

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Calcul la durée de des structures suivant différents
critères de fatigue**

Présenté par :

- ❖ BOUZID MOSTAFA
- ❖ LATROCH SALAH EDDINE

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

Président	Pr. GUECHICHI Hocine	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr.KHIAT Mohammed Amine	Université de Mostaganem UMAB
Encadrant	Dr. BENKABOUCHE Salah Eddine	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021/ 2022

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu de nous avoir accordé le succès.

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur, Monsieur **BENKABOUCHE Salah-Eddine**. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé, et Je remercie également les jurys qui étaient avec nous **M. GUECHICHI houcine** et **M. KHIAT Sidi Mohammed**.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs, et mes frères, pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis proches qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

DEDICACES

Le mémoire est dédié

A mes chers parents

A mes frères et sœurs

A toute ma grande famille

A tous mes amies et collègues

Enfin à tous ceux qui ont été à mes côtés durant cette année d'étude, merci beaucoup pour le support.

B. Mostafa

Le présent mémoire est dédié

A mes chers parents

A mes frères et sœurs

A toute ma grande famille

A tous mes amies

Enfin à tous ceux qui ont été à mes côtés durant cette année d'étude.

L. Salah Eddine

Résumé :

La plupart des structures mécaniques présentent des défauts qui ne peuvent être évités et sont soumises à des charges aléatoires et variables. L'étude du comportement mécanique en fatigue est donc essentielle, dans la mesure de prévoir leurs durée de vie. Le but de notre étude est d'établir une comparaison entre deux critères globaux de fatigue multiaxiale, à savoir le critère de **Crossland** et celui de **Marine**, sur l'acier SM45C, dont les propriétés mécaniques ainsi que les courbes de fatigue en torsion et flexion alternées sont connues. Via le logiciel d'éléments finis, en l'occurrence le code ANSYS, dans lequel on introduit ces propriétés, et les conditions aux limites, d'une structure de forme rectangulaire présentant un trou au centre, on détermine les paramètres de deux critères ainsi que la localisation des zones critiques. La prévision de la durée de vie est calculée en fonction des contraintes équivalentes de chaque critère, en se basant sur le calage des courbes de fatigue du matériau considéré. Une comparaison entre les résultats de durée de vie au nombre de cycles à la rupture est réalisée.

Mots clés : contrainte, fatigue, durée de vie, comparaison, critère.

ملخص

معظم الهياكل الميكانيكية لديها عيوب و قد لا تلاحظ إلا بعد تعريفها لأحمال عشوائية و متغيرة لذلك تعتبر دراسة السلوك الميكانيكي في التعب أمرا أساسيا وذلك باستخدام معايير مختلفة للإرهاق متعدد المحاور، الهدف من دراستنا هو مقارنة معيارين عالميين هامين للإرهاق المتعدد المحاور و هما (Marin) ، (Crossland) على الفولاذ الصلب SM45C الذي نعلم كل خصائصه و مميزاته الميكانيكية و ذلك بمساعدة الكود ANSYS الذي ندخل فيه هذه الخصائص والذي يحدد لنا المناطق ذات التركيز العالي للضغط و في الجزء و نقوم في تجربتنا بحساب عمر خدمة هذا الفولاذ الصلب وذلك بتطبيق إجهاد في حالة متعدد المحور لخمس حالات و نضع النتائج في جداول و نقوم بالمقارنة بين المعيارين

الكلمات المفتاحية: إجهاد، معايير، عمر الخدمة، مقارنة

Abstract

Most of the mechanical structures have defects and they may not be noticed until they are subjected to random and variable loads. Therefore, the study of mechanical behavior in fatigue is essential, using different criteria for multiracial fatigue. The aim of our study is to compare two important global criteria for multiracial fatigue, namely Crossland and Marine Steel SM45C, whose mechanical properties and advantages are known, with the help of the ANSYS code, in which we enter these properties, and which determines the areas of high stress concentration in the part, and in our experience we calculate the service life of this steel by applying stress in the multiracial case for five cases We put the results in tables and compare the two criteria.

Keywords: stress, standards, service life, comparison.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur la fatigue

I.1. Introduction	3
I.2. Définition de la fatigue.....	3
I.3. Contraintes Appliquées.....	4
I.4. Types de charges en fatigue.....	4
I.5. Courbe de Wöhler	6
I.5.1. Domaine de la fatigue oligocyclique.....	7
I.5.2. Domaine de la fatigue limitée.....	7
I.5.3. Domaine de la fatigue illimitée	7

Chapitre II : Classification des chargements et des critères de fatigue

II.1. introduction.....	9
II.2 Formalisme générale d'un critère de fatigue :	9
II.3 Classification des critères de fatigue multiaxiale	9
II.3.1 Les critères empiriques	10
II.3.1.1. Le critère de Hohenemser et Prager.....	10
II.3.1.2. Le critère de Davies.....	10
II.3.1.3. Le critère de Lee	11
II.3.2. Les critères de type plan critique	11
II.3.2.1. Le critère de Mataka	11
II.3.2.2. Le critère de Munday et Mitchell	11
II.3.2.3. Le critère de Stulen et Cummings	12
II.3.3. Les critères d'approche globale	12
II.3.3.1. Le critère de Deitman & Issler 1	12

