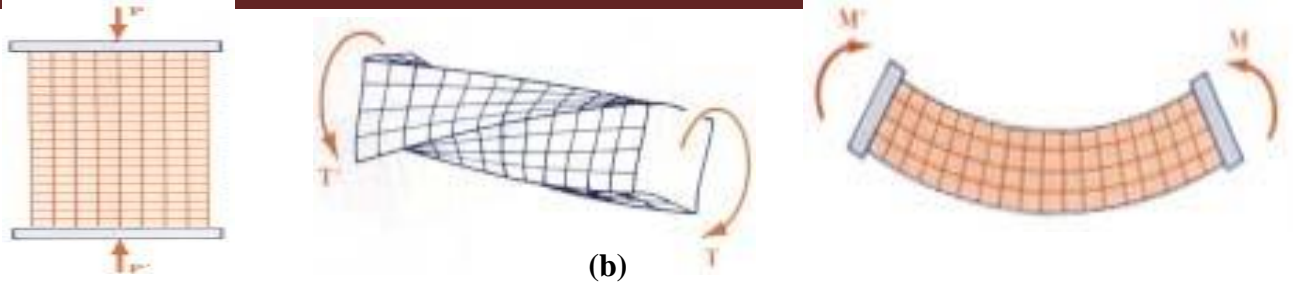


Figure I.1 Courbe de Wöhler.



(a)



**Figure I. 2. (a) : charges appliquées (traction - compression / torsion / flexion).
(b) paramètres de la sollicitation.**

I.5. Les 3 domaines de la courbe de Wöhler[6] :

La zone **AB**, dite **oligocyclique**, qui correspond aux contraintes les plus grandes, supérieures à la limite d'élasticité macroscopique et où le nombre de cycles à la rupture s'étend de 0.5

jusqu'à 10^4 ou 10^7 (pour les aciers doux). L'éprouvette atteint généralement un état d'accommodation plastique ou un rochet élastoplastique :

L'accommodation plastique se produit lorsque la réponse de l'éprouvette devient périodique, c'est à dire la déformation plastique devient périodique, un cycle d'hystérésis élastoplastique se produit.

Le rochet se produit lorsque la réponse de l'éprouvette n'atteint jamais un état périodique, la déformation plastique croît sans cesse, ce qui va provoquer la ruine de la structure en un nombre de cycles relativement très faible comme la **figure I.4**.

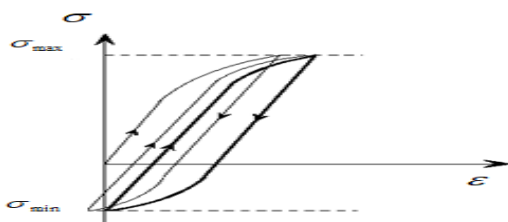


Figure I.3. Accommodation

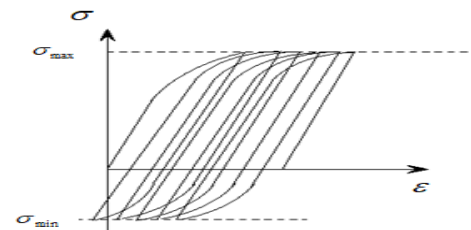


Figure I.4. Rochet

Dans cette zone, la rupture survient après un petit nombre d'alternances et est précédée d'une déformation plastique notable. Par suite de l'amplitude de la contrainte maximale, chaque cycle d'effort entraîne une déformation plastique d'ensemble accompagnée le plus souvent soit d'un durcissement notable, soit d'un adoucissement du métal. La déformation plastique E^p peut être souvent reliée au nombre de cycles à la rupture par une relation simple de la forme (loi de Manson-Coffin) : $N^k E^p = C$

Où l'exposant k est voisin de 5 pour les métaux courants (aciers, alliages légers).

- ❖ **La zone BC, dite zone de fatigue ou d'endurance limitée**, où la rupture est atteinte après un nombre de cycles compris approximativement entre 10^4 et 10^6 à 10^7 . La rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble, mesurable. La réponse de l'éprouvette atteint dans ce cas un régime adapté élastique.
- ❖ Est un état où la réponse de l'éprouvette devient purement élastique, il peut y avoir de la déformation plastique durant les premiers cycles, mais au bout d'un certain nombre de cycles, elle reste constante ; l'état final cependant dépend de l'état initial de la structure.

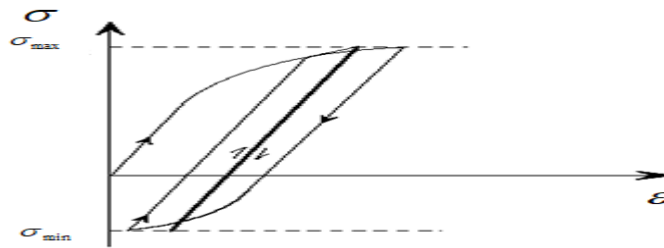


Figure I.5. Adaptation.

C'est le domaine dans lequel travaillent la plupart des structures qui pour diverses raisons, doivent avoir des masses et des volumes impérativement réduits (cas des structures aéronautiques ou automobiles ou nucléaires). Il existe de très nombreuses relations mathématiques reliant σ_D et N dans ce domaine.

- ❖ **La zone CD, dite zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité**, où D est un point pour les métaux ferreux qui est à « l'infini ». La courbe de Wöhler présente généralement une variation de pente plus ou moins marquée autour de

10^6 à 10^7 cycles, suivie d'une zone (CD) où la courbe tend vers une limite asymptotique parallèle à l'axe des N . En deçà de cette valeur limite notée σ_D , il n'y a jamais rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué.

σ_D est nommée limite de fatigue ou limite d'endurance. Cette limite peut ne pas exister ou être mal définie pour certains matériaux (aciers à haute résistance, métaux non ferreux). Les grandes durées de vie concernent le domaine de la fatigue polycyclique.

- **Formule de Wöhler (1870)**

$$\sigma_a = a - b \log N \dots\dots\dots(\text{I.1})$$

Avec $a > 0$ et $b > 0$

Cette relation ne décrit pas la totalité de la courbe de Wöhler puisque σ_a ne tend pas vers une limite σ_D lorsque $N \rightarrow \infty$. Elle ne représente que la partie BC.

- **Formule de Basquin [7],[8]**

$$\log N = a - b \log \sigma_a \dots\dots\dots(\mathbf{I.2})$$

Avec $a > 0$ et $b > 0$

Où $N \sigma_a^b = C \dots\dots\dots(\mathbf{I.3})$

En posant $\beta = 1/b$ et $\ln C = a/\beta$; b est nommé index de la courbe de fatigue. Dans l'expression de l'équation (I-3) : la contrainte tend vers zéro quand N tend vers l'infini. Cette relation n'est donc représentative de la courbe de Wöhler que dans sa partie BC. Par ailleurs, elle représente des droites dans des axes logarithmiques et non dans des axes semi-logarithmiques.

I.6. Discussion sur la limite de fatigue [9] :

La courbe SN donne lieu à plusieurs règles de dimensionnement à la fatigue dont la justesse est contredite par les résultats obtenus en fatigue gigacyclique (10^9 cycles). La normalisation internationale présente la courbe **S-N** comme étant hyperbolique pour les aciers et quasi-hyperbolique pour les autres alliages. De cette hypothèse, il est admis que, au-delà de 10^7 cycles, la durée de vie en fatigue tend vers l'infini. Il est admis, de plus, que la valeur Asymptotique de la contrainte cyclique correspondant à 10^7 cycles devient une limite de fatigue, cette dernière étant déterminée par une approche statistique fondée sur une répartition log-normale de la dispersion, seconde hypothèse peu crédible au regard des résultats de fatigue giga cyclique. Faute d'avoir pu exploiter correctement les très grandes durées de vie de l'ordre du milliard de cycles, des spéculations hasardeuses ont été utilisées à partir du calcul d'un écart type, sur une population de résultats trop restreinte.

D'un autre point de vue, on a souvent tenté de trouver une relation entre le seuil de non propagation de fissure (K_s) et la limite de fatigue (σ_D) de la courbe SN. Cette relation ne peut exister que si la limite de fatigue, ou la résistance à la fatigue, est correctement déterminée. Dans la relation $\Delta K_s = \sigma_D \sqrt{\pi a}$, l'erreur sur K_s est assez faible parce que la pente de la courbe de fissuration à ce niveau de vitesse est quasi verticale. En revanche, l'expérience montre qu'entre σ_D à 10^6 cycles et 10^9 cycles il peut exister une différence supérieure à 30 %

[10]

Il a été montré que dans certains cas, la différence de résistance à la fatigue peut décroître de 100 MPa voire même de 200 MPa, entre 10^6 et 10^9 cycles à la rupture et que le concept de Limite infinie de fatigue n'est donc pas correct. Sous ces conditions, une limite de fatigue définie grâce à une analyse statistique entre 10^6 et 10^7 cycles ne peut pas garantir une durée de vie à la fatigue infinie.

Compte tenu de l'allongement de la durée d'utilisation et de la sécurité des équipements tels que les automobiles, les rails de chemin de fer, les avions, les compresseurs, les turbines, qui sont soumis à des chargements cycliques ou à des vibrations, durant leur service, peuvent atteindre 10^6 cycles, il est très important de pouvoir déterminer une limite d'endurance sûre pour 10^9 cycles (Bathias, 1999)

I.7. Paramètres d'influence sur la fatigue :

La durée de vie en fatigue des joints soudés est fortement affectée par la présence en pied du cordon d'une concentration de contrainte liée à la géométrie de la soudure. Les zones d'amorçage de la fissure sont en correspondance soit avec cet accident géométrique du cordon, soit avec un défaut interne (manque de pénétration, soufflures) ou externe (caniveaux, inclusions de laitier).

La résistance statique d'un assemblage soudé bout à bout est en général égale à celle du métal base par contre la résistance en fatigue est bien inférieure. Différents paramètres affectent la tenue en fatigue des joints soudés :

- facteurs géométriques : forme du cordon, mauvais alignement des tôles, épaisseur des tôles,
- facteurs métallurgiques : nature du métal base, procédé de soudage, défauts de soudage, niveau des contraintes résiduelles,
- facteurs liés à la sollicitation : mode de chargement (amplitude constante ou variable, rapport de charge), gradient de sollicitation, bi axialité des contraintes, environnement.
- Rapport de charge : La valeur du rapport de charge $R = \min / \max$ a une grande influence sur l'endurance en fatigue pour le matériau de base.

I.8. Limite de fatigue :

Pour une contrainte moyenne σ_m donnée, c'est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas observé de rupture après un nombre infini de cycle. Dans le cas particulier des aciers, il est expérimentalement constaté que ce nombre infini peut être ramené à 10^7 cycles. En revanche, pour les aciers en présence de corrosion et pour certains alliages d'aluminium, de cuivre ou de titane, cette limite de fatigue reste théorique et sans intérêt puisque tous les mécanismes ont une durée de vie limitée par suite de l'usure, la corrosion ou d'autres causes inhérentes à leur service même ; on est donc conduit à utiliser une autre grandeur appelée limite d'endurance.

I.9. Amorçage des fissures de fatigue [11]

Pour les structures soumises à des sollicitations variables au cours du temps, la ruine peut survenir au bout d'une durée finie. On définit souvent comme critère de ruine l'apparition d'une fissure d'une taille critique, a_{cr} . L'intervalle de temps, compris entre le Début de la sollicitation et l'instant correspondant à la présence d'une fissure de d'une taille critique, a_{cr} , couvre en réalité plusieurs phénomènes physiques.

L'observation de la fissuration dans les structures soumises à la fatigue montre que le processus qui conduit à la ruine peut être décomposé en plusieurs stades. Tout d'abord, dans les zones où le matériau est le plus sollicité, des microfissures apparaissent. Puis, elles se développent et coalescent les unes avec les autres jusqu'à ce qu'elles forment une fissure de taille macroscopique. Enfin, cette fissure se propage jusqu'à la ruine de la structure.

Il est d'usage de diviser la durée de vie d'une structure en deux phases : la phase d'amorçage et la phase de propagation.

Cependant, le problème de base consiste à définir le stade où l'amorçage se termine, c'est à dire où la propagation d'une fissure peut être décrite. La période de propagation pourrait être définie, par le stade à partir duquel une fissure unique s'amorce ou le stade où les microfissures commencent à coalescer ? Ou encore celui qui correspond à la création de la « première » microfissure" ?

Aujourd'hui encore, la définition de l'amorçage reste un problème ouvert. Pour dimensionner les structures soumises à la fatigue, l'ingénieur a besoin de modèles qui permettent d'estimer le nombre de cycles N et donc de calculer le nombre de cycles à l'amorçage N_a et le nombre de cycles à la propagation N_p . La mise en œuvre de tels modèles n'est pas facile puisque les durées respectives des phases d'amorçage et de propagation dépendent fortement de l'amplitude de la sollicitation, de la présence éventuelle de défauts initiaux dans le matériau, de l'état initial de la structure et de la définition que l'on a de l'amorçage.

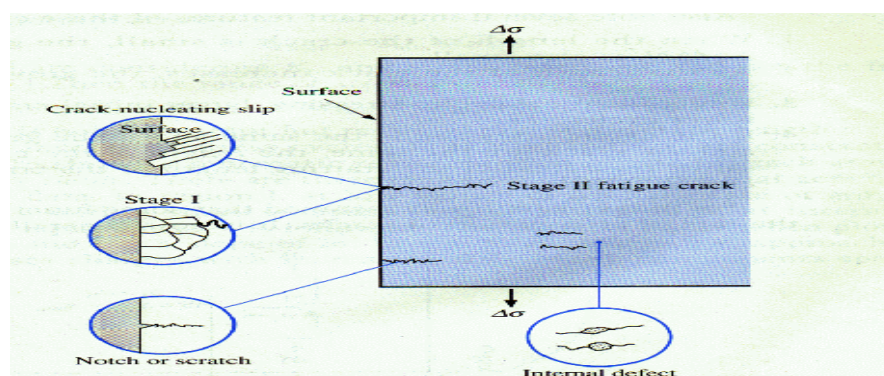


Figure I.6. Amorçage et propagation des fissures

I.10. Les critères de fatigue multiaxiaux

I.10.1. Critères de plasticité

I. 10.1.a. Critère de Von Mises

Ce critère permet de déterminer le seuil d'écoulement plastique d'un matériau métallique isotrope. C'est un critère énergétique. Le matériau est supposé entrer en plasticité lorsque son énergie de cisaillement atteint une valeur seuil.

Pour un tenseur de contraintes diagonales, le critère de Von Mises s'écrit :

$$\sigma \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \text{ Soit : } \sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Si $\sigma_{eq} < \sigma_e$ le comportement est élastique ; Si $\sigma_{eq} > \sigma_e$ écoulement plastique

I.10.1.b. Critère de Tresca :

Le critère de Tresca est aussi employé pour les métaux isotropes, c'est un critère en contrainte. Dans ce cas la plasticité est supposée se produire lorsque la contrainte de cisaillement maximale atteint une valeur seuil.

Le critère de Tresca s'écrit :

$$\sigma \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \text{ Avec } \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

Si : $|\sigma_1 - \sigma_3| < \sigma_e$ le comportement est élastique. ; $|\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_e$ Écoulement plastique.

I.10.2. Formalisme d'un critère de fatigue : [12]

Dans le cas général, un critère de fatigue met en relation des grandeurs issus des cycles de contraintes (amplitude, valeur moyenne, valeur maximale,...) et des limites d'endurance suivant plusieurs modes de sollicitations simples (traction alternée symétrique σ_{-1} , flexion alternée symétrique f_{-1} , traction répétée σ_0 , flexion répétée f_0 , torsion alternée symétrique τ_{-1} ,...). Un critère de fatigue peut donc être représenté à l'aide d'une fonction de fatigue, cette dernière est prise égale à l'unité lorsque la limite d'endurance ou la limite de fatigue du matériau est atteinte : $E = (|\sigma_{ij}(t)|_r, \sigma_{-1}, f_{-1}, f_0, \tau_{-1}, \dots) = 1$

Cette relation de fatigue traduite par la fonction E , le caractère plus ou moins endommageant du cycle de contrainte appliqué. Il existe trois cas que peut prendre la fonction

- $E < 1$: le critère de fatigue prévoit l'amorçage d'une fissure au-delà du nombre N cycles définissant l'endurance du matériau.
- $E > 1$: le critère prévoit au contraire l'apparition d'une fissure avant l'application de N cycles au seuil d'endurance.
- $E = 1$: la durée de vie de matériau soumis au cycle multiaxial considère coïncide avec la durée de vie du matériau correspondant aux limites d'endurance utilisées pour calculer E .

I.10.3. Les critères d'approche globale

Cette catégorie de critère peut elle-même être scindée en trois groupes distincts :

- * Les critères utilisant des invariants (I_1, J_2) du tenseur des contraintes ou de son déviateur. Les principaux auteurs de critères d'approche globale de ce type sont Sines, Cross land.
- * Les critères dont la fonction de fatigue est obtenue à l'aide d'une moyenne quadratique d'un indicateur d'endommagement F_h sur l'ensemble des plans possibles passant par le point matériel où l'analyse en fatigue est réalisée. Le caractère global de l'approche provient de la contribution de tous les plans à la fonction de fatigue du critère.
- * Les critères basés sur une approche énergétique, où la fonction de fatigue combine les énergies de changement de volume et de changement de forme développées par les contraintes au cours du cycle.

I.10.3.a. Critère de Marin [13] :

C'est une généralisation de l'ellipse de Marin qui est une relation uniaxiale traduisant l'influence de la contrainte moyenne de traction sur la limite d'endurance en traction – compression asymétrique pour un état de contraintes multiaxiales. Marin reprend la même relation en remplaçant la contrainte de traction par la racine carrée du second invariant J_2 du déviateur des contraintes à un facteur multiplicateur près, on obtient le critère suivant :

$$\left| \frac{\sqrt{3}}{f} \xi_a \right|^2 + \left| \frac{\sqrt{3}}{R_m} \xi_m \right|^2 \leq 1 \dots \dots \dots \text{(I.4)}$$

ξ_a et ξ_m Sont respectivement l'amplitude et la contrainte moyenne de $\sqrt{J_2}$.

Le facteur $\sqrt{3}$ est nécessaire pour ce critère

I.10.3.b. Critère de Sines [14,15]:

Selon Sines la contrainte équivalente est une combinaison linéaire de τ_a , amplitude de $\sqrt{J_2}$ et de P_m qui est la valeur moyenne de la pression hydrostatique. Ce critère est représenté sur la figure II.11.

$$\tau_a + aP_m \leq b \dots\dots\dots(\text{I.5})$$

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

$$b = \tau_{-1} \dots\dots\dots(\text{I.6})$$

$$a = \frac{\tau_{-1} - \frac{f_0}{\sqrt{3}}}{\frac{f_0}{3}} \dots\dots\dots(\text{I.7})$$

La deuxième version du critère a pour objectif d'accélérer les calculs en évitant de balayer l'ensemble des plans critiques physique pour la détermination du plan critique, en introduisant la racine carrée du second invariant du déviateur de contraintes .

Cette version garde les mêmes formules pour déterminer les constantes α, β

I.10.4. Critères de type plan critique :

Leurs auteurs considèrent que l'endommagement de la matière est localisé sur un plan dit critique, qui dépend du cycle multiaxial considéré. La définition du plan critique supposé

voir apparaître la fissure est basé sur le choix des paramètres des contraintes s'exerçant sur ce plan et de paramètres issus des invariants de contraintes ou de son déviateur .

Les contraintes intervenant dans ce type de critère sont les contraintes normales et tangentielles agissant sur le plan critique P_c de normale \vec{n} (figure II.9). Cette normale est définie par les angles θ et ϕ par rapport à un repère fixe lié à la matière. Le vecteur contrainte \vec{S}_n en tout point (O) relativement à la direction \vec{n} se définit suivant la relation suivante : $S_n(\vec{0}) = \overline{\sigma}(\vec{0}) \cdot \vec{n}$

La composante normale de $\vec{\sigma}_n$ du vecteur contrainte \vec{S}_n s'écrit :

$$\vec{\sigma}_n = \left(\vec{n}' \cdot \overline{\sigma} \cdot \vec{n} \right) \cdot \vec{n} \dots\dots\dots(\text{I.8})$$

I.10.4.a. Critère de Matake [15]:

Matake a formulé son critère à la base de ceux de Stulen – Cummings et de Findly, la différence réside dans le choix du plan critique, celui où l'amplitude de cisaillement est maximale dans le plan normal ; la fonction de fatigue est donnée par :

$$\tau_a + \alpha \sigma_n^{\max} \leq \beta \dots\dots\dots(\mathbf{I.9})$$

Les constantes α, β sont déterminés par :

$$\alpha = \frac{\tau_{-1} - \frac{f_{-1}}{2}}{\frac{f_{-1}}{2}} \dots\dots\dots(\mathbf{I.10})$$

$$\beta = \tau_{-1} \dots\dots\dots(\mathbf{I.11})$$

I.10.4.b. Critère de Dang-Van [15,16]:

Il existe deux versions de ce critère, la première version utilise les grandeurs macroscopiques des contraintes qui sont la partie alternée du cisaillement et la pression hydrostatique. La fonction de fatigue est une maximisation d'un indicateur de dommage par plan défini par :

$$\tau_a + \alpha P_H \leq \beta \dots\dots\dots(\mathbf{I.12})$$

Les constantes α, β sont déterminées par :

$$\alpha = 3\left(\frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} - \frac{1}{2}\right) \dots\dots\dots(\mathbf{I.13})$$

$$\beta = \tau_{-1} \dots\dots\dots(\mathbf{I.14})$$

La condition de validité de cette version du critère est :

$$\frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} > \frac{1}{2} \dots\dots\dots(\mathbf{I.15})$$

La deuxième version du critère a pour objectif d'accélérer les calculs en évitant de balayer l'ensemble des plans critiques physique pour la détermination du plan critique, en introduisant la racine carrée du second invariant du déviateur de contraintes.

Cette version garde les mêmes formules pour déterminer les constantes α, β

I.10.5. Critères empiriques :

Ces formalismes sont issus de résultats expérimentaux obtenus par l'application des sollicitations uniaxiales et parfois multiaxiales dans le domaine de l'endurance illimité, et pour un matériau donné, On cite les critères suivants

I.10.5.a. Critère de Gough et Pollard :

Les auteurs de ces critères inspirent leurs formules à partir des essais de flexion et torsion, ils présentent deux formulations sous formes d'ellipse, la première est destinée aux matériaux ductiles, tandis que la deuxième est destinée aux matériaux fragiles :

$$\left(\frac{f_a}{f_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}}\right)^2 = 1 \dots\dots\dots \text{(I.16)}$$

$$\left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{f_{-1}}{\tau_{-1}} - 1\right)\left(\frac{f_a}{f_{-1}}\right)^2 + \left(2 - \frac{f_{-1}}{\tau_{-1}}\right)\left(\frac{f_a}{f_{-1}}\right) = 1 \dots\dots\dots \text{(I.17)}$$

Gough et Pollard ont conclu que l'influence d'une traction statique superposée à une flexion alternée est négligeable du point de vue de résistance à la fatigue.

I.10.5.b. Critère de Hohenemser et Prager :

Ce critère est obtenu à partir des essais de traction, torsion ou le cisaillement qui est variable et la contrainte normale de traction σ_n est statique :

$$\left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}}\right)^2 + \frac{\sigma_n}{R_m} \leq 1 \dots\dots\dots \text{(I.18)}$$

I.10.5.c. Critère de Davies : [16]

L'auteur de ce critère adopte une formulation semblable à celle de Hohenemser – Prager. Il ne modélise plus l'évolution de l'amplitude du cisaillement admissible en fonction d'une contrainte normale statique σ_n mais l'inverse, il observe l'amplitude de la contrainte de cisaillement statique τ_m .

CHAPITRE II

LES

TRAITEMENTS DE

SURFACE

II -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 telles que la résistance à la corrosion, la 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 la 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.

II-2.L'origine des contraintes résiduelles**II-2.1. Définition :**

Dans les conditions normales de température, les contraintes résiduelles sont des contraintes internes multiaxiales statiques qui existent dans un matériau qui n'est soumis à aucun effort extérieur [17]. Généralement, les procédés de fabrication et les traitements thermiques ou thermochimiques sont les sources des contraintes résiduelles.

II -3. Les traitements mécaniques superficiels :

On distingue plusieurs types de traitements : mécanique, thermique et thermochimiques...etc. En ce qui concerne les traitements mécaniques superficiels, les couches superficielles des pièces sont déformées plastiquement par une action mécanique provoquée par la projection de grenailles, le galetage, les ondes de choc. Ces divers procédés sont présentés dans le **tableau II.1**.

Tableau II.1 : Différents traitements mécaniques de surface [18].

Dénomination	Mises-en oeuvre	Profondeur de traitement	Avantages et inconvénients
Tribofinition	Frottement	De 0,01 à 0,03 mm	Long et coûteux
Grenaillage	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. 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)

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).

II -3.1. Les avantages des traitements mécaniques superficiels :

Tous les traitements mécaniques utilisés introduisent dans les couches superficielles du matériau des déformations plastiques. La nature de la réponse du matériau (adaptation ou accommodation), sous un chargement donné, conditionne en grande partie la valeur de la contrainte résiduelle introduite.

La figure II.1 montre la valeur de la contrainte résiduelle induite selon la nature de la réponse.

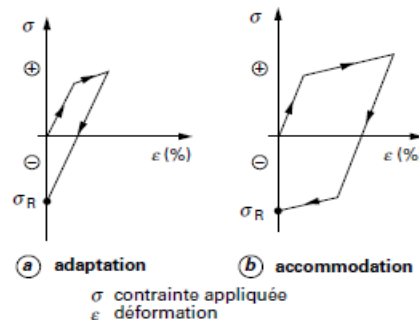


Figure II.1 Trajet de déformation élasto-plastique à champ de déformation hétérogène [17].

II -3.2. Grenailage de précontrainte (shot peening) :

Ce traitement consiste en une technique d'écrouissage superficiel des pièces métalliques basé sur la projection à grande vitesse de grenailles (entre 10 et 100 m /s) de forme sphérique sur les surfaces des pièces à traiter.

L'impact entre les billes et la surface du matériau crée une déformation plastique (**figure II.2**). Ce qui provoque la création des contraintes résiduelles de compression. Ces contraintes ont un effet bénéfique sur l'augmentation de la résistance à la fatigue des pièces traitées [19].

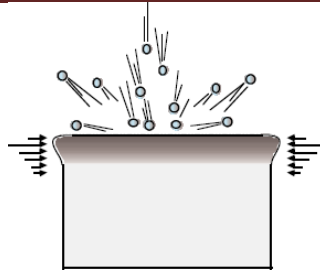


Figure II.2 Principe du grenailage de précontrainte [19].

II -3.2.1. La machine de projection :

Il existe trois types d'équipements qui sont destinés pour ce genre de traitement.

a)- Les turbines :

Sont des unes machines qui travaillent en vase clos pour des raisons de sécurité (projection de micros-billes à grande vitesse...). Grâce à une vitesse élevée de rotation des roues à palettes (1000 à 3000 tr/min), les grenailles sont soumises à une force centrifuge suffisante pour écrouir le matériau [19].

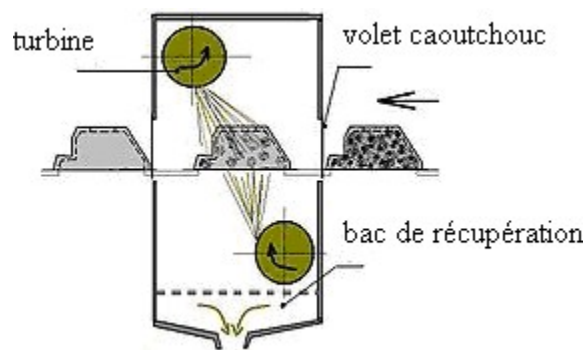


Figure II.3 Grenailleuse à turbine [20].

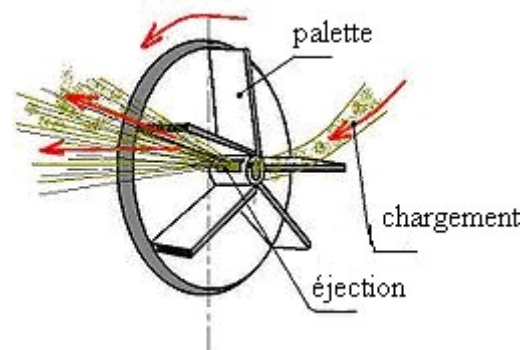


Figure II.4 Roue à palettes [19].

b)- Machine à air Comprimé :

Le principe de fonctionnement de ce type de machine (figure II.5) est basé sur l'utilisation de l'air comprimé. Les grenailles sont propulsées, à grande vitesse, par de l'air comprimé. L'avantage de ce procédé est la précision de localisation des surfaces à traiter. Ces machines sont particulièrement adaptées pour les traitements des pièces possédant des cavités ou des surfaces complexes [21].

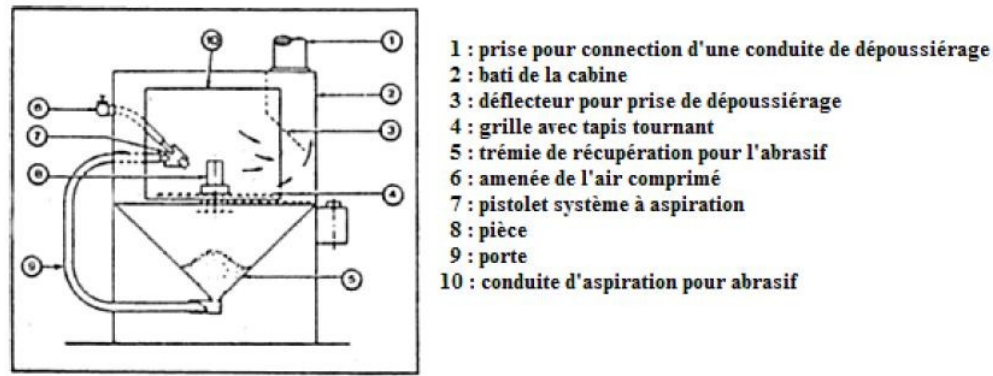


Figure II.5 Schéma d'une machine à air comprimée [22].

c)- Machine à ultrasons :

Les machines ultrasons sont récentes. Le principe de fonctionnement est basé sur l'accélération des particules dures par des hautes fréquences (20 kHz). Elles sont constituées d'une enceinte de traitement dans laquelle les particules sont placées. La pièce à traiter est placée au bac de traitement, de sorte que les grenailles frappent la pièce de toutes les directions (Figure II.6). Ce type de machine utilise des grenailles de grandes dimensions par rapport aux autres types de machines.

Pour ce traitement les billes solides sont utilisées une fois au cours de l'essai, ce qui représente un avantage au niveau de la quantité du traitement [21].

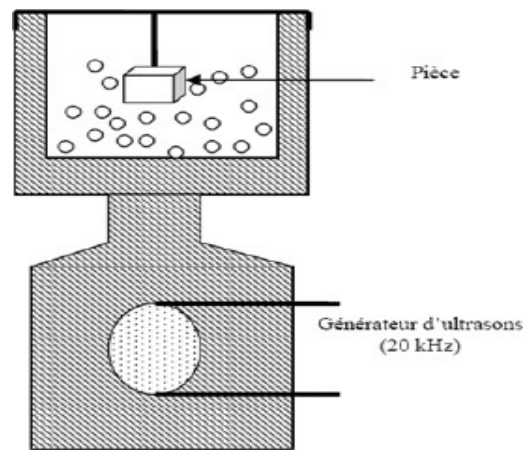


Figure II.6 Principe d'érosion par ultrasons [21].

II -3.2.2. Nature et dimensions des grenailles :

Selon la nature des grenailles, on peut les classer en 3 familles [22].

- Grenaille d'acier.
- Grenaille de céramique.
- Grenaille de verre.

Ces trois familles se distinguent par leurs caractéristiques mécaniques,

leur masse volumique et leur dureté (tableau II.2) [23].

Tableau II.2 : Caractéristiques mécaniques des billes de grenailage.

Nature de la bille	Masse volumique (g/ cm ³)	Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Dureté Vickers (daN /mm ²)
Acier	7.5	210 000	0.23	470-540
Céramique	3.8	80 000	0.20	800-10
Verre	2.5	65 000	0.23	500-530

Le choix de la bille dépend des critères technologiques et économiques.

Le diamètre de la bille est choisi en fonction de la géométrie de la pièce à traiter et de la profondeur de la couche à écrouir (Figure II.7) [23].

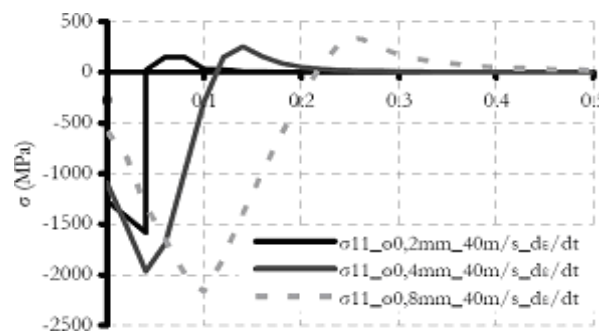


Figure II.7 Influence du diamètre de la grenaille sur les états de contrainte résiduelle en profondeur [24].

II -3.2.3. Paramètres du grenailage :

Le grenailage de précontrainte est défini par plusieurs paramètres tels que la nature de la pièce à traiter et les conditions de projection des billes. Nous citons quelques paramètres essentiels.

a). Vitesse de projection :

La vitesse de projection est un paramètre qui conditionne l'énergie cinétique de la grenaille.

La vitesse est généralement comprise entre 20 et 100 m/s [25] ; elle augmente la zone affectée par

le traitement et le niveau des contraintes résiduelles induites. La figure II.8 représente cet effet. L'ajustage de la vitesse s'effectue en adaptant la vitesse de rotation de la turbine ou le diamètre de la buse d'air.

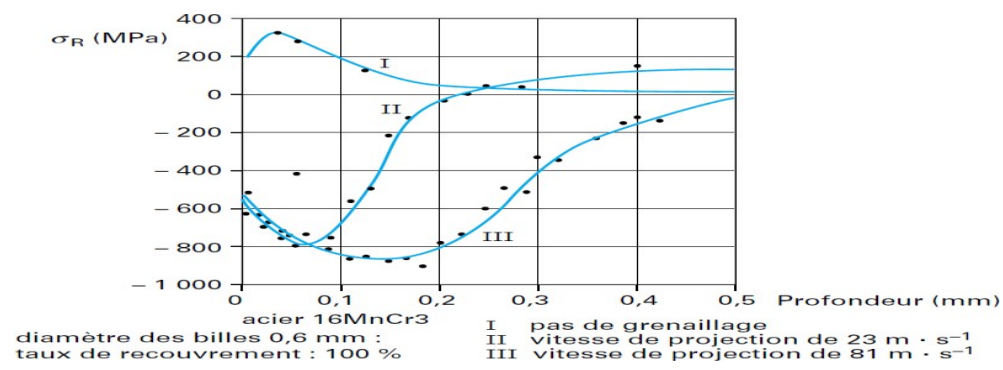


Figure II.8. Influence de la vitesse sur les contraintes résiduelles [18].

b). Diamètre de la bille :

L'influence du diamètre de la bille est illustrée dans la **figure II.9**. L'augmentation de diamètre des billes accroît la profondeur affectée sans changer les valeurs des contraintes résiduelles engendrées (en surface et en profondeur).