II.3.3.2. Le critère de Sines	12
II.3.3.3. Critère de Crossland	13
II.3.3 4.Le critère de Marin	13

Chapitre III : Etude comparative des différents critères de fatigue multiaxiale

III.1.Introduction.....	15
III.2. Critère de Crossland	15
III.3. Le critère de Marin	16
III.4. Présentation de matériau étudié.....	18
III.4.1. Composition chimique et caractéristiques mécaniques [6].....	18
III.4.2. Courbes de Wöhler pour l'acier de nuance SM 45C	19
III.4.3. Droites limites du critère de Crossland [11].....	21
III.4.3.A. Droite limite du domaine de durée de vie illimitée	21
III.4.3.B. Droite limite du domaine de durée de vie limitée	21
III.5. La géométrie de structure	22
III.6. Méthodologie de travail adoptée	23
III.7. Calcul des durées de vie	23
III.8. Le critère de Von Mises	23
III.9.Conditions aux limites de la structure	24
III.10. Maillage de la structure.....	24
III.11. Détermination de la zone critique.....	25
III.12.Raffinement du maillage	26
III.13. Résultats obtenus pour l'utilisation de critère de Crossland.....	26
III.14. Résultats obtenus pour l'utilisation de critère de Marin	27
III.15. Comparaison et interprétation des durées de vie obtenues pour les deux critères.....	29
III.16.Commentaire des résultats	29
Conclusion générale	31
Référence.....	32

Liste de figures

Figure I.1. Modélisation du chargement appliqué par les mains sur le fil d'acier.....	3
Figure I.2. Définition des contraintes (maximale, globale et nominale).....	4
Figure I.3. Le cycle de contrainte en fatigue.....	5
Figure I.4. Formes de cycle des contraintes.....	6
Figure I.5 Représentation de courbe de Wöhler.....	7
Figure II.1. Ensemble des critères multiaxiaux de fatigue et leur classification.....	10
Figure III.1. Positions de composantes (P_{max} ; ξ_a) dans le diagramme de Crossland.....	16
Figure III.2. Positions des composantes (ξ_a , ξ_m) sur le diagramme de Marin.....	18
Figure III.3. Courbes d'endurance en torsion alternées de SM45C.....	20
Figure III.4. Courbe d'endurance en flexion alternée de l'acier de nuance SM 45C.....	20
Figure III.5. Droites limites du critère de Crossland pour l'acier de nuance SM 45C.....	22
Figure III.6. La géométrie de structure	22
Figure III.7. Conditions aux limites de la structure.....	24
Figure III.8. Maillage de structure.....	25
Figure III.9. Position de l'élément 65.....	25
Figure III.10. Représentation graphique des durées de vie prédite.....	30

Liste de tableaux

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier SM 45C.....	18
Tableau III.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier SM 45C.....	19
Tableau III.4. Résultats du Raffinement du maillage de la structure pour Crossland	26
Tableau III.3. Calcul des paramètres de Crossland et la durée de vie.....	27
Tableau III.5. Calcul des paramètres de marin et la durée de vie.....	28
Tableau III.6. Durées de vie prédites.....	29

Nomenclature

ξ_a	la racine carrée de deuxième invariant du déviateur de contrainte
N	Durée de vie ou nombre de cycles
σ	Contrainte de charge appliquée
σ_m	La contrainte moyenne
σ_a	L'amplitude de la contrainte
σ_{max}	La contrainte maximale
σ_{min}	La contrainte minimale
R	Rapport de charges
σ_u	La contrainte de rupture
σ_e	La limite d'élasticité
σ_D	La limite d'endurance
C, a, b et β	Constantes déterminées expérimentalement utilisées par Basquin
A, B, C, E, a et b	Constantes déterminées de l'expérimentale utilisés par Corson et Bastenaire
E	La fonction du critère de fatigue multiaxiale
σ_{-1}	La Limite d'endurance en traction alternée symétrique
σ^0	La limite d'endurance en traction répétée
f_{-1}	La limite d'endurance en flexion alternée symétrique
R_m	Résistance à la rupture en traction
f_0	La limite d'endurance en flexion répétée
f_a	Amplitude de la contrainte de flexion
f_m	Contrainte moyenne de flexion
τ_{-1}	La limite d'endurance en torsion alternée symétrique
τ_m	Contrainte moyenne de cisaillement (torsion)
τ_a	Amplitude de la contrainte de cisaillement (torsion)
τ_u	Résistance à la rupture au cisaillement
P_m	Pression hydrostatique moyenne
J_2	Second invariant de tenseur déviateur des contraintes
P_{max}	Pression hydrostatique maximale
E_m	Amplitude et contrainte moyenne de $\sqrt{J_2}m$
E_a	Amplitude et contrainte alternée de $\sqrt{J_2}a$
σ_{eq}	Contrainte de fatigue équivalente
$tr(\sigma_a, \sigma_m)$	Trace de la partie alternée et la partie moyenne de tenseur des contraintes
E_h	Indicateur de dommage par plan
τ_{ha}	Amplitude de la contrainte tangentielle
σ_{hha} et σ_{hhm}	Amplitude de la contrainte normale et contrainte normale moyenne