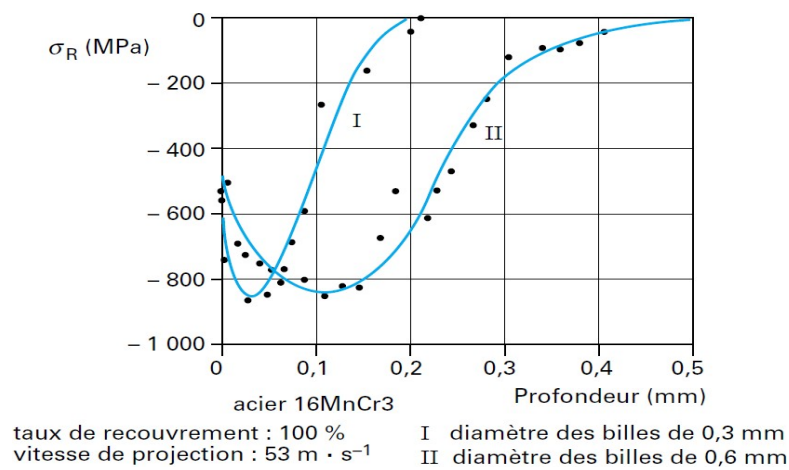


Figure II.9. Influence du diamètre des billes sur les contraintes résiduelles [18].

c). Taux de recouvrement :

L'influence de ce paramètre est liée à la durée de l'opération et est illustrée sur la **figure II.10** dans le cas d'un matériau faiblement allié à l'état trempé et revenu. Pour des paramètres fixés (diamètre et vitesse), le taux de recouvrement se traduit par l'augmentation de la profondeur et le maximum de la contrainte résiduelle de compression avec un déplacement vers l'intérieur de la pièce.

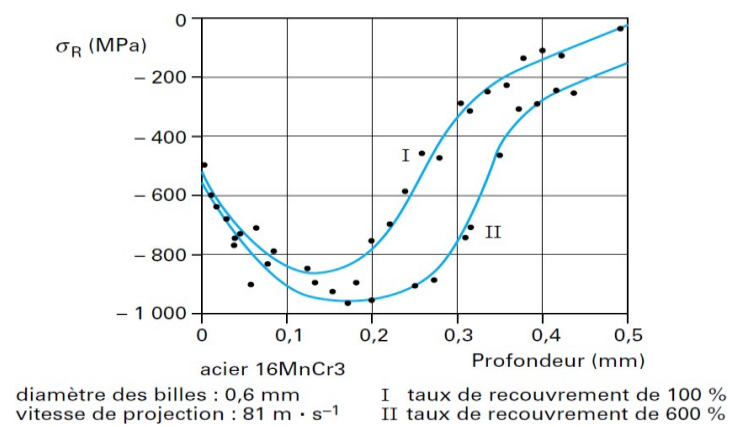


Figure II.10. Influence du taux de recouvrement sur les contraintes résiduelles [18].

d)-Influence de la loi de comportement de la bille [21] :

La loi de comportement choisie pour la bille influe de façon importante sur les profils des contraintes résiduelles. Le fait que la bille ait un comportement élastoplastique entraîne un écoulement plastique dans la bille au niveau de la zone de contact. Youcef et al [25] ont étudié l'influence du choix de la loi de comportement des billes sur les profils des contraintes résiduelles. La figure II.11 montre les résultats obtenus.

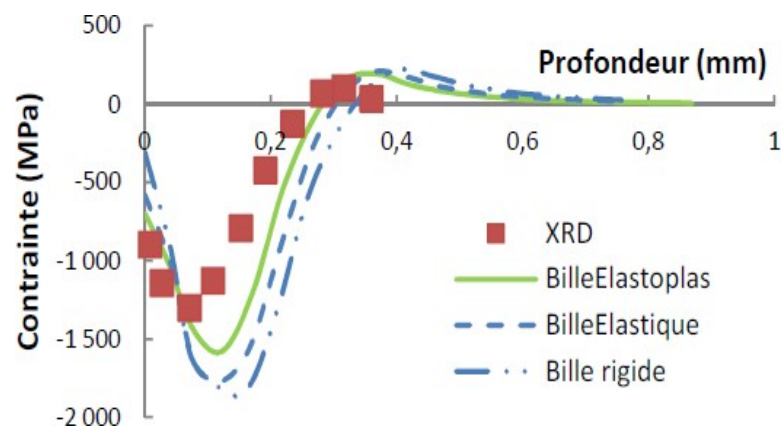


Figure II.11. Effet de la loi de comportement du matériau de la bille [26].

e)-Influence de la loi de comportement du matériau [21] :

Les lois d'écroissage cinématique produisent un profil de contraintes résiduelles radiales atypique qui est dû à un écoulement plastique qui se produit pendant la phase de "décharge" de la bille. Cet écoulement plastique se produit près de la surface et a tendance à diminuer la valeur absolue de la contrainte dans cette zone. Ce phénomène est d'autant plus important que la pente d'écroissage est importante, il est beaucoup moins prononcé dans le cas où la bille est élastoplastique. Il apparaît donc essentiel de déterminer la loi de comportement des matériaux et

la pente d'écroissage adaptée, et ceci sur une plage importante de déformation. Youcef et al

[25].

ont considéré les modèles suivants :

- Elastoplastique à écrouissage isotrope.
- Elastoplastique à écrouissage cinématique de type linéaire.
- Modèle de Johnson-Cook.

La figure II.12 représente les résultats.

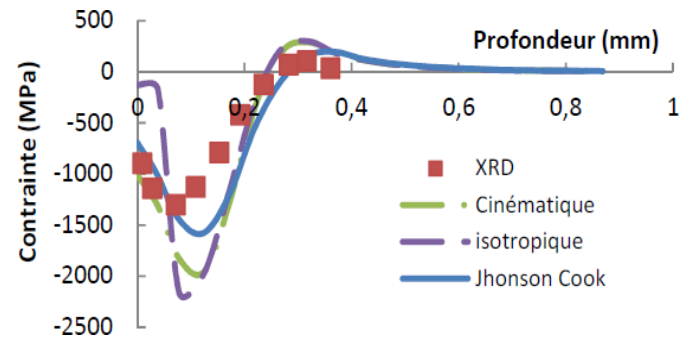


Figure II.12 Effet de la loi de comportement du matériau [26].

II -3.2.4. Contrôle du procédé de grenailage (Intensité Almen) :

Les différents paramètres de grenailage rendent très délicat le contrôle de ce type de traitement superficiel. Pour maîtriser tant de facteurs indépendants, les industriels utilisent un repère technologique mis au point par J.O.Almen de General Motors (spécification SAE J442/443 et norme NF L 06-832) et illustré par la figure II.13 [18]. On utilise une éprouvette en acier au carbone du type XC65 (SAE 1070) [18,25] trempée et revenue, fixée sur un support et exposée à un jet de grenailles. Après l'opération la plaque Almen (Almen strip) est retirée de son support. Elle présente une courbure convexe sur la face traitée. La mesure de la flèche à l'aide de comparateur Almen est l'intensité Almen qui caractérise l'énergie du jet de grenailage. Les normes définissent trois types de plaques N, A et C (figure II.13). Par exemple, un grenailage d'intensité Almen F15A se traduit comme suit : F : Norme Française, 15 : flèche de 0,15 mm, A : plaque de type A.

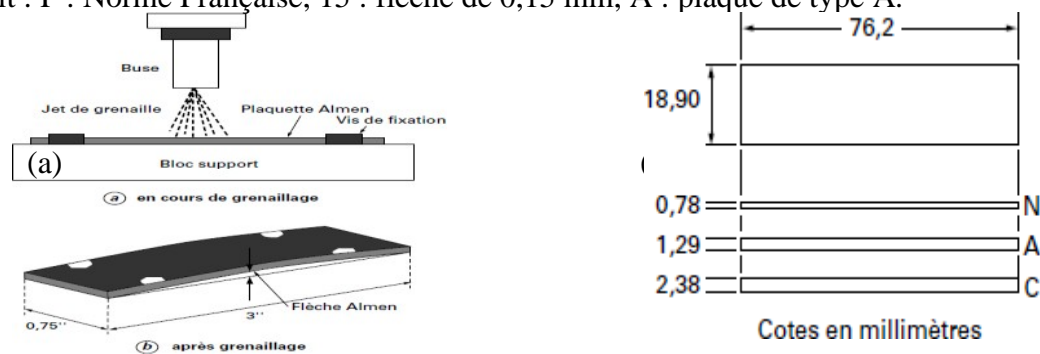


Figure II.13 Montage pour la détermination de l'intensité Almen (a), Plaques Almen (b).

La **Figure II.14** illustre l'utilisation de la flèche d'Almen afin de déterminer les paramètres du grenailage. Elle est obtenue en traçant la courbe de saturation en fonction du temps d'exposition. Au bout d'un certain temps de grenailage, la flèche n'évolue quasiment plus. Selon la norme, le temps de saturation est défini comme étant le temps d'exposition t_s 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 $2t_s$ [21] comme c'est illustré sur la **figure II.15**.

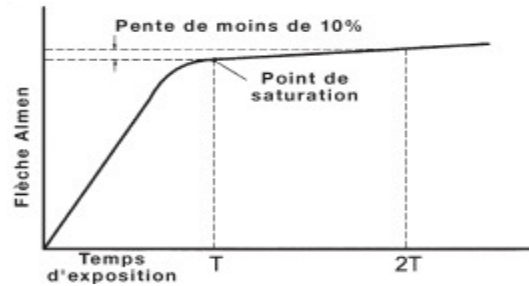


Figure II.14 Définition de la courbe de saturation de la flèche Almen [21].

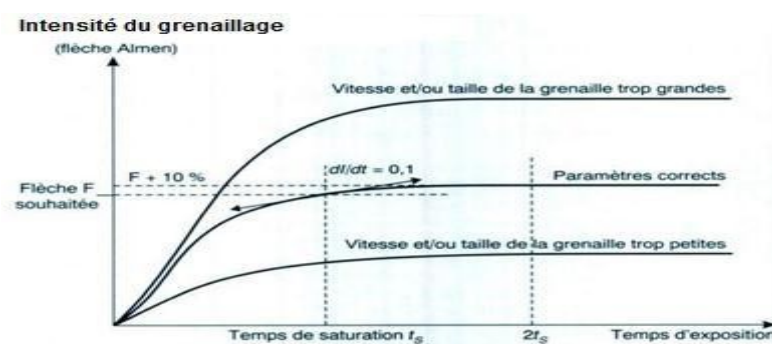


Figure II.15 Courbe et temps de saturation [21].

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.

II -3.2.5. Effet du grenailage de précontrainte :

L'action du grenailage est double. Le premier effet « de peau » se traduit par la modification de la rugosité, le « gommage » des défauts superficiels mais également par un fort écrouissage local du matériau qui altère plus ou moins fortement sa capacité de déformation ultérieure et sa dureté.

Le second effet, « en profondeur », s'interprète par une génération d'un champ de contraintes résiduelles de compression qui constitue l'atout majeur du traitement. Selon la théorie de Wohlfahrt [18,21], la génération d'un champ de contraintes résiduelles de compression est due à la superposition de ces deux processus compétitifs comme le précise la **figure II.16**. Une couche superficielle plus ou moins étendue subit un étirement plastique sur une profondeur de 10 à 30 μm par effet de martelage sous l'impact répété des billes (surface hammering). Cet effet est très important dans le cas d'un substrat ductile grenailé avec des particules dures. Il donne naissance à un profil de contraintes résiduelles présentant un maximum de compression en surface. On peut de nouveau schématiser le phénomène en remarquant que le retour élastique du substrat « impose » une déformation nulle à la couche affectée avec comme conséquence la mise en compression de celle-ci. Les impacts multiples produisent un chargement normal à la surface auquel correspond selon la théorie de Hertz un maximum de contrainte de cisaillement à une profondeur déterminée. Si cette contrainte dépasse la limite d'écoulement en cisaillement, il y a déformation plastique locale avec création d'un état de compression résiduelle maximal à cette profondeur. Cet effet est surtout important dans le cas d'un substrat peu ductile, grenailé par des billes de dureté relativement faible.

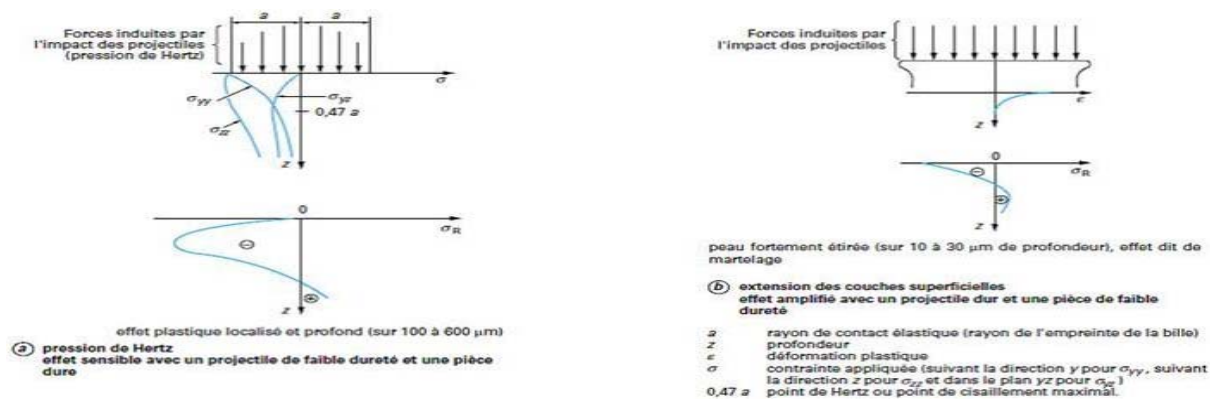


Figure II.16 Origine des contraintes résiduelles générées par grenailage [18].

II -3-3- 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 de 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 II.18) [27].

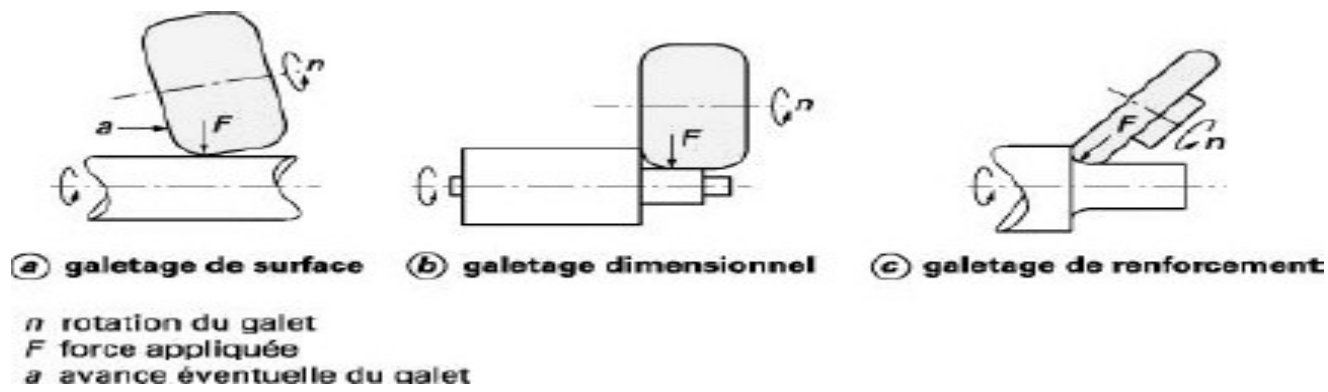


Figure II.17 Différents types de galetage [27].

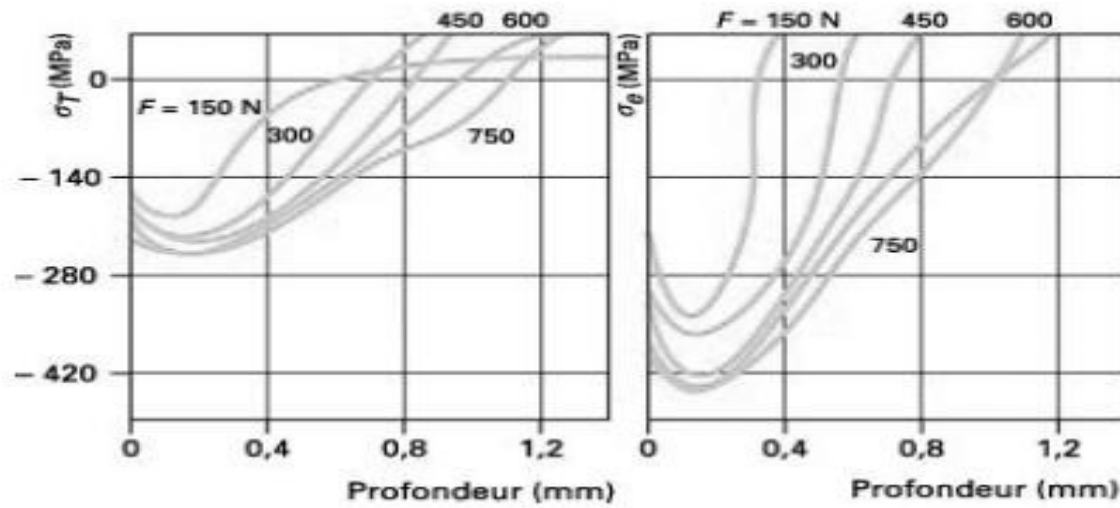


Figure II.18 Variation des contraintes résiduelles transversale et longitudinale mesurées en fonction de la charge appliquée [27].