$\tau_{-1}(N)$	Limite de fatigue à N cycles en torsion alternée
$f_{-1}(N)$	Limite de fatigue à N cycles en flexion alternée
$\sigma_{-1}(N)$	Limite de fatigue à N cycles en traction alternée
J_1 et J_2	1er et 2ème invariants du tenseur des contraintes calculés sur les amplitudes des contraintes du cycle
$S_{Ia}(t)$, $S_{IIa}(t)$ et $S_{IIIa}(t)$	Valeurs principales du tenseur déviateur alterné $[S_{ij}(t)]$ à l'instant (t)

Introduction générale

L'étude de la tenue en fatigue des structures mécaniques est une tâche essentielle dans les domaines automobiles, industriels et aérospatiaux, qui conçoivent des pièces de différentes tailles, présentant de défauts de forme. L'analyse des structures par les logiciels de simulation permet de localiser les zones de forte concentration de contraintes, ces lieux favorisent la naissance et la propagation de fissures, ceci va conduire à la rupture du matériau. La prédiction de la durée de vie, des structures soumises à la fatigue multiaxiale, est un objectif recherché par les concepteurs afin d'éviter les défaillances.

Le travail envisagé dans cette étude, est d'établir une comparaison entre les durées de vie, obtenues par deux critères de fatigue appartenant à la famille de critères d'approche globale, en l'occurrence le critère de Crossland et le critère de Marin.

L'estimation de la durée de vie en fatigue est effectuée dans le domaine d'endurance limitée pour des chargements en phase, condition sur laquelle sont basés les critères mentionnés. Une structure rectangulaire présentant un trou, de nuance SM45C, acier dont ces caractéristiques mécaniques et cycliques sont connues, est soumise à une traction monotone superposée à une autre alternée. Les durées de vie calculées sont en fonction de la contrainte équivalente de chaque critère après l'introduction des conditions aux limites, via le code de simulation Ansys, en variant les intensités de chargements.

Notre mémoire contient trois chapitres. Le premier est consacré à la présentation des généralités sur la fatigue.

Dans le second chapitre nous faisons une classification des différents types de chargements, ainsi qu'une illustration sur quelques critères de fatigue multiaxiale.

Le dernier chapitre est réservé à la phase de prédiction des valeurs de durées de vie selon les deux critères, ainsi que l'interprétation et la comparaison entre les résultats obtenus.

Une conclusion générale et quelques perspectives sont présentées à la fin de ce travail.

Chapitre I

Généralités sur la fatigue

I.1. Introduction :

L'émergence de la révolution industrielle au début de 1800 a conduit à l'émergence de machines et d'équipements rotatifs et alternatifs. Alors que les pièces mobiles qui échouent en raison de charges répétées deviennent de plus en plus courantes, cela a été observé. La conception et de mise en œuvre d'un projet ferroviaire basé sur des relations statiques représentées par une loi de Hooke, où les valeurs de limite d'élasticité des métaux utilisées dans le projet à l'époque étaient beaucoup plus élevées. Parmi les valeurs de contrainte appliquées réelles, environ 1,5 comme facteur de sécurité. Mais après avoir terminé la conception et la mise ces rails en service est apparu quelques jours plus tard des fissures et a commencé à se développer dans certaines parties où la panne s'est produite. Alors les concepteurs étudier ce phénomène de manière extensive et approfondie. D'où le phénomène de fatigue, que l'on appelait de ce nom en 1839 le Français **Pancelet**. [11]

I.2. Définition de la fatigue : [3]

La fatigue est l'endommagement local d'une pièce sous l'effet d'efforts variables : forces appliquées, vibrations, etc. Alors que la pièce est conçue pour résister à des efforts donnés, la variation de l'effort, même à des niveaux plus faibles que ceux pouvant provoquer sa rupture, peut à la long terme conduire à la rupture. Les essais de fatigue permettent de déterminer la résistance des matériaux à de telles faibles charges répétées.

Pour un petit exemple on assimile le fil d'acier à une poutre sur laquelle sont appliqués les efforts des deux mains, dans le premier sens la fibre AB est tirée (sens 1) contrainte positive, lorsqu'on inverse le chargement (sens 2) la fibre AB est comprimée et la contrainte est négative. En répétant plusieurs fois jusqu'à la rupture. C'est le phénomène de fatigue.

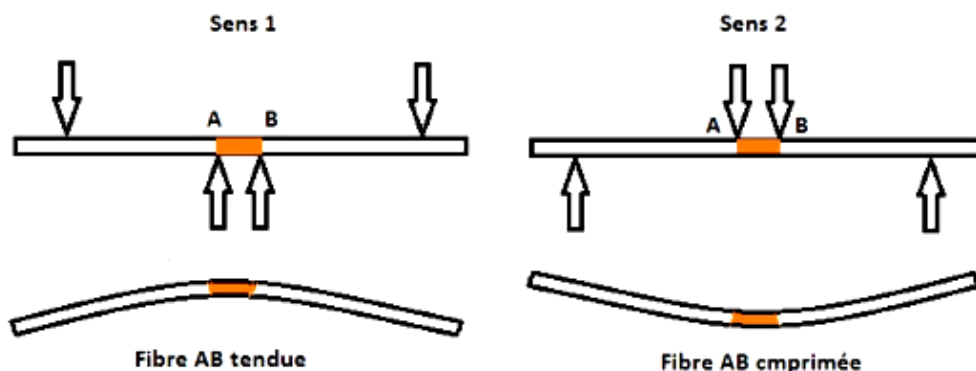


Figure I.1. Modélisation du chargement appliqué par les mains sur le fil d'acier. (8)

.Les étapes principales de la fatigue sont :

- Amorçage de fissures,
- Propagation des fissures,
- La rupture.