II -3-4- 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 II.19 représente le profil de la distribution des contraintes résiduelles obtenues sur une pièce en Inconel 718 traitée par choc laser.

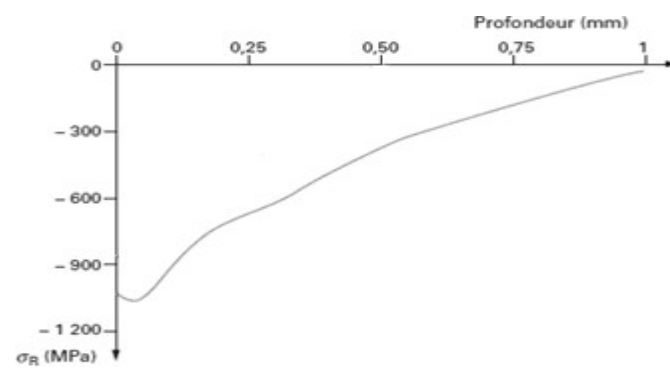


Figure II.19 Profils des contraintes résiduelles dans une pièce en Inconel 718

Traitée par choc laser [18].

II -4- Les traitements thermochimiques de surfaces [28] :

Ces traitements sont effectués dans un milieu particulier lequel a pour fonction d'attirer un ou plusieurs éléments chimiques. Ces éléments vont enrichir la surface du matériau et diffuser sur une certaine profondeur en provoquant ainsi des modifications des propriétés mécaniques superficielles. Ces traitements améliorent :

- La résistance au grippage et corrosion
- La résistance à l'usure,
- La tenue à la fatigue (flexion, torsion, ...),

Il existe de nombreux types de traitements thermochimiques qui diffèrent par la nature des éléments diffusants, du type d'interaction et de la nature du milieu.

II -4-1. La cémentation :

Son principe consiste en un enrichissement en carbone (cémentation) ou carbone + azote (carbonitruration) grâce à une atmosphère gazeuse appropriée. Cette opération est suivie immédiatement d'une trempe à l'huile. Ce traitement confère aux pièces des duretés de surface élevées et des duretés à cœur qui sont fonction de la nuance de l'acier employé ainsi qu'un excellent compromis entre une résistance à l'usure élevée et une bonne ductilité.

Les profondeurs de traitement pouvant être réalisées en fonction de la durée du cycle thermique et de la matière employée [29].

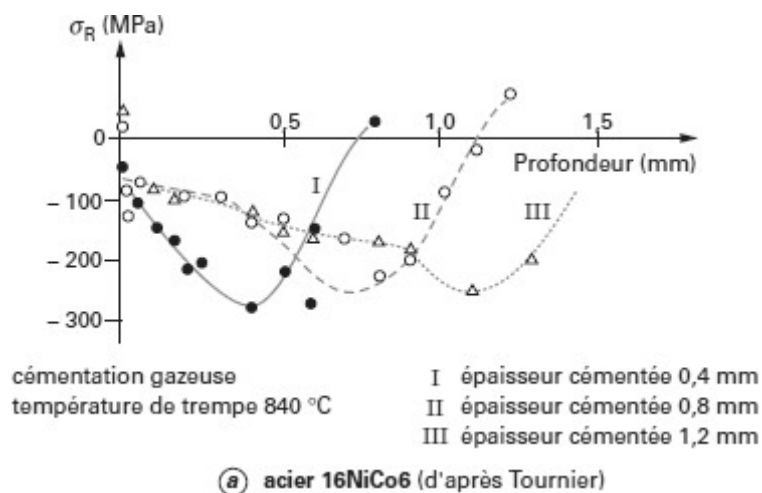


Figure II.20 Contraintes résiduelles dans une couche cimentée et trempée [18].

II -4-2. Nitruration :

a) Généralités :

Le terme nitruration est commun à tous les traitements qui ont pour but de durcir les matériaux ferreux par la diffusion d'un élément de base qui est l'azote à une température inférieure au point de transformation de l'acier de base [28].

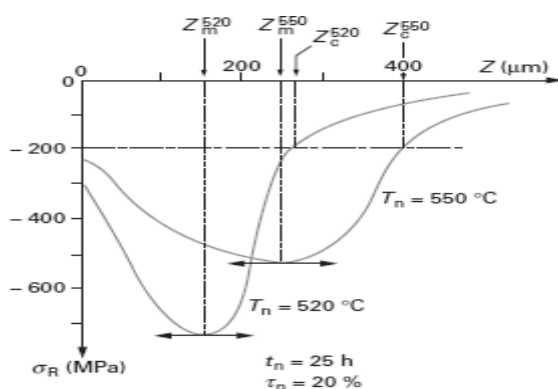


Figure II.21 Contraintes résiduelles après nitruration gazeuse [18].

II -4-3. L'effet des traitements de surfaces sur la tenue en fatigue :

Grenailage et Choc laser : [24]

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 [24].

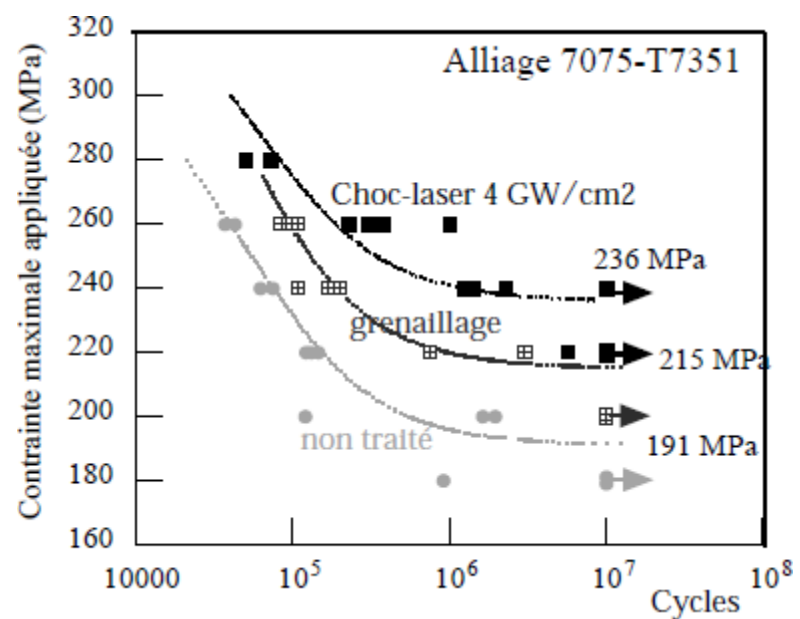


Figure II.22 Amélioration de la tenue en fatigue par choc laser en confinement eau [24].

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 III
CALCUL DE
DUREE DE VIE DES
STRUCTURES

III.1-introduction :

Dans le domaine de la fatigue, il est nécessaire d'utiliser des critères de fatigue pour conception des structures. Par exemple, le critère de Crossland est utilisé pour estimer durée de vie des structures sollicitées à des charges périodiques d'amplitudes constantes, et il existe d'autres critères utilisés dans le même but. Pour cette raison, nous avons discuté dans cette étude d'une comparaison de la durée de vie calculée pour certains critères.

Mais dans certains cas, la durée de vie est relativement courte. Dans ce cas, il est judicieux d'effectuer des traitements de surface afin d'améliorer la résistance à la fatigue. En effet, les traitements de surface introduisent des contraintes résiduelles et des déformations plastiques dans le matériau. Ce double effet doit être pris en compte par les critères de fatigue.

III.2. Critère de Crossland : [29]

Le critère de Crossland [1956] appartient à la famille de critère d'approche globale. Il est considéré parmi les critères les plus utilisés dans le domaine de fatigue à grand nombre de cycles.

Le critère de Crossland est basé sur une combinaison linéaire entre la pression hydrostatique maximale et la racine carrée de deuxième invariant du déviateur de contrainte alternée.

Le critère de Crossland s'écrit comme suit :

$$\xi_a + a \cdot P_{\max} \leq b \dots\dots\dots (III.1)$$

Les constantes a et b sont identifiées à partir deux essais : de torsion et de flexion purement alternées. Ces constantes sont déterminées par les relations suivantes :

$$b = \tau_{-1}(N) \dots\dots\dots(III.2)$$

$$a = \frac{\tau_{-1}(N) - \frac{f_{-1}(N)}{\sqrt{3}}}{\frac{f_{-1}(N)}{3}} \dots\dots\dots(III.3)$$

$$N \geq N_k : \tau_{-1} = \tau_{-1}(N) \text{ et } f_{-1} = f_{-1}(N)$$

$\tau_{-1}(N)$: Limite de fatigue à N cycles en torsion alternée

$f_{-1}(N)$: Limite de fatigue à N cycles en flexion alternée

τ_{-1} : Limite d'endurance en torsion alternée

f_{-1} : Limite d'endurance en flexion alternée

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

Le deuxième invariant du déviateur des amplitudes de contrainte $\bar{\sigma}_a$ est exprimé par la relation suivante :

$$\xi_a = \frac{(\sigma_{VM})_a}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(III.4)$$

La pression hydrostatique est définie par la relation suivante :

$$P_{\max} = \frac{1}{3} \cdot [tr(\bar{\sigma}_m) + tr(\bar{\sigma}_a)] \dots\dots\dots(III.5)$$

$(\sigma_{VM})_a$: Contrainte de Von-Misés du tenseur des amplitudes de contrainte $\bar{\sigma}_a$.

$\bar{\sigma}_m$: Tenseur de contrainte moyenne.

$\bar{\sigma}_a$: Tenseur des amplitudes de contrainte.

Pour appliquer le critère de Crossland à des matériaux, il faut que le matériau vérifie la condition suivante :

$$\frac{f_{-1}}{\tau_{-1}} < \sqrt{3} \dots\dots\dots(III.6) [30]$$

La même condition doit être vérifiée pour intégrer l'effet des contraintes résiduelles.

L'équation (III.1) permet de tracer le diagramme de Crossland dans lequel on peut distinguer deux zones. La 1^{ère} zone est la zone de sécurité, pour laquelle la durée de vie est illimitée (au-dessous de la droite) (**figure III.1**). La seconde zone est la zone d'endurance limitée pour laquelle la durée de vie est limitée (au-dessus de la droite).

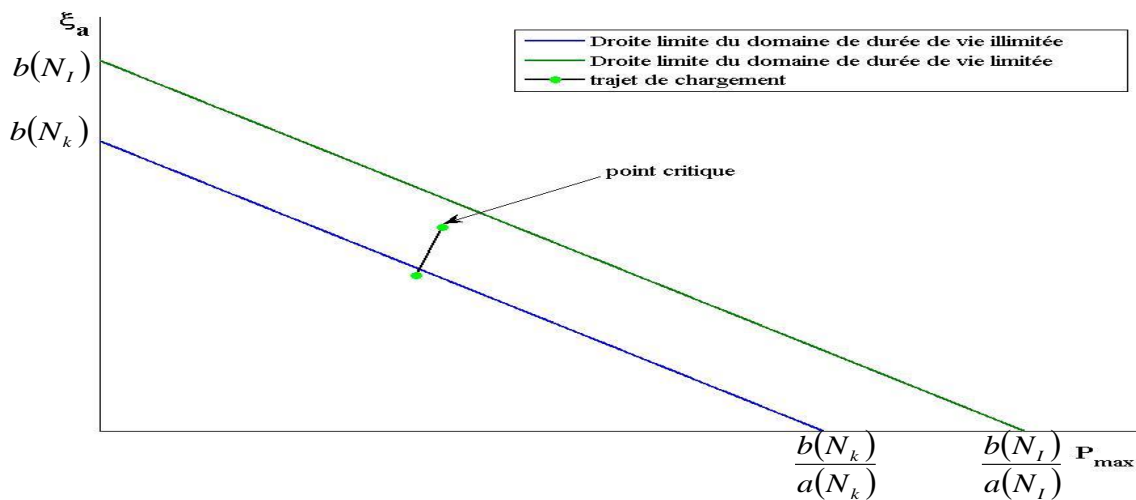


Figure III.1. Position de composants (P_{\max}, ξ_a) dans le diagramme de Crossland

III.2.2- Critère de Marin :

Ce critère fait une comparaison entre $\sqrt{3}\xi_a$ (la contrainte équivalente des parties alternées de tenseur des contraintes) par rapport à σ_{-1} et $\sqrt{3}\xi_m$ (la contrainte équivalente des contraintes moyennes) par rapport à R_m [1]

$$E_{MA} = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sigma_{-1}} \xi_a \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{R_m} \xi_m \right)^2 \leq 1 \dots\dots\dots(III.7)$$

Pour le diagramme de Marin nous déduisons une relation entre les paramètres de critère (ξ_a, ξ_m) comme suit :

$$\left(\frac{\sqrt{3}}{\sigma_{-1}} \xi_a \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{R_m} \xi_m \right)^2 = 1 \dots\dots\dots(III.8)$$

Par remplacement de ξ_a par y et ξ_m par x nous obtenons :

$$y = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \frac{3x^2}{R_m^2}} \dots\dots\dots(III.9)$$

$$\begin{cases} \text{Pour } x = 0 \Rightarrow y = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{3}} \\ \text{Pour } y = 0 \Rightarrow x = \frac{R_m}{\sqrt{3}} \end{cases}$$

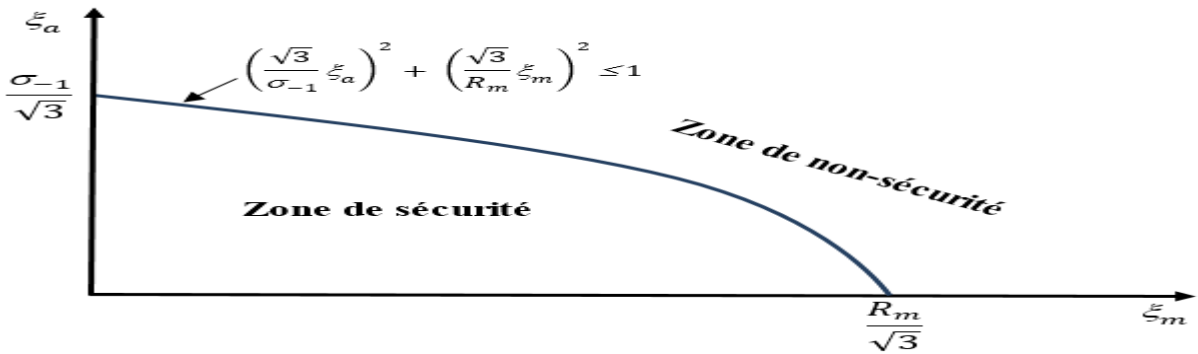


Figure III.2. Positions des composantes (ξ_a, ξ_m) sur le diagramme de Marin.

III.2.3 -Critère de Sines :

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 :

$$\tau_a + aP_m \leq b \dots\dots\dots(III.10)$$

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

$$b = \tau_{-1} \dots\dots\dots(III.11)$$

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

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.

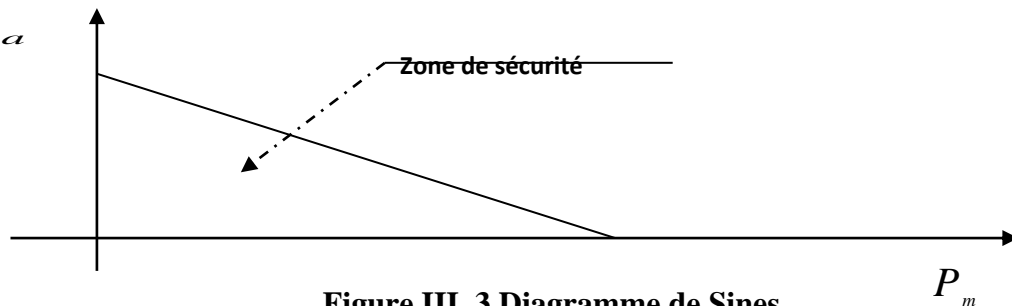
Sa formulation est la suivante :

$$\tau_a + aP_m \leq b \dots\dots\dots(\text{III.12})$$

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

$$b = \tau_{-1} \dots\dots\dots(\text{III.13})$$

$$a = \frac{\tau_{-1} - \frac{f_0}{\sqrt{3}}}{\frac{f_0}{\frac{3}{2}a}} \dots\dots\dots(\text{III.14})$$



III.3-Méthodologie de travail :

a)- Les étapes de travail sont :

La 1^{ère} étape :

Connaître les caractéristiques mécaniques, c'est-à-dire le module de Young, coefficient de poisson et les courbes de Wöhler en torsion et flexion alternées. Le calcul des constantes **a** et **b** pour tracer les droites de Crossland sont déterminées respectivement par **les équations (III.3) et (III.2)**.

La 2^{ème} étape :

Afin déterminer le champ de contraintes, nous avons procédé de la manière suivante :

- 1- Utilisation des données de la 1^{ère} étape module de Young et coefficient de poisson pour calculer les paramètres de Crossland (introduction de données dans Ansys),
- 2- Création de la géométrie de l'éprouvette et application des chargements et des conditions aux limites pour chaque type de sollicitation (traction + flexion et traction + torsion),
- 3- Discrétisation de l'éprouvette en éléments finis (Maillage),
- 4- Détermination du champ de contraintes dû au chargement appliqué et par conséquent localisation de la zone critique.

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

La 3^{ème} étape :

Mise au point d'un programme sous Matlab, pour calculer la durée de vie en nombre de cycles. Dans cette étape on utilise les paramètres du critère Crossland en l'occurrence P_{\max} , ξ_a et σ_{eq} , lesquels ont été préalablement calculé par le code Ansys. Il est nécessaire aussi de déposer de la fonction inverse de torsion. L'organigramme est montré sur la **figure III.6**.

La 4^{ème} étape :

La 4^{ème} étape est consacrée pour tracer du diagramme de Crossland et du trajet de chargement.