I.3. Contraintes Appliquées :

Généralement au cours de l'essai de fatigue, la contrainte appliquée, approximativement sinusoïdale, varie en fonction du temps, en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats.

La contrainte, prise en compte lors d'un essai de fatigue, est une contrainte globale (calculée par rapport à la section de la pièce d'après la résistance des matériaux et relativement au domaine élastique). Elle est exprimée en N/mm² ou en MPa, **Figure 2.** [4]

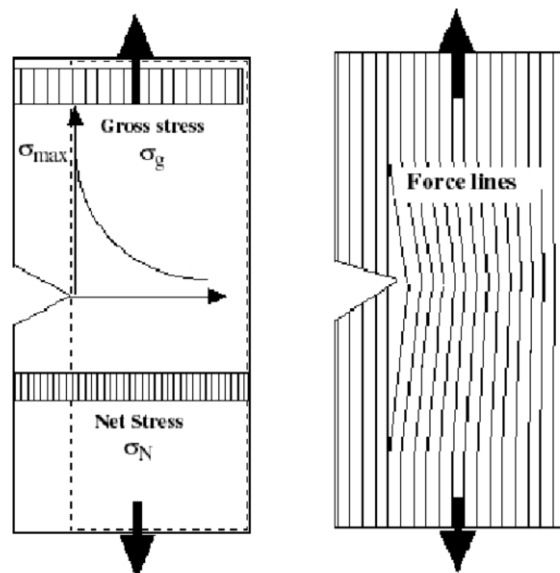


Figure I.2.Définition des contraintes (maximale, globale et nominale). [4]

I.4. Types de charges en fatigue : (4)

Les essais de fatigue sont définis par des normes, et ils sont de plusieurs types selon les charges appliquées:

- Traction – compression
- Flexion plane
- Flexion rotative
- Flexion trois points
- Torsion

Le domaine de la fatigue étudie les sollicitations de types sinusoïdales. Il existe plusieurs termes et symboles pour décrire le cycle de contrainte, la **figure I.1** représente cycle de contraintes appliquées.

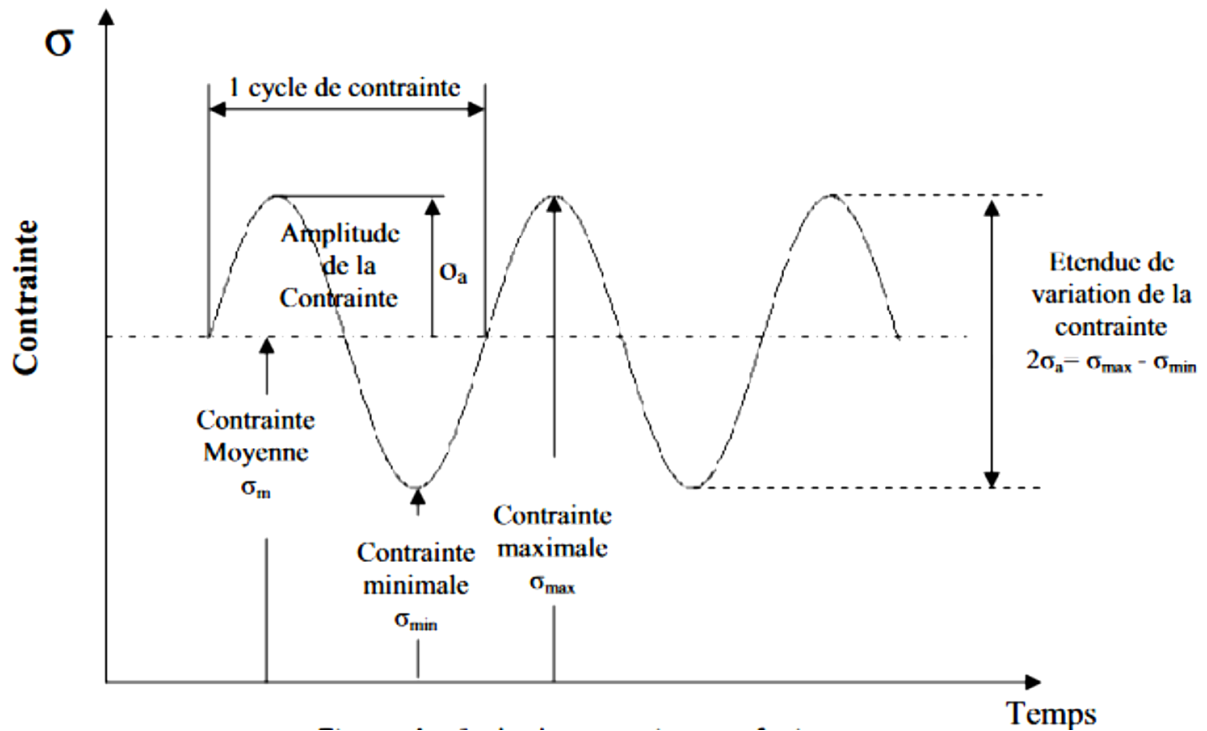


Figure I.3. Le cycle de contrainte en fatigue. [4]