La 5^{ème} étape :

La 5^{ème} étape est consacrée à la création d'une interface laquelle permettra aux deux logiciels Matlab et Ansys de communiquer entre eux.

b) - Matériau étudié :

Le matériau utilisé dans cette étude est de type acier 35NiCrMo16. **Tableaux III.1 et III. 2 [31]**

Ils montrent à la fois les propriétés mécaniques et la composition chimique de cet acier.

Tableau III.1. Caractéristiques mécaniques du matériau [31].

Limite d'élasticité à σ_e (MPa)	1000
Coefficient de poisson ν	0.29
Module d'Young E (MPa)	213000
Limite d'endurance en torsion alternée symétrique τ_{-1} (MPa)	310
Limite d'endurance en flexion alternée symétrique f_{-1} (MPa)	525
Nombre de cycles correspondant à une durée de vie limitée N_I (Cycles)	10^5
Nombre de cycles correspondant à une durée de vie illimitée N_k (Cycles)	10^7

Tableau III.2. Composition chimique de l'acier 35NiCrMo16 [32].

C	S	Mo	Cr	Ni	Mn	P	Si
0.32-0.39	≤0.035	0.25-0.45	1.60-2.00	3.60-4.10	0.30-0.60	≤0.035	0.10-0.40

III.4 Courbes de Wöhler :

Les figures III.4 et III.5 montrent les courbes de Wöhler (essais de fatigue uniaxial) réalisées par Bignonnet [31] dans le cas de flexion et torsion alternées.

Les courbes de Wöhler de l'acier **35NiCrMo16** sont données par les équations suivantes :

1-torsion alternée :

$$t_{-1}(N) = \frac{34821495 + 308 \cdot N^{0.92}}{54837 + N^{0.92}} \quad [MPa] \dots\dots\dots(III.15)$$

2-flexion alternée :

$$f_{-1}(N) = \frac{44614 \cdot 10^6 + 525 \cdot N^{1.42}}{59697 \cdot 10^3 + N^{1.42}} \quad [MPa] \dots\dots\dots(III.16)$$

Les courbes de Wöhler sont présentées par les figures III.4 et III.5.

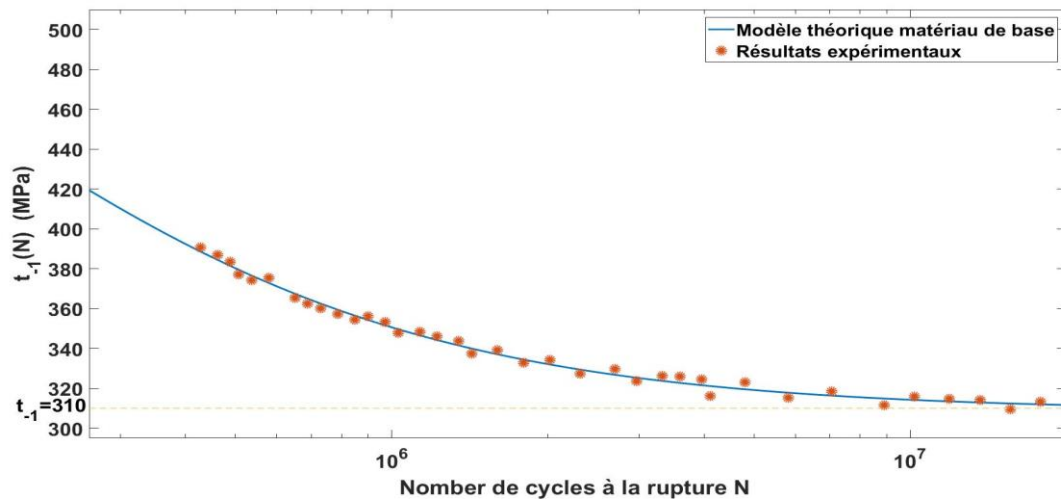


Figure III.4. Courbes d'endurance en torsion alternée de 35NiCrMo16 [33].

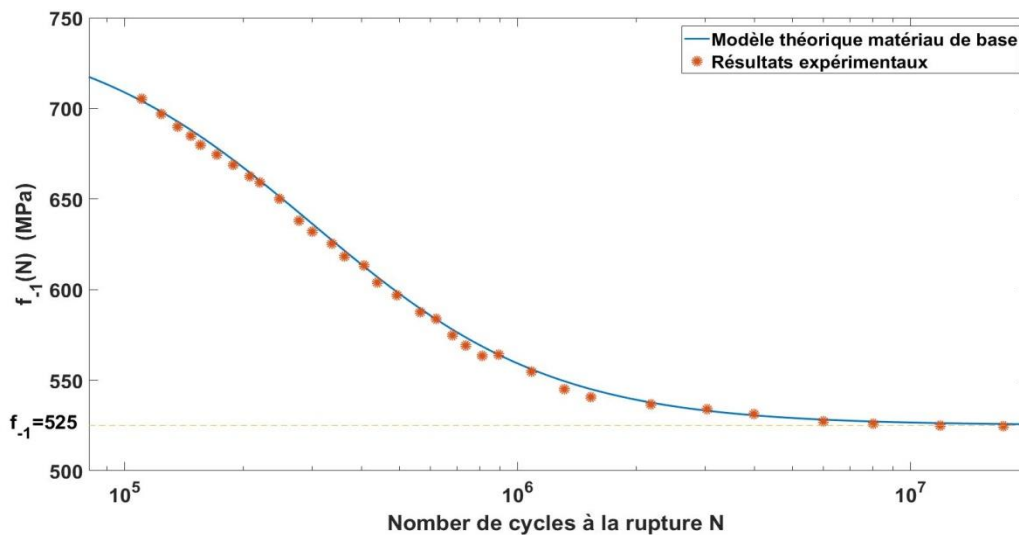


Figure III.5. Courbes d'endurance en torsion alternée de 35NiCrMo16 [33].

III.5- Méthode de calcul des durées de vie des structures :

Pour la structure sollicitée en fatigue, il est nécessaire de calculer la durée de vie par le critère de Crossland. Pour ce faire, nous avons créé l'organigramme qui permet de calculer cette durée de vie (Fig : III.6).

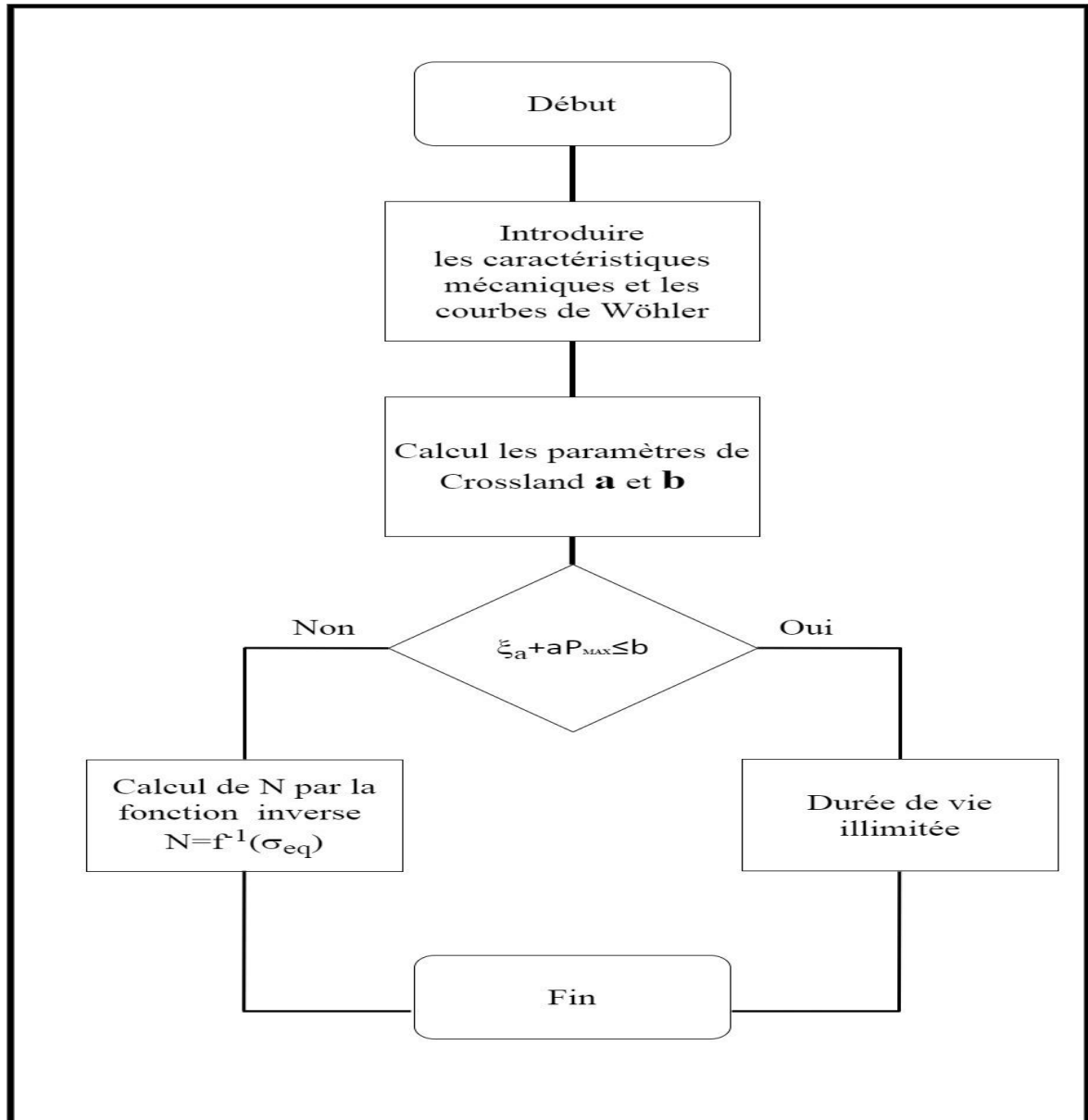


Figure III.6. Organigramme de calcul de la durée de vie.

III.5.1. La fonctions inverse :

Afin de calculer la durée de vie de critère de Crossland utilisé dans cette étude, nous avons établi la fonction inverse, la fonction inverse permet de calculer la durée de vie à partir de la charge appliquée. La **figure (III.6)** représente l'organigramme qui explique les démarches qui permet à nous de calculé la durée de vie de façon générale pour le critère de Crossland.

III.5.2. Critère de Crossland :

Pour calculer la durée de vie on doit détermine au préalable la contrainte équivalente $\sigma_{eq} (MPa)$

Cette contrainte doit être égale à la contrainte de torsion.

$$b = \xi_a + a \cdot P_{\max} \dots\dots\dots(III.17)$$

$$b = \sigma_{eq} \dots\dots\dots(III.18)$$

$$\tau = \sigma_{eq} \dots\dots\dots(III.19)$$

On analysant les équations (III.16), (III.18), (III.19) et (III.20), on remarque l'existence d'une relation entre les paramètres P_{\max} , $\sigma_a (MPa)$, $\sigma_{eq} (MPa)$ et N .

$$N(\sigma_{eq}) = \left(\frac{54837 \cdot \sigma_{eq} - 34821495}{308 - \sigma_{eq}} \right)^{\frac{1}{0.92}} \dots\dots\dots(III.20)$$

III.5.3. Critère de Marin : [34]

Nous optons pour la même procédure que dans le cas du critère de Crossland pour obtenir la formule de σ_{eq} qui est égale à la limite d'endurance en traction alternée σ_{-1} :

$$\left(\frac{\sqrt{3}}{\sigma_{-1}} \xi_a \right)^2 = 1 - \left(\frac{\sqrt{3}}{R_m} \xi_m \right)^2 \dots\dots\dots(III.21)$$

$$\sigma_{-1} = \frac{\sqrt{3 \xi_a^2 R_m^2}}{\sqrt{R_m^2 - 3 \xi_m^2}} \dots\dots\dots(III.22)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3 \xi_a} R_m}{\sqrt{R_m^2 - 3 \xi_m^2}} \dots\dots\dots(III.23)$$

Nous avons l'équation (III.15) qui représente la courbe de Wöhler de traction (35NiCrMo16)

$$[\text{Bignonet}]. N(\sigma_{eq}) = \left(\frac{54837 \cdot \sigma_{eq} - 34821495}{490 - \sigma_{eq}} \right)^{\frac{1}{0.92}} \dots\dots\dots(III.24)$$

III.5.4. Critère de Sines :
$$N(\sigma_{eq}) = \left(\frac{54837 \cdot \sigma_{eq} - 34821495}{308 - \sigma_{eq}} \right)^{\frac{1}{0.92}} \dots\dots\dots(III.25)$$

III.6. Structure :

III.6.1. La géométrie de structure :

Afin de calculer la durée de vie en fatigue multiaxiale, la **Figure III. 7** représente une plaque carrée, avec faible épaisseur. Cette plaque présente un défaut de forme, la forme de ce défaut est un trou circulaire.

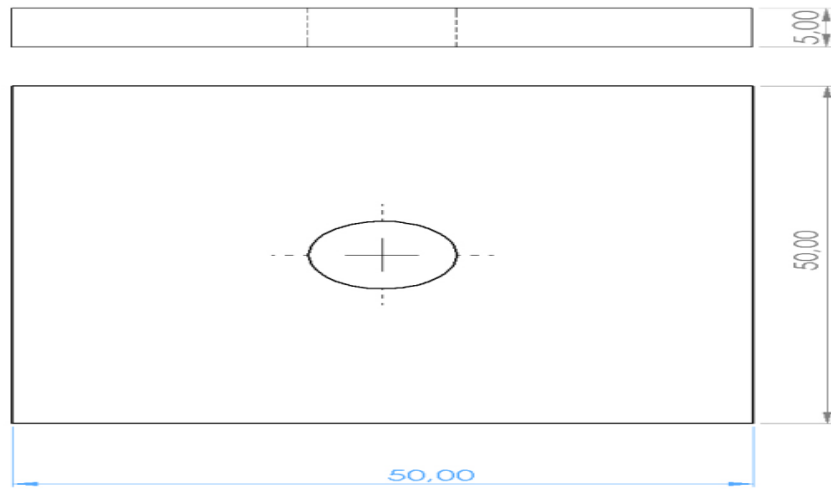


Figure III. 7.Représentation Géométrie de structure.

III.6.2. Chargement et conditions aux limites :

La plaque soumise deux type de sollicitations, la première sollicitation est une traction monotone suivante l'axe des (x), la deuxième sollicitation est une traction alternée suivante l'axe des (y). La **figure III.8** représente la contrainte alternée appliquée sur la plaque, sous forme d'un signal sinusoïdal avec une amplitude de $\sigma_a = 100$ MPa.

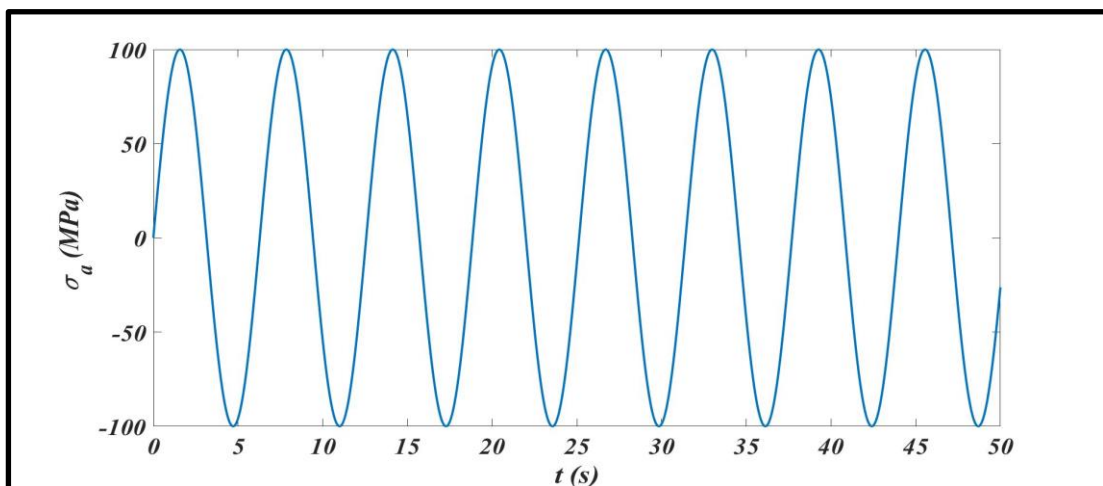


Figure III. 8.Forme du signal de la contrainte alternée.

Le Chargement et les conditions aux limites de l'éprouvette sont montrés sur la **figure III.9**.

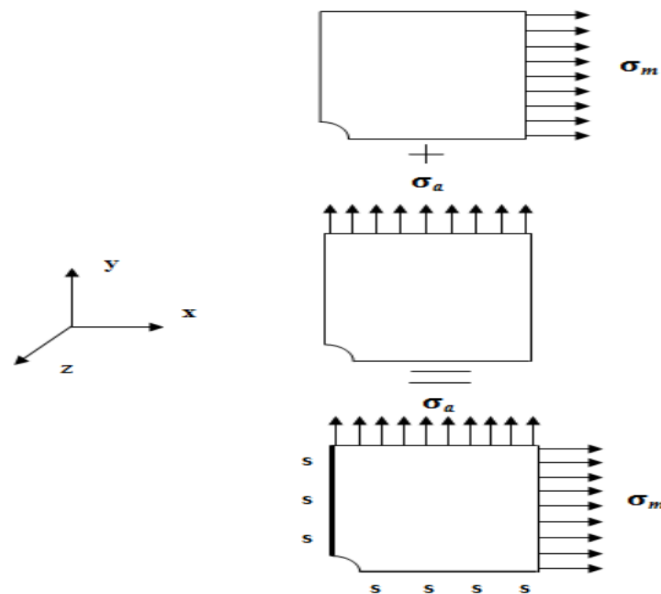


Figure III. 9.Modélisation en 2D de structure.

III.6.3. Maillage de la structure :

La **figure III.9**, représente seulement le quart de la plaque étudiée, puisqu'il ya une symétrie de géométrie et de force. Cette avantage permet de gaine le (3/4) de temps nécessaire de simulation. La forme de maillage étant ordonnée (mapped mesh). Nous avons utilisé un type d'éléments finis sous forme de quadrilatérale. Ce type d'éléments est constitué de 8 nœuds (plane 82) et qui possède deux degrés de liberté suivant l'axe des (x) et des (y).

III.6.4. Raffinement du maillage de la structure :

Le raffinement est une phase très importante qu'il ne peut être négligé. Le raffinement de maillage est constitué de quelques étapes, qui sont :

- En fixant une combinaison de chargement telle que :

$$\sigma_a = 300 \text{ MPa et } \sigma_m = 300 \text{ MPa}$$

- Choisissez une taille initiale de l'élément finis.
- La diminution de la taille de l'élément finis jusqu'à la convergence.
- Le test de converge, on dit que nous avons la convergence de maillage, si la courbe d'une composante de tenseur de contrainte présente un asymptote en fonction de l'ordre de maillage.

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

Le tableau III.3 présente la variation de quelques paramètres en fonction de l'ordre de maillage jusqu'a la convergence.

Ordre	1	2	3	4	5
$P_{\max}(MPa)$	726,54	766,09	784,87	792,31	794,18
$\xi_a(MPa)$	270,68	276,77	288,35	210,71	293,54
$\sigma_{EQ}(MPa)$	270,74	276,83	288,41	210,77	293,59
Nombre d'éléments	300	1200	5600	10800	14000

III.6.5. Détermination de la zone critique :

La visualisation de la structure permet de localiser la zone critique laquelle correspond à deux éléments critiques pour les deux chargements monotone et alterné. La position de cet élément est montrée sur les deux figure, **figure III.11** et **figure III.10**.

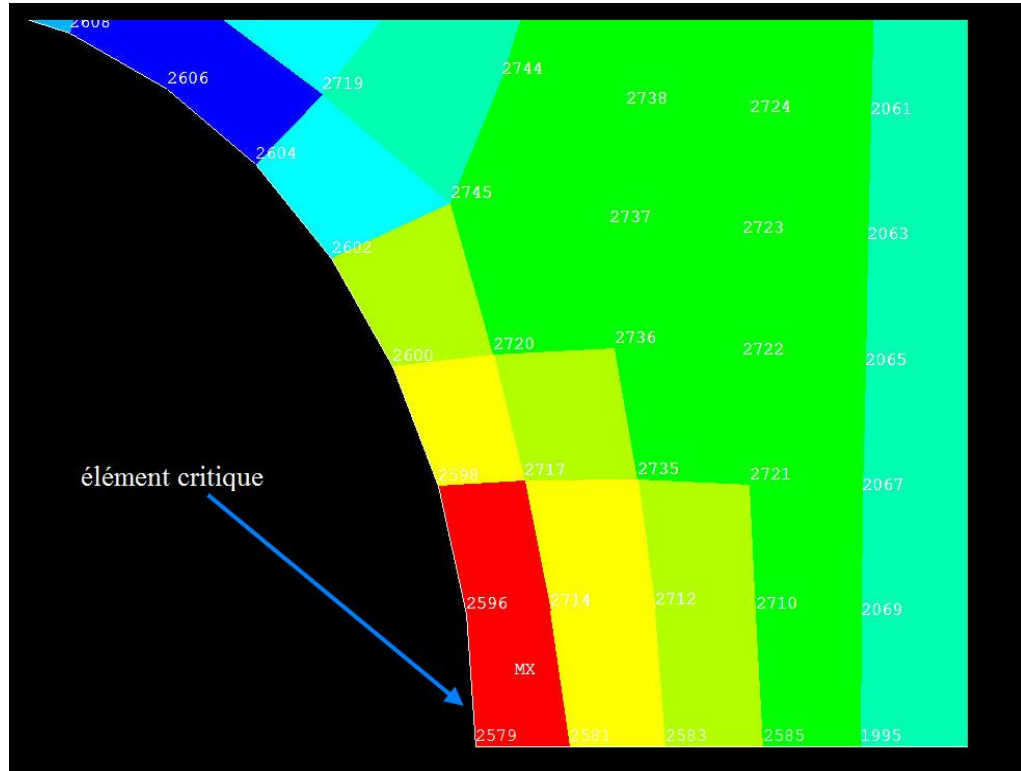


Figure III.10 Position de l'élément 2579

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

Les résultats obtenus sont résumés dans le **tableau III.4**.

σ_a (MPa)	P_{\max} MPa	ξ_a MPa	σ_{EQ} (MPa)	Elément critique	Obs.
σ_m (MPa)					
400	906.568	391.80	445.774	2579	<308
300					
200	681.794	195.690	236.598	2579	>308
300					

Tableau III.4. Détermination de la zone critique

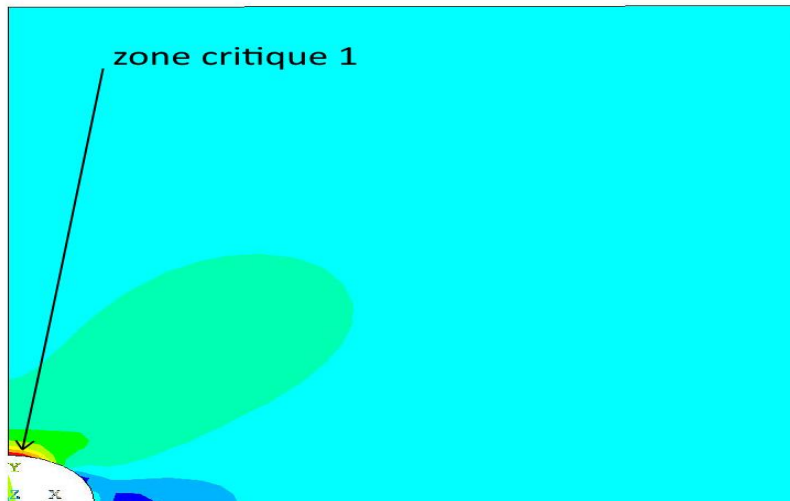


Figure III.11. Zone critique due au chargement en traction monotone

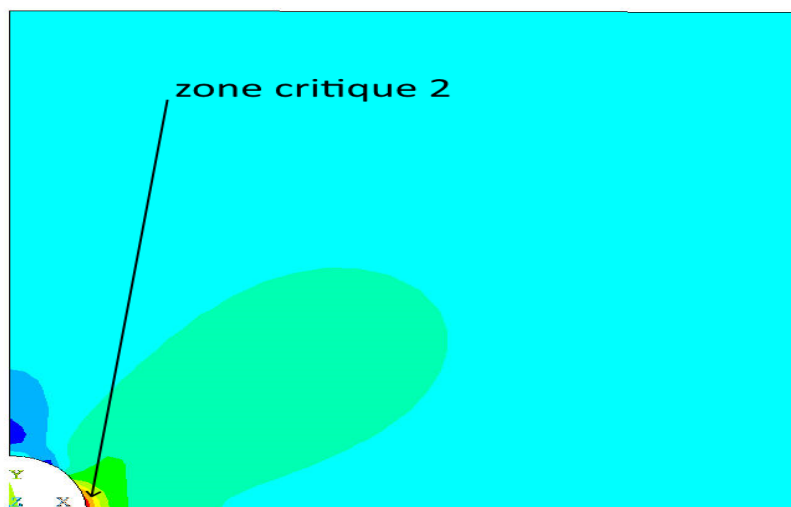


Figure III.12: Zone critique due au chargement en traction alterné σ_{EQ} (MPa) σ_a (MPa)

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

D'après les **figures III.11 et III.12**, on remarque que :

- Le champ des contraintes dans la zone critique1 est supérieur à celui dans la zone critique2
- Les zones 1 et 2 ne sont pas confondues (des positions différentes pour les deux types de chargements).

D'après les résultats obtenus par application d'une série des chargements (**tableau III.4**), on constate que l'élément critique ne change pas de position quelle que soit l'intensité de chargement appliqué.

La **figure III.13** montre plus clairement la position de l'élément critique en l'occurrence l'élément **2579**.

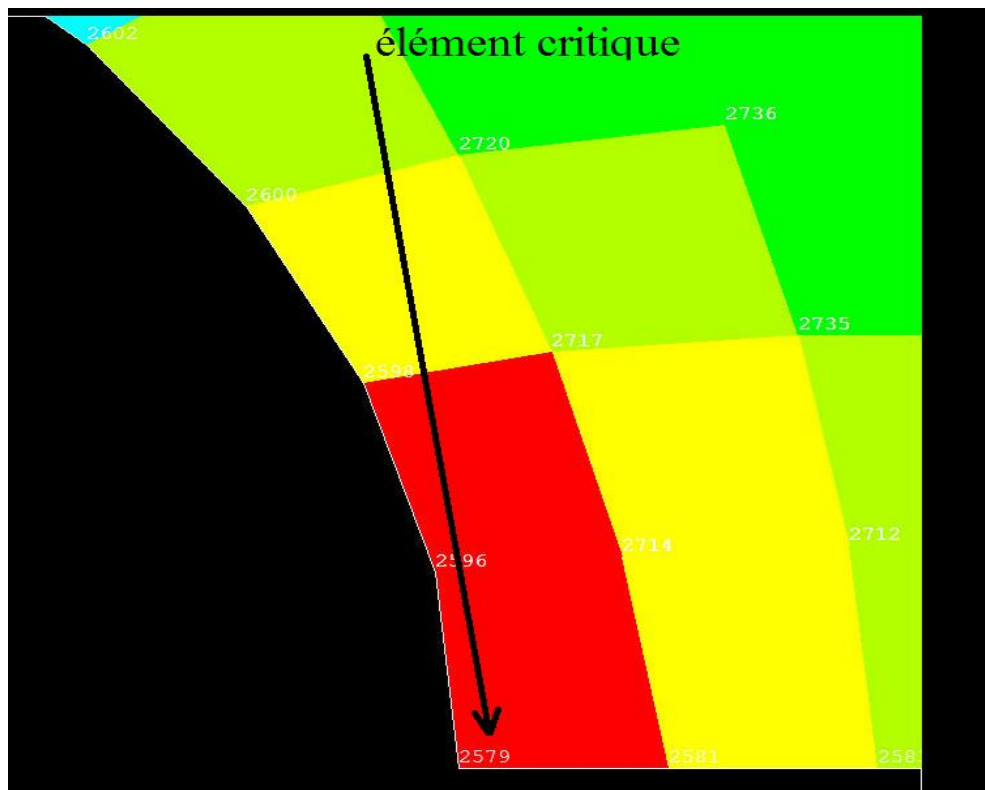


Figure III.13. Position d'élément 2579 plus claire

III.6.6. Calcul la durée de vie :

Le calcul de la durée de vie de structure présentée dans la figure 1 est basé sur le critère Crossland, pour ce faire, nous avons préparé un programme en langage Matlab, ce programme est basé sur l'organigramme présenté dans la **figure III.6**. Le tableau contient les paramètres calculés de Crossland et la durée de vie.

Le **tableau III.5** résume des paramètres des trois critères pour chaque chargement appliqué (σ_m, σ_a).

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

Tableau III.5. Chargements appliqués et les paramètres des critères

σ_m (MPa)	σ_a (MPa)	P_m (MPa)	P_{max} (MPa)	ξ_a (MPa)	ξ_m (MPa)	τ_a (MPa)
200	400	191,200	754,228	391,380	195,728	191,200
	350	191,200	698,035	342,458	195,728	191,200
	300	191,200	641,841	293,535	195,728	191,200
	250	191,200	585,648	244,613	195,728	191,200
	200	191,200	529,454	195,690	195,728	191,200
250	400	239,000	830,398	391,380	244,660	414,000
	350	239,000	774,205	342,458	244,660	362,250
	300	239,000	718,011	293,535	244,660	310,500
	250	239,000	661,818	244,613	244,660	258,750
	200	239,000	605,624	195,690	244,660	207,000
300	400	286,800	906,568	391,380	293,592	414,000
	350	286,800	850,375	342,458	293,592	362,250
	300	286,800	794,181	293,535	293,592	310,500
	250	286,800	737,988	244,613	293,592	258,750
	200	286,800	681,794	195,690	293,592	207,000
350	400	334,600	982,738	391,380	342,524	414,000
	350	334,600	926,545	342,458	342,524	362,250
	300	334,600	870,351	293,535	342,524	310,500
	250	334,600	814,158	244,613	342,524	258,750
	200	334,600	757,964	195,690	342,524	207,000
400	400	382,400	1058,908	391,380	391,456	414,000
	350	382,400	1002,715	342,458	391,456	362,250
	300	382,400	946,521	293,535	391,456	310,500
	250	382,400	890,328	244,613	391,456	258,750
	200	382,400	834,134	195,690	391,456	207,000

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

Tableau III.6. Chargements appliqués et les durées de vie calculée pour chaque critère

σ_m (MPa)	σ_a (MPa)	σ_{EQ} (MPa) Crossland	σ_{EQ} (MPa) Sines	σ_{EQ} (MPa) Marin	N (cycle) Crossland	N(cycle) Sines	N(cycle) Marin
200	400	436,63	446,89	712,58	205591	178709	HD
	350	384,34	395,14	623,50	465826	384784	HD
	300	332,05	343,39	534,43	2026865	1269821	309770
	250	279,75	291,64	445,36	illimitée	illimitée	illimitée
	200	227,46	239,89	356,29	illimitée	illimitée	illimitée
250	400	441,20	455,11	734,59	193061	160043	HD
	350	388,91	403,36	642,76	428721	336051	HD
	300	336,62	351,61	550,94	1644654	979152	181819
	250	284,32	299,86	459,12	illimitée	illimitée	illimitée
	200	232,03	248,11	367,29	illimitée	illimitée	illimitée
300	400	445,77	463,33	764,48	181419	143492	HD
	350	393,48	411,58	668,92	395810	295494	HD
	300	341,19	359,83	573,36	1373797	785352	93044
	250	288,89	308,08	477,80	illimitée	illimitée	illimitée
	200	236,60	256,33	382,24	illimitée	illimitée	illimitée
350	400	450,34	471,55	805,01	170576	128729	HD
	350	398,05	419,80	704,38	366431	261251	HD
	300	345,76	368,05	603,76	1172220	647319	HD
	250	293,46	316,30	503,13	illimitée	7167070	1541294
	200	241,17	264,55	402,50	illimitée	illimitée	illimitée
400	400	454,91	479,77	860,87	160456	115489	HD
	350	402,62	428,02	753,26	340056	231984	HD
	300	350,33	376,27	645,65	1016598	544246	HD
	250	298,03	324,52	538,04	illimitée	3164068	273778
	200	245,74	272,77	430,44	illimitée	illimitée	illimitée

L'analyse de la durée de vie nous permet de distinguer trois domaines :

- 1-** durée de vie inférieure à 39810 cycles, on note ce type de chargement (Hors Domaine : «H.D ») ceci relève probablement du domaine de fatigue oligocyclique.
- 2-** durée de vie est limitée entre 39810 cycles et 10^7 cycles, on note ce type de chargement « limité ». La valeur de contrainte équivalente est située dans le domaine limité.
- 3-** durée de vie est illimitée si elle est supérieure à 10^7 cycles, on note ce type de chargement " illimité".

III.7- Simulation numérique de grenailage :

Le grenailage de précontrainte est un traitement mécanique de surface dont le principal objectif est la génération des contraintes résiduelles de compression et des déformations plastiques en vue d'améliorer la tenue en fatigue des pièces mécaniques.

Nous avons développé une méthodologie de simulation permettant de calculer le champ des contraintes résiduelles et des déformations plastiques. Pour ce faire, nous avons mis au point un programme de calcul intégrant deux logiciels en l'occurrence Matlab et Ansys (en mode Ansys/ls-dyna).

Le modèle proposé simule le grenailage multi-impact et uni-impact des billes. Le modèle géométrique est constitué d'une cellule de forme parallélépipédique, représentant le massif, et de plusieurs rangées de billes assurant un grenailage homogène de la surface (**Fig.III.13**). La figure 1b représente le modèle uni-impact.

III.7.1-Maillage :

Afin de gagner du temps de simulation et d'étudier l'effet du grenailage sur le massif, nous avons conçu la cellule et le maillage sous le code ANSYS (LS-DYNA), de sorte qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un maillage uniforme, ni de mailler avec la même précision au niveau de la zone d'impact et au pied de massif.

La cellule est maillée de façon réglée dans la zone du contact et libre dans tout le reste du massif. La taille de l'élément est de 0.05 mm. Le type d'élément utilisé est le Solid164, tel qu'il est utilisé pour la modélisation 3D des structures solides. Cet élément est uniquement utilisé dans les analyses dynamiques explicites.

La **figure III.14** illustre le maillage obtenu.

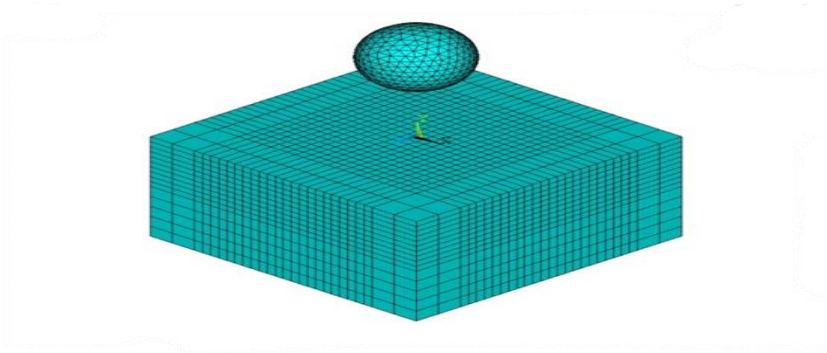


Figure III.14-Maillage de la cellule et de la bille.