Les éprouvettes sont soumises à des sollicitations périodiques. La contrainte passe par un maximum σ_{max} et par un minimum σ_{min} . Les autres paramètres sont :

- La contrainte moyenne

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \dots \dots \dots \text{(I.1)}$$

- L'amplitude de contrainte

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \dots \dots \dots \text{(I.2)}$$

- L'étendue de variation de contrainte

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a \dots \dots \dots \text{(I.3)}$$

- Rapport de charge R

C'est le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \dots \dots \dots \text{(I.4)}$$

Les formes possibles de cycle de contrainte sont présentées dans la **figure 4**

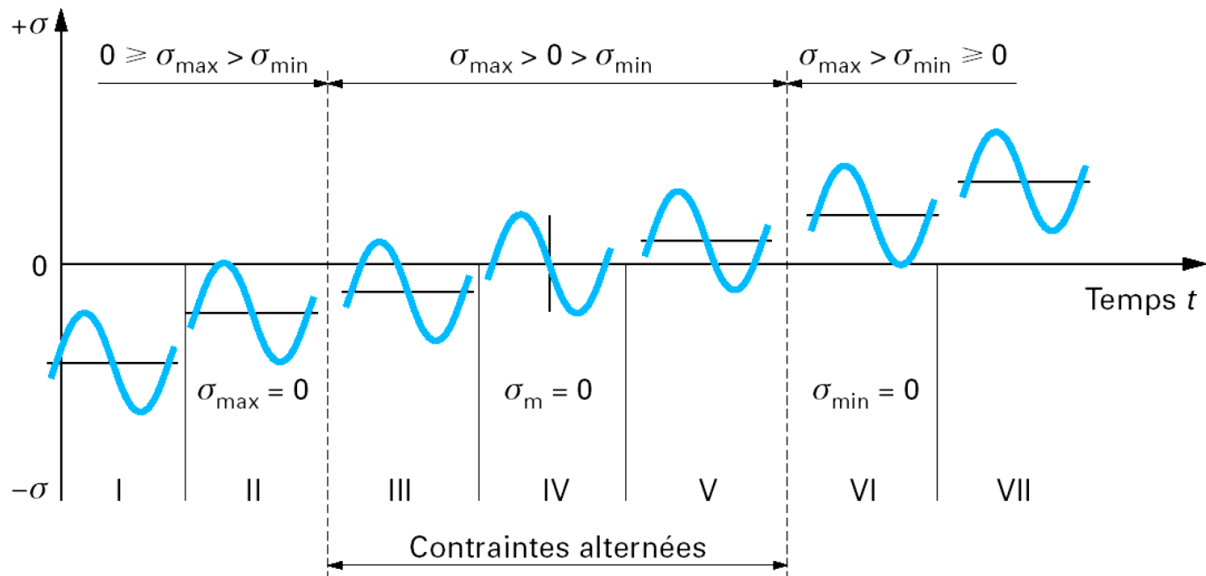


Figure I.4. Formes de cycle des contraintes. [4]

- I. Contrainte ondulée de compression : $1 < R\sigma < +\infty$.
- II. Contrainte répétée de compression : $R\sigma \rightarrow +\infty$.
- III. Contrainte alternée dissymétrique : $-\infty < R\sigma < -1$.
- IV. Contrainte purement alternée : $R\sigma = -1$
- V. Contrainte alternée dissymétrique : $-1 < R\sigma < 0$.
- VI. Contrainte répétée de traction : $R\sigma = 0$.
- VII. Contrainte ondulée de traction : $0 < R\sigma < 1$.

I.5. Courbe de Wöhler : (9)

La courbe de Wöhler est une façon de représenter des résultats d'essais de fatigue en science des matériaux. Elle est appelée courbe S-N (Stress vs number of cycles), c'est-à-dire « contrainte en fonction du nombre de cycles » dans les pays anglo-saxons. Dans l'industrie et le génie civil, elle est d'un emploi courant pour estimer le degré d'endommagement lié à la fatigue des matériaux.