III.7.2-Conditions aux limites :

Pour la cellule de forme parallélépipédique, il est indispensable d'observer les conditions aux limites suivantes :

- La face supérieure est libre,
- La face inférieure est encastree,
- Les faces latérales restent planes, par conséquent tous les points appartenant à ces faces ne se déplacent pas suivant les normales respectives à ces faces.

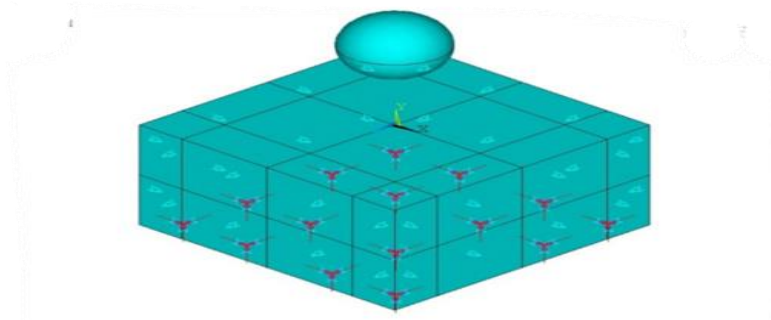


Figure III.15- Les conditions aux limites de la cellule de forme parallélépipédique.

III.7.3-Test de convergence :

Afin d'assurer une meilleure précision de la simulation, nous avons procédé à un raffinement du maillage de la structure. Pour ce faire, il est nécessaire de vérifier la convergence des résultats dans l'optique d'opter pour un maillage optimum. Nous avons opté pour l'élément solide 164 et nous avons fixé une combinaison de paramètres de grenailage telle que :

$\sigma_e=495$ MPa, $V= 40$ m/s, $H=800$ MPa, $R=0.2$ mm, $fr = 0.2$, $\rho_b = \rho_m = 7500$ k/m³, $\theta=90^\circ$, $E_m = E_b= 200$ GPa, $\nu_m= 0.29$ et $\nu_b= 0.31$. Par la suite nous avons cherché la convergence des résultats obtenus par la simulation. Les tests de convergence sont montrés dans le **tableau III.6**

Tableau III.7-Résultats du raffinement du maillage

Ordre	1	2	3	4	5	6
σ_x (MPa)	310.19	366.17	381.05	399.38	406.49	406.91
Nombre des Noeuds	32749	287981	343666	422019	667202	705775

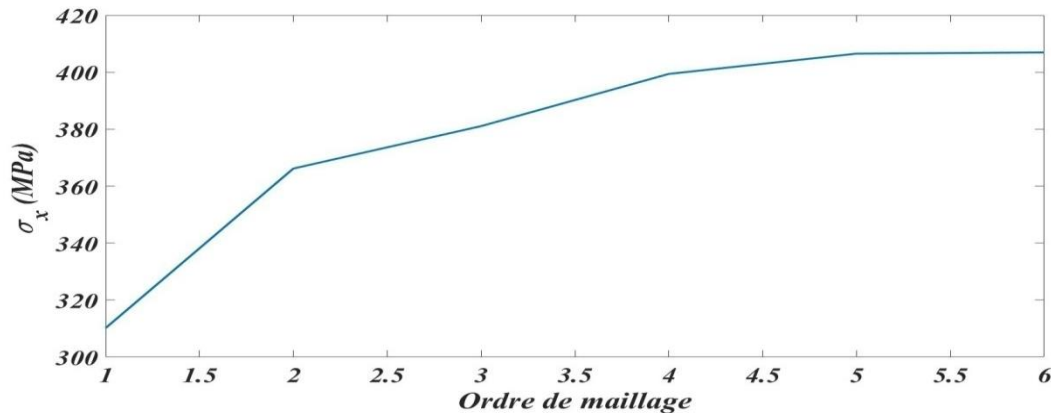


Figure III.16-Recherche de la convergence des résultats.

III.8- Deuxième cas (multi-impact) :

III.8.1-Simulation du procédé du grenailage :

Afin de simuler le procédé de grenailage, nous utilisons les résultats obtenus par la simulation du simple impact d'une bille sur la surface d'un matériau. A cet effet, nous procédons aux mêmes étapes réalisées lors de la simulation du simple impact. Nous avons utilisé les résultats de l'uni-impact (dimensions de l'impact : le rayon et la profondeur) pour déterminer le nombre d'impacts nécessaires pour balayer toute la surface traitée.

La couverture, exprimée en pourcentage, est définie comme le rapport entre la surface effectivement grenillée et la surface à grenailier. Pour obtenir une couverture complète, la détermination du nombre d'impact est requise. Le nombre d'impacts dépend des dimensions de la cellule, du diamètre de la grenaille et du diamètre d'indentations résultant des impacts sur la surface de la cellule.

La **figure III.17** montre une surface traitée de façon complète (taux de recouvrement 100%) ; les cercles représentent les indentations résultant de chaque impact. On remarque, que toute la surface est couverte par les indentations.

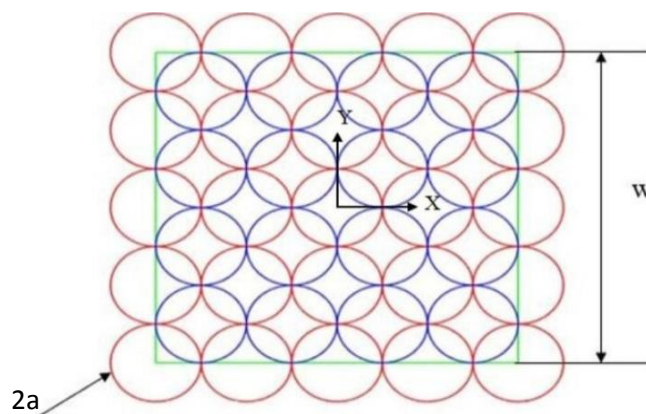


Figure III.17 Surface traitée de façon complète et représentation des indentations (taux de recouvrement 100%).

Pour assurer une couverture de toute la surface traitée, le jet de grenailles est réparti en plusieurs rangées de billes. Pour une première couverture de la surface par des billes, le centre de chacun des indentations, dans le plan $y=0$, est tel que les coordonnées x et z de chaque indentation varie de $-\frac{W}{2}$ à $\frac{W}{2}$ avec un pas de $2a$. Il est évident que pour assurer un taux de recouvrement de 100%, cela nécessite encore une seconde couverture pour laquelle le centre de chacun des indentations, dans le plan $y=0$, est tel que les coordonnées x et z de chaque indentation varie de $-\frac{W}{2}+a$ à $\frac{W}{2}-a$ avec un pas de $2a$.

0

D'après la **figure III.17**, on peut simplement établir le nombre d'impact NI par la relation suivante :

$$NI = \left(\frac{W}{2a}\right)^2 + \left(\frac{W}{2a} + 1\right)^2 \dots\dots\dots(III.26)$$

Nous avons choisi une répartition pyramidale des billes. La **figure III.18** illustre une représentation schématique de la simulation du procédé de grenailage.

L'équation suivante donne la coordonnée y de chaque bille :

$$y = y_{\max} - [\max(|x|, |z|)] \dots\dots\dots(III.27)$$

y_{\max} est la coordonnée que nous fixons pour la bille située au sommet de la pyramide.

x et z sont les coordonnées du centre de gravité de chaque bille correspondant aux indentations préalablement établies.

La valeur de y conditionne la répartition des billes dans l'espace et génère le jet de grenailles.

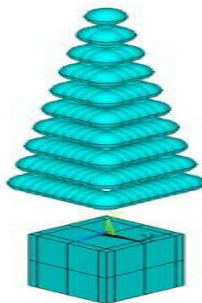


Figure III.18 Représentation schématique de la simulation du processus de grenailage.

Dans cette partie de l'étude, l'objectif est l'étude des paramètres qui résultant de simulation numérique du grenailage. Parmi ces paramètres qui s'intéresse sont : les contraintes résiduelles et

les déformations plastiques, qui jouent un rôle important pour expliquer l'augmentation de la durée de vie.

La figure III. 19 et III.20 représentent les profils des contraintes résiduelles et des déformations plastiques.

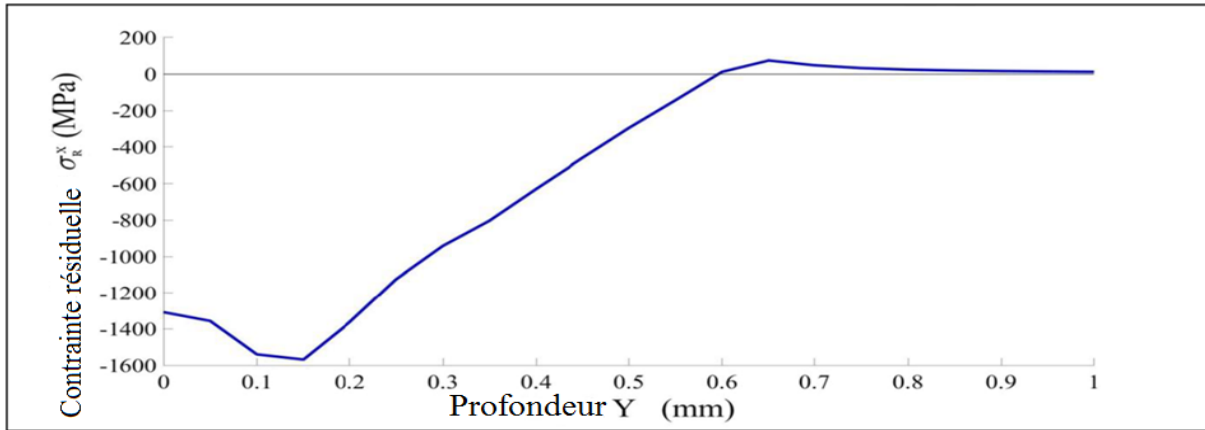


Figure III.19 - profil de contrainte résiduelle

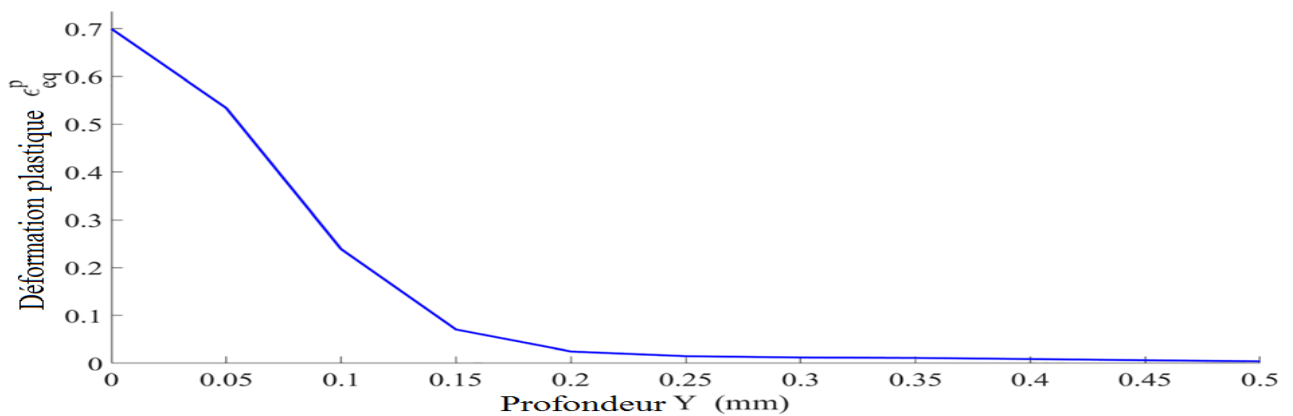


Figure III.20- profil de déformation plastique

III.8.2- influence des contraintes résiduelles sur le trajet de chargement :

Lorsqu'un matériau subit un traitement de surface le trajet de chargement est déplacé vers les valeurs négatives de l'axe de P_{max} (**figure III.21**) [35].

Selon le critère de Von-Mises et en tenant compte des déformations plastiques la pression hydrostatique P_{max} peut être exprimé de la façon suivante :

$$P_{max} = \frac{1}{3} trace(\bar{\sigma}_m + \bar{\sigma}_a + \bar{\sigma}_R) \dots\dots\dots (III.28)$$

$\bar{\sigma}_m$: Tenseur de contrainte dû à la traction monotone.

$\bar{\sigma}_a$: Tenseur des amplitudes de contrainte provoqué par la force flexion F_a .

$\bar{\sigma}_R$: Tenseur des contraintes résiduelles

La valeur du déplacement du trajet de chargement est $C = \frac{2}{3} \cdot \sigma_R \dots \dots \dots (III.29)$

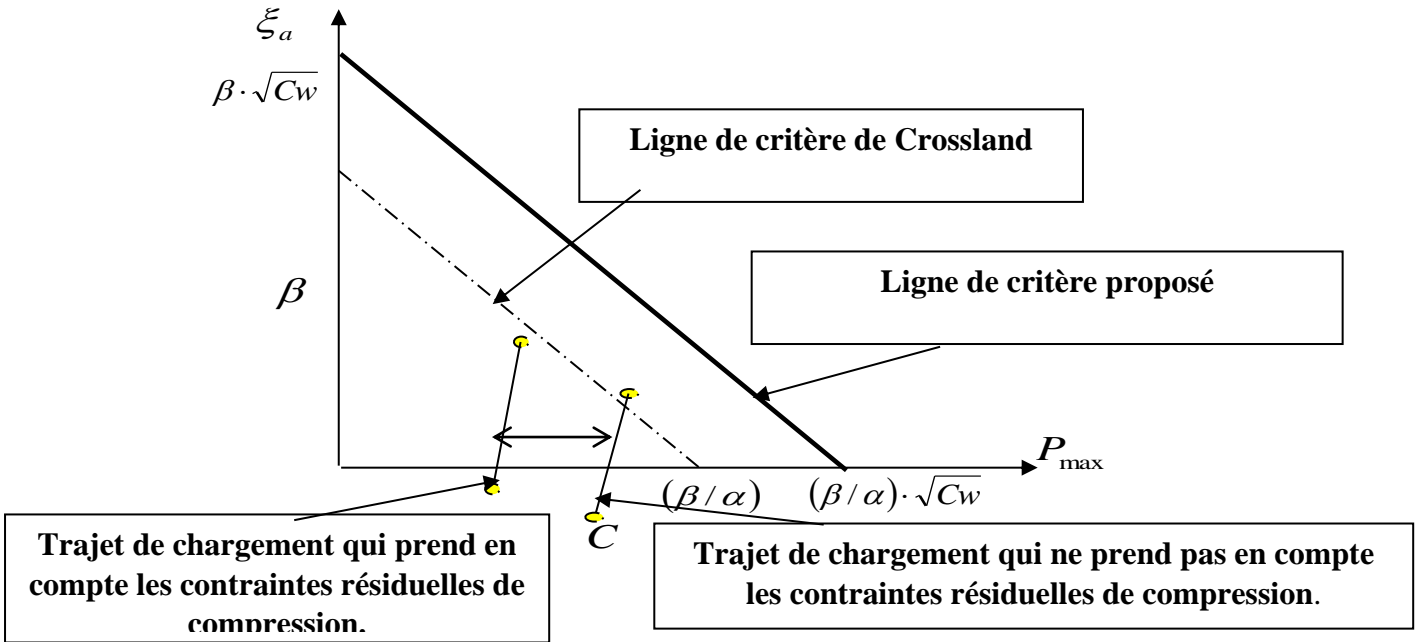


Figure III.21. Diagramme de Crossland pour un matériau traité et non traité [36].

III.8.3- Effet de déformation plastique sur les critères :

Dans un environnement industriel, les machines sont constituées de pièces mécaniques, qui sont soumises à des charges multiaxiale périodiques qui conduisent à une durée de vie insuffisante, ce qui nécessite des solutions techniques pour augmenter la durée de vie, parmi ces solutions sont les traitements de surfaces en particulier le grenailage. Des études expérimentales et théoriques ont confirmé que le grenailage conduit à une amélioration de la durée de vie des matériaux. Théoriquement, il est toujours nécessaire d'expliquer cette amélioration et de trouvé la relation entre les différents paramètres de grenailage et la durée de vie. La plupart des études attribuent cette amélioration au simple effet de la contrainte résiduelle, mais autre études a pris en considération le double effet des contraintes résiduelles et des déformations plastiques, et ça nécessite des mesures des largeurs de corde données par diffraction des rayons X [Guechichi et Castex] [34]. Dans notre proposition qui touche les trois critères, nous avons prendre les mêmes effets comme l'étude de (Guechichi et Castex [34]), mais l'avantage dans cette modification, nous avons prendre l'effet déformation plastique qui nécessité seulement des simulations numériques [Benkhettab]. [37]. L'équation suivante montre l'approche sur laquelle cette étude est basée. Cette équation représente la limite de fatigue équivalente, à une durée de vie N.

$$[t_{-1}(N)]_{eq} = [t_{-1}(N)](1+Q) \dots \dots \dots (III.30)$$

$$Q = \int_0^{Y_{max}} \frac{\varepsilon_{eq}^P(Y)}{1+Y_{max}} dY \dots \dots \dots (III.31)$$

III.9- Les critères proposés :

Pour prédire la durée de vie des matériaux traités, nous avons proposé trois nouvelles équations basées sur les trois critères que nous avons étudiés et qui prennent en compte la déformation plastique.

$$\xi_a + a \cdot P_{\max} \leq \tau_{-1}(N) \cdot (1 + Q) \dots\dots\dots(\text{III.32})$$

$$\tau_a + a \cdot P_m \leq \tau_{-1}(N) \cdot (1 + Q) \dots\dots\dots(\text{III.33})$$

$$\sigma_{-1}(N) \cdot (1 + Q) \geq \frac{\sqrt{3}\xi_a R_m}{\sqrt{R_m^2 - 3\xi_m^2}} \dots\dots\dots(\text{III.34})$$

III.9-1- Calcule la durée de vie après traitement de surface :

Dans ce cas, nous traiterons tout la plaque, on considère que la direction de traitement sera dans la direction (z) et la même direction que l'épaisseur de la plaque. **Les tableaux III.7 et III.8** représentés les paramètres de base de chaque critère et les durées de vie calculée de chaque critère après grenaillage.