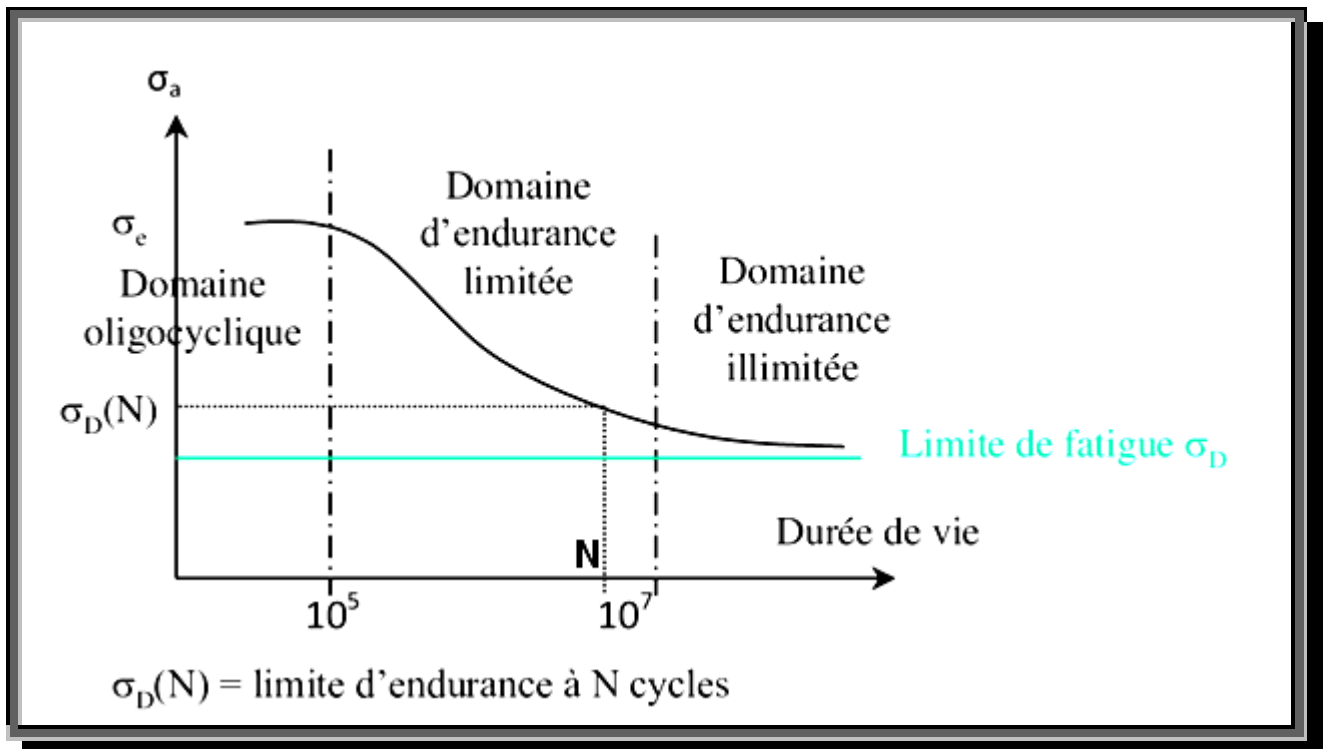


Figure I.5. Représentation de courbe de Wöhler. [9]

I.5.1. Domaine de la fatigue oligocyclique (N est jusqu'à environ 10^4 cycles) [1]

La première zone est caractérisée par des contraintes se situant entre la contrainte de rupture σ_r et la limite d'élasticité σ_e . La rupture survient après une durée de vie faible. Par ailleurs ces contraintes sont généralement associées à des déformations plastiques considérables.

I.5.2. Domaine de la fatigue limitée ($10^4 \leq N \leq 10^7$)

La deuxième zone est caractérisée par des contraintes inférieures de la limite d'élasticité. Le nombre de cycles à la rupture N croît quand l'amplitude de la contrainte décroît. La rupture survient après un nombre limité de cycles, et elle n'est pas accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble mesurable. La réponse de l'éprouvette atteint dans ce cas un régime adapté élastique. Ce domaine est le quel travaillent la plupart des structures qui, pour diverses raisons, doivent avoir des masses et des volumes impérativement réduits. Il existe de très nombreuses relations mathématiques reliant l'amplitude de la contrainte et le nombre de cycles à la rupture dans ce domaine.

I.5.3. Domaine de la fatigue illimitée ($N > 10^7$)

Dans cette zone la courbe de Wöhler tend vers une contrainte limite asymptotique présentée par une asymptote parallèle à l'axe des N , σ_D est appelée limite d'endurance ou limite de fatigue. Au-delà de ce point il n'y a pas de rupture quel que soit le nombre de cycles appliqué. Il existe d'autres expressions analytiques qui peuvent représenter les courbes de Wöhler, dans les domaines d'endurance illimitée lorsqu'elles sont connues pour un matériau ou une pièce donnée.

Chapitre II :
Classification des chargements et des
critères de fatigue

II.1 Introduction :

Les pièces mécaniques sont généralement soumises à chargements complexes et variables au cours du temps, ce qui conduit à la difficulté de prévoir leur comportement et la tenue en fatigue, le matériau subi de modification de ces propriétés mécaniques. La géométrie joue aussi un rôle dans l'endommagement des structures, puisqu'elles contiennent généralement des singularités et des entailles pouvant provoquer des endroits de forte intensité de contraintes, permettant la naissance et la propagation des fissures, et par la suite la rupture du matériau.

Dans la bibliographie il plusieurs critères de fatigue, ou chacun a ces propre paramètres et conditions d'exploitations. Leurs rôle est convertir les chargements multiaxiaux appliqués sur les structures, en une contrainte équivalente, qui est utilisée afin de déterminer de la durée de vie. [3]

II.2 Formalisme générale d'un critère de fatigue :

Généralement, 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 du matériau est atteinte :

$$E = ([\sigma_{ij}], \sigma_{-1}, f_{-1}, f_0, \tau_{-1} \dots) = 1 \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

Cette relation de fatigue traduite par la fonction E , indique 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 .

II.3 Classification des critères de fatigue multiaxiale :

Les critères de fatigue sont regroupés dans trois grandes familles, ils sont classés dans l'organigramme de la figure ci-dessous.

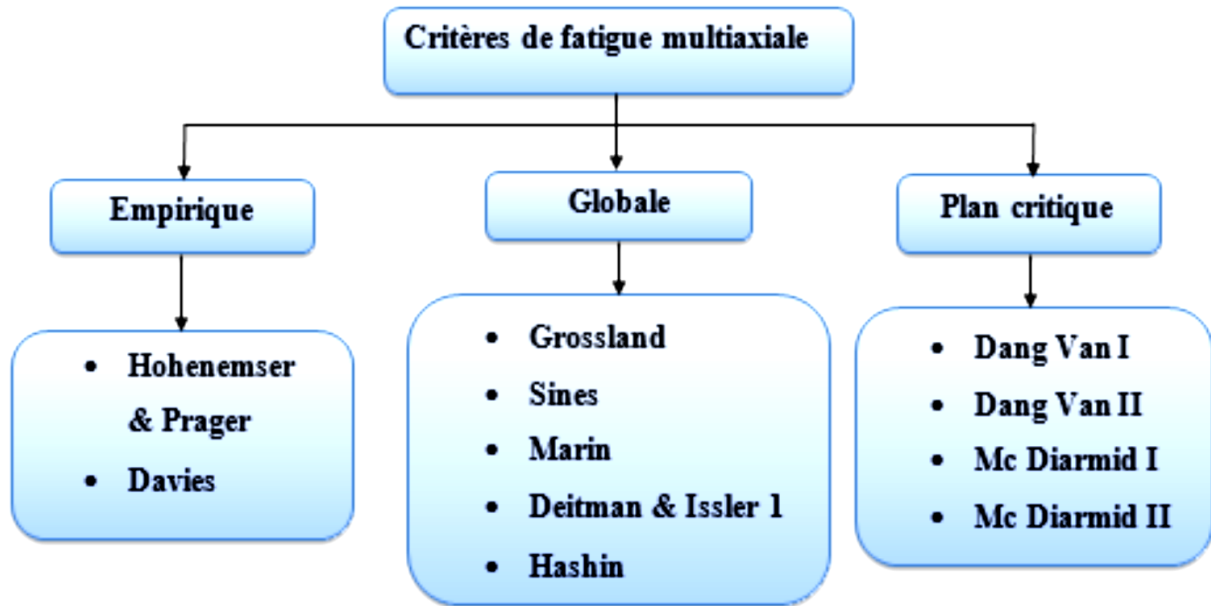


Figure II.1. Ensemble des critères multiaxiaux de fatigue et leur classification. (1)

Une étude bibliographique a permis de recenser 37 critères de fatigue qui constituent la base de données. L'ensemble des critères sont répartis en trois approches distinctes qui se différencient par leur concept.

II.3.1. Les critères empiriques :

II.3.1.1. Le critère de Hohenemser et Prager : [10]

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

$$E_{HP} = \frac{\tau_a}{\tau_{-1}} + \frac{\sigma_m}{R_m} \dots\dots\dots (II.2)$$

II.3.1.2 Le critère de Davies : [10]

Davies, en 1935, 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_m mais l'inverse c'est à dire qu'il observe l'amplitude de la contrainte normale de flexion admissible en fonction d'une contrainte de cisaillement statique τ_m . Il construit à partir de ses observations la modélisation suivante :

$$E_{DA} = \left(\frac{f_A}{f-1} \right)^2 + \frac{\tau_a}{\tau_{-1}} \dots\dots\dots (II.3)$$

II.3.1.3 Le critère de Lee : [10]

En 1980, Lee propose une modélisation issue d'essais de flexion-torsion hors phase. Il introduit un exposant α dépend du déphasage φ entre les deux sollicitations et définis par $\alpha = 2(1 + \beta \sin \varphi)$ ou β est une constante liée au matériau. Le critère est donné par la relation suivante :

$$E_{Lee} = F_a \left[1 + \left(\frac{\tau_a F_{-1}}{\tau_{-1} F_a} \right)^\alpha \right] \dots \dots \dots (II.4)$$

II.3.2. Les critères de type plan critique :

II.3.2.1. Le critère de Mataka : [10]

En 1977, Mataka formule un critère semblable à ceux de Stulen & Cummings et de Findley. Il ne s'en différencie que par le choix du plan critique, celui où l'amplitude du cisaillement τ_{ha} est maximale. La fonction de fatigue sur ce plan Critique s'écrit :

$$E_{MT} = \frac{\tau_{ha} + \alpha \sigma_{hhmax}}{\beta} \dots \dots \dots (II.5)$$

Les constantes α et β et la condition de validité du critère sont identiques à celles des critères de Stulen & Cummings et de Findley.