Tableau III.8. Chargements appliqués et les paramètres des critères après grenaillage

$\sigma_R (MPa)$	$\sigma_m (MPa)$	$\sigma_a (MPa)$	$P_m (MPa)$	$P_{\max} (MPa)$	$\xi_a (MPa)$	$\xi_m (MPa)$	$\tau_a (MPa)$
-150	200	400	91,200	654,228	391,380	45,728	414,000
		350	91,200	598,035	342,458	45,728	362,250
		300	91,200	541,841	293,535	45,728	310,500
		250	91,200	485,648	244,613	45,728	258,750
		200	91,200	429,454	195,690	45,728	207,000
-150	250	400	139,000	730,398	391,380	94,660	414,000
		350	139,000	674,205	342,458	94,660	362,250
		300	139,000	618,011	293,535	94,660	310,500
		250	139,000	561,818	244,613	94,660	258,750
		200	139,000	505,624	195,690	94,660	207,000

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

-150	300	400	186,800	806,568	391,380	143,592	414,000
		350	186,800	750,375	342,458	143,592	362,250
		300	186,800	694,181	293,535	143,592	310,500
		250	186,800	637,988	244,613	143,592	258,750
		200	186,800	581,794	195,690	143,592	207,000
-150	350	400	234,600	882,738	391,380	192,524	414,000
		350	234,600	826,545	342,458	192,524	362,250
		300	234,600	770,351	293,535	192,524	310,500
		250	234,600	714,158	244,613	192,524	258,750
		200	234,600	657,964	195,690	192,524	207,000
-150	400	400	282,400	958,908	391,380	241,456	414,000
		350	282,400	902,715	342,458	241,456	362,250
		300	282,400	846,521	293,535	241,456	310,500
		250	282,400	790,328	244,613	241,456	258,750
		200	282,400	734,134	195,690	241,456	207,000

Tableau III.9. Chargements appliqués et les durées de vie calculée pour chaque critère après grenailage.

$\sigma_R (MPa)$	$\sigma_m (MPa)$	$\sigma_a (MPa)$	$\sigma_{EQ} (MPa)$ Crossland	$\sigma_{EQ} (MPa)$ Sines	$\sigma_{EQ} (MPa)$ Marin	N(cycle) Crossland	N(cycle) Sines	N(cycle) Marin
-150	200	400	391,49	494,30	617,87	409705	95183	15051
		350	343,95	438,47	540,63	124557 7	200456	251316
		300	296,40	382,63	463,40	HD	480917	HD
		250	248,86	326,80	386,17	illimitée	illimitée	illimitée
		200	201,32	270,97	308,93	illimitée	illimitée	illimitée
	250	400	395,64	506,21	623,23	381520	80945	9727

CHAPITRE III : CALCUL DE DUREE DE VIE DES STRUCTURES

-150		350	348,10	450,38	545,32	108770 5	170505	216292
		300	300,56	394,54	467,42	HD	388679	HD
		250	253,02	338,71	389,52	illimitée	illimitée	illimité e
		200	205,48	282,88	311,61	illimitée	illimitée	illimité e
-150	300	400	399,79	518,12	632,65	356035	68475	1835
		350	352,25	462,29	553,57	961137	145488	167933
		300	304,71	406,45	474,48	HD	319934	HD
		250	257,17	350,62	395,40	illimitée	illimitée	illimité e
		200	209,63	294,79	316,32	illimitée	illimitée	illimité e
-150	350	400	403,95	530,03	646,69	332887	57484	HD
		350	356,41	474,20	565,86	857502	124315	116481
		300	308,87	418,36	485,02	425022 024	266846	HD
		250	261,33	362,53	404,18	illimitée	735112	HD
		200	213,79	306,70	323,35	illimitée	illimitée	illimité e
-150	400	400	408,10	541,94	666,30	311775	47742	HD
		350	360,56	486,11	583,01	771157	106191	68921
		300	313,02	430,27	499,72	132988 97	224699	218944 3
		250	265,48	374,44	416,44	illimitée	564861	HD
		200	217,94	318,61	333,15	illimitée	illimitée	illimité e

III.9-2- Comparaison de la durée de vie :

On peut considérer cette partie de l'étude comme l'objectif final, qui est de comparer la durée de vie calculée pour chaque critère dans les deux cas avec et sans traitement de surface. La figure III.11 représente une comparaison graphique de la durée de vie pour les trois critères sans traitement de surface, et la **figure III.22 et III.23** représente comparaison entre les trois critères avec et sans traitement de surface. Les résultats sont obtenus de la série de chargement appliquée sur la plaque (**tableau III.7 et III.8**)

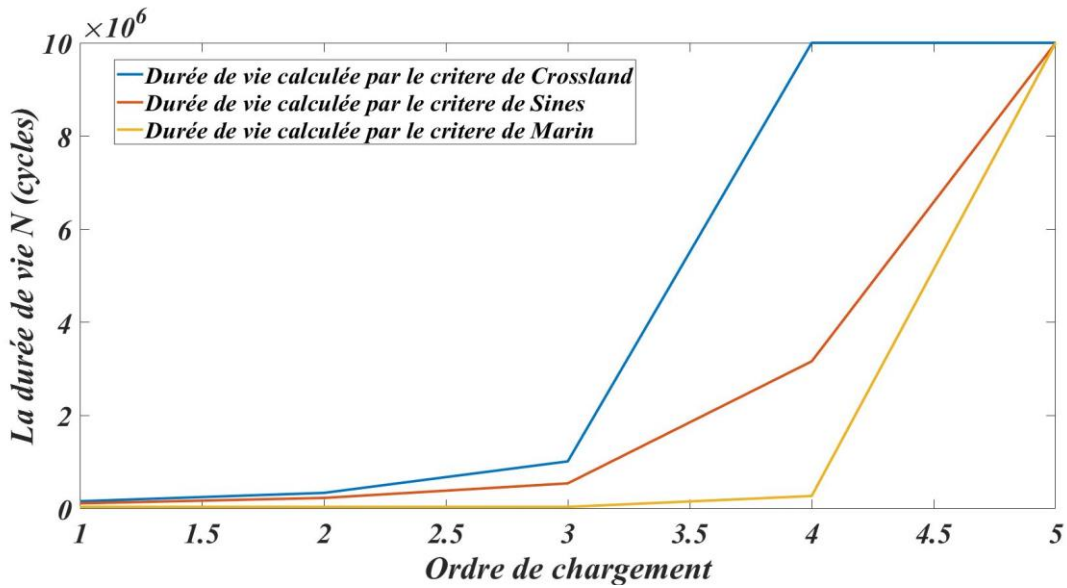


Figure III.22. Représentation graphique des durées de vie calculées pour trois critères sans traitement de surface.

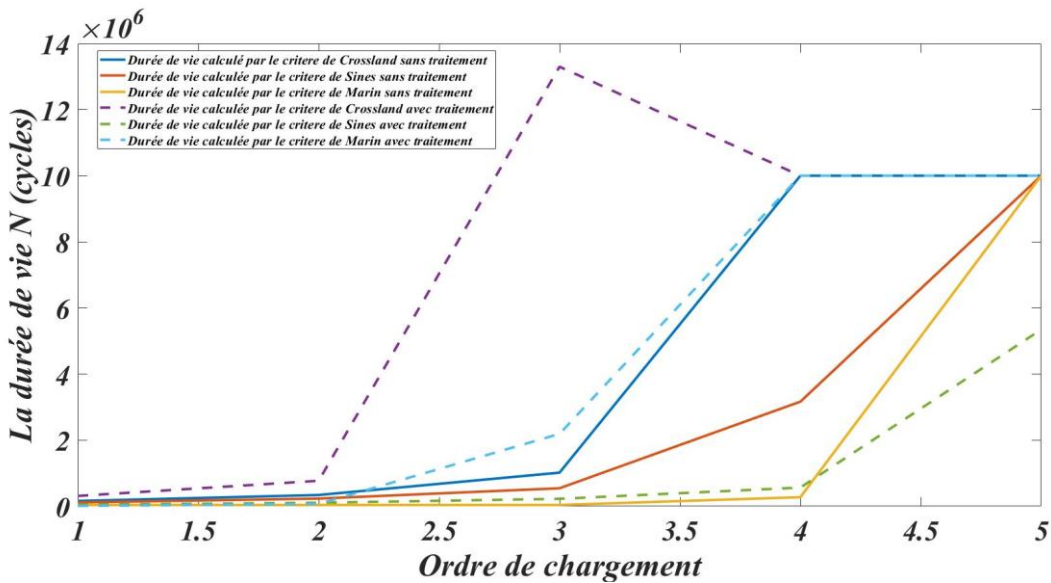


Figure III.23. Représentation graphique des durées de vie calculées pour trois critères sans et avec traitement de surface.

III.9.3 – Commentaires des graphes :

De la **Figure III.22**, nous remarquons que la durée de vie calculée par les trois critères d'une pièce soumise à une charge multiaxiale est différente d'un critère à un autre, la figure montre trois courbes pour les trois critères sachant que la durée calculée par Crossland est supérieure à Sines et Sines est supérieure à Marin, et même observation pour la **Figure III.23** pour la durée de vie calculée par les trois critères.

III.10- CONCLUSION :

Dans le chapitre nous étudions un plaque carré soumis à une traction multiaxiale afin d'étudier la durée de vie, nous avons utilisé trois critères pour calculer la durée de vie. Ensuite, nous avons traité cette pièce superficiellement pour comparaison avec le cas sans traitement de surface, en utilisant les trois critères précédents. Après la comparaison nous avons remarqué que la durée calculée par le critère de Crossland est supérieure de la durée de vie de Sines et Sines supérieur de Marin et cette remarque est valable pour les deux cas avec et sans traitement.

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce travail est de prédire la durée de vie d'une plaque de forme carrée comporte un défaut de forme (trou circulaire) la quel qui soumise à des chargements de multiaxial. La prédiction de la durée de vie se fait par l'utilisation des trois critères d'approche global, les critères utilisé dans cette étude sont : Crossland, Sines et Marin. L'étude est scindée en deux parties, la première partie est réservée à l'étude de l'effet d'une série de chargement sur la durée de vie. Dans cette partie nous avons appliqué trois critères et comparé la durée de vie calculée par chaque critère, et après la comparaison nous avons remarqué que la durée calculée par le critère de Crossland est supérieure de la durée de vie de Sines supérieur de Marin.

La deuxième partie est réservée à l'étude l'effet de chargement multiaxial et le traitement de surface (grenailage). Les étapes de calcul sont similaires de la première partie, sauf que on ajoute l'effet des contraintes résiduelles et des déformations plastiques. Nous avons obtenu la même remarque qui concerne la durée de vie pour les trois critères avec et sans traitement de surface.

En perspectives, il serait intéressant de continuer ce travail, lequel pourrait s'articuler sur les points suivants :

- 1- Application d'autre famille des critères par exemple (les critères de plan critique).
- 2- Etudier l'influence de l'angle de déphasage entre les différentes contraintes qui caractérisent le chargement.
- 3- Etudier l'endommagement, dans le cas des chargements à amplitude variable, en appliquant une règle de cumul du dommage.
- 4- Appliquer type de traitement superficiel pour améliorer les durées de vie calculées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Fatigue-papier ; Fatigue des matériaux et des structures
- [2] Fatigue-papier ; fatigue des matériaux et des structures, Historique et importance du phénomène de fatigue
- [3] H. Karaoui. Nouveaux outils pour la conception fiable des structures. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique- mécanique. Soutenu le 07/10/2001.
- [4] X. Pitoiset. Méthodes spectrales pour une analyse en fatigue des structures métalliques sous chargements aléatoires multiaxiaux. Université libre de Bruxelles. Thèse de doctorat 30/03/2001
- [5] Y .Li Lee, J.P an, R.Hathaway, M.Barkey. Fatigue testing and analysis. Elsevier inc. 2005
- [6] Fatigue-papier ; Aspects macroscopiques et microscopiques du phénomène de fatigue
- [7] Fatigue-papier ; Aspects macroscopiques et microscopiques du phénomène de fatigue
- [8] Fatigue-papier ; Fatigue des matériaux et des structures
- [9] A. Karolczuk, Y. Nadot, A. dragon. Non-local stress gradient approach for multiaxial fatigue of defective material. Elsevier 2007
- [10] R. Ben sghair, Ch. Bouraoui, R. Fathallah, T. Hassine, A. Dogui. Probabilistic high cycle fatigue behaviour prediction based on global approach criteria. Elsevier 2006
- [11] Benkhettab, M., Guechichi, H. & Benkabouche, SE. Fatigue strength prediction methodology of shot-peened materials. Int J Adv Manuf Technol 104, 4277–4287 (2019).
- [12] C.A. Gonçalves, J.A. Araújo. E.N. Mamiya. Multiaxial fatigue: a stress criterion for hard metals. Elsevier 2004.
- [13] D. Bellett, F.Morel, P. Burry. Influence des fortes contraintes hydrostatiques sur la résistance en fatigue multiaxiale. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers France 2007
- [14] A.Carpinterie, M.de Freitas, A.Spagnol. Biaxial/Multiaxial fatigue and fracture.ESIS publication 31. Juin 2001
- [15] Y.Fares. Dimensionnement en fatigue des assemblages boulonnés à l'aide d'un critère de fatigue multiaxial. Thèse de doctorat d'institut national des sciences appliquées de Toulouse. Soutenu le 18/10/2006
- [16] Macha E, Sonsino CM. Energy criteria of multiaxial fatigue failure. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 1999,22:1053-1070.
- [17] Huang W. Contribution à l'analyse par diffractométrie X des déformations et des contraintes à l'échelle des grains, Thèse de doctorat, ENSAM,2007.

[18] Barralis J, Castex L, Maeder G. Précontraintes et traitements superficiels, Techniques de l'ingénieur, 1999, M1180-1.

[19] Lillamand I. Evolutions d'une couche grenillée sous sollicitations thermiques et mécaniques cas de la fatigue oligocyclique, Thèse de doctorat, ENSAM, 1998.

[20] Badreddine J. Modélisation du grenillage ultrason pour des pièces à géométrie complexe, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2014.

[21] Renaud P. Modélisation numérique du grenillage des pièces initialement cémentées ou carbonitrurées, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.

[22] Guechichi H. Préviation des contraintes résiduelles dues au grenillage de précontrainte, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 1986.

[23] Wohlfahrt H. Shot peening and residual stresses, Residual Stress Stress Relax, Springer, 1982, 28:71–92.

[24] Chaieb I. Analyse et simulation des contraintes résiduelles induites par des traitements mécaniques de précontrainte en grenillage et choc laser, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2004.

[25] Huang ZY, Wagner D, Bathias C, Chaboche JL. Cumulative fatigue damage in low cycle fatigue and gigacycle fatigue for low carbon–manganese steel, Int J Fatigue, 2011, 33:115-121.

[26] Youssef M. Simulation active du procédé du grenillage de précontrainte contrôlé. Congrès français de mécanique, AFM, Association Française de Mécanique; 2015.

[27] Lu J. Traitements de surface mécaniques-Principes. Techniques de l'ingénieur, 2006, M1190.

[28] Couratin D. Caractérisation de différents traitements thermo-chimiques-Effets sur la fatigue de surface de pièces d'automobiles, Matériaux Tech, 1996, 84:3–8.

[29] Bloquel F, Barrallier L, Bourse G, Dürr J. Détermination des contraintes résiduelles par diffractométrie X des couches biphasées. Application au cas de la cémentation. J Phys IV JP, 1996, 6:211-217.

[30] Meguid S a, Shagal G, Stranart JC. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model, Int J Impact Eng, 2002, 27:119-134.

[31] Bignonnet A. Fatigue Strength of Shot-Peened Grade 35 NCD 16 Steel. Variation of Residual Stresses Introduced by Shot Peening According to Type of Loading, 3th

IntConf Shot Peen, Garmisch-Partenkirchen, Germany,1987:659-566.

[32] Crossland G. Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel, Proceedings of the international conference of fatigue of metals. London: Institute of Mechanical Engineers,1956,138-149

[33] Banvillet A. Pr evision de durée de vie en fatigue multiaxiale sous chargements r els: vers des essais acc el er es, Thèse de doctorat,  cole Nationale Supérieure d'Arts et M tiers, Cent Bordeaux,2001.

[34] Guechichi H, Castex L, Benkhattab M. An Analytical Model to Relate Shot Peening

Almen Intensity to Shot Velocity. Mech Based Des Struct Mach, 2013,41:79-99.

[35] Prev y PS, Cammett JT. The Effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress, Cold Work and Fatigue in a Ni-Cr-Mo Low Alloy Steel, 8th IntConf Shot Peen,2002:1-7.

[36] Bagherifard S, Colombo C, Guagliano M. Application of different fatigue strength criteria to shot peened notched components. Part 1: Fracture Mechanics based approaches, Appl Surf Sci,2014,289:180-187.

[37] Benedetti M, Fontanari V, Bandini M, Savio E. High- and very high-cycle plain fatigue resistance of shot peened high-strength aluminum alloys: The role of surface morphology, Int J Fatigue2015,7:451–462.

[38] Berger M-C, Gregory JK. Residual stress relaxation in shot peened Timetal 21s, Mater SciEng A,1999,263:200-204.

(S-N) : stress number of sciences.