II.3.2.2. Le critère de Munday & Mitchell : [10]

Munday & Mitchell proposent leur critère en 1989. Dans un premier temps, ils identifient le plan critique comme étant celui où le cisaillement est maximal, c'est à dire de la façon suivante $Max_t(\tau h(t))$

Dans un second temps, ils expriment la fonction de fatigue de leur critère sur le plan critique en s'inspirant de l'ellipse de Gough et Pollard. Les amplitudes des contraintes normales et tangentielles ont respectivement comparées aux limites de fatigue en flexion et en torsion alternées symétriques.

$$E_{mm} = \left(\frac{\sigma_{\square a}}{f_{-1}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\square a}}{\tau_{-1}} \right)^2 \dots \dots \dots (II.6)$$

Ce critère ne prend donc pas en compte l'influence d'une contrainte moyenne si ce n'est dans certains cas dans la détermination du plan critique.

II.3.2.3. Le critère de Stulen & Cummings : [10]

Défini en 1954, le critère de Stulen & Cummings recherche le plan critique en Balayant tous les plans possibles afin de trouver celui où la quantité E_h ci-dessous est maximale :

$$E_{\square} = \frac{\tau_{\square a}}{\beta - \alpha \sigma_{\square \square max}} \dots\dots\dots (II.7)$$

La fonction de fatigue du critère s'obtient, sur le plan critique, de la façon suivante:

$$E_{sc} = \frac{\tau_{\square a} + \alpha \sigma_{\square \square max}}{\beta} \dots\dots\dots (II.8)$$

Le critère s'écrit $E_{sc}=1$ lorsque la limite de fatigue du matériau est atteinte. les deux constantes α et β déterminées (calage du critère) à partir de deux limites de fatigue σ_{-1} et τ_{-1} du matériau respectivement en traction et en torsion alternées symétriques, en écrivant que le critère est validé ($E_{sc}=1$) pour ces deux limites de fatigue. On obtient ainsi :

$$\alpha = 2 \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} - 1 \quad ; \quad \beta = \tau_{-1} \dots\dots\dots (II.9)$$

Le domaine de validité du critère est obtenu par la condition $\alpha > 0$ (contribution effective au dommage par fatigue de la contrainte normale) c'es à dire par $\frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} > \frac{1}{2}$

II.3.3. Les critères d'approche globale :

II.3.3.1. Le critère de Deitman & Issler 1 : [10]

Deitman & Issler proposent en 1974 trois modélisations du comportement en fatigue. La première d'entre elles, le critère de Deitman & Issler 1, est inspirée de la modélisation du diagramme de Haigh par la parabole de Gerber :

$$E_{DI1} = \left(\frac{\sqrt{3} J_{2a}}{f_{-1}} \right)^2 + \frac{3 P_{Hm}}{R_m} \dots\dots\dots (II.10)$$

II.3.3.2. Le critère de Sines : [10]

Etabli d'abord en 1955, ce critère a été modifié par son auteur en 1981 afin de l'exprimer en fonction des invariants du tenseur des contraintes et de son déviateur et non plus en fonction des deux termes des contraintes relatives au plan octaédrique (contraintes octaédriques normale et tangentielle). La formulation du critère est une fonction de J_{2a} et de I_{1m} .

$$E_{Si} = \frac{\alpha I_{1m} + \sqrt{J_{2a}}}{A} \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

A la limite de fatigue, la fonction de fatigue du critère est égale à l'unité. Ceci est valable en particulier pour les deux limites de fatigue choisies pour caler le critère. Avec σ_0 limite de fatigue en traction répétée, et τ_{-1} celle en torsion alternée symétrique, les constantes α et A s'expriment suivant :

$$A = \tau_{-1} \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

$$\alpha = 2 \frac{\tau_{-1}}{\sigma_0} - \frac{1}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

La validité du critère est assurée par la condition $\alpha > 0$ C'est à dire $\frac{\tau_{-1}}{\sigma_0} > \frac{1}{\sqrt{3}}$

II.3.3.3. Critère de Crossland :

Ce critère sera étudié au prochain chapitre en détail.

II.3.3.4. Le critère de Marin :

Ce critère aussi sera étudié au prochain chapitre en détail.

Chapitre III :
**Etude comparative des différents critères
de fatigue multiaxiale**

III.1 Introduction :

Dans cette partie, nous exploitons deux critères de fatigue appartenant à la famille d'approche globale, il s'agit du critère de Crossland et le critère de Marin. Le premier est largement employé dans la bibliographie pour l'évaluation de la durée de vie au nombre de cycles, le deuxième critère est utilisé afin d'établir une comparaison entre les valeurs de durées de vie calculées. Ces deux critères sont basés sur les courbes de fatigue en torsion et flexion purement alternées, exploités dans le domaine d'endurance limitée.

III.2. Critère de Crossland :[5]

Il est basé sur le critère de plasticité de Von-Misés, qui permet de prédire le comportement des structures sous chargement multiaxial lors de sollicitations cycliques à grand nombre de cycles. Il présente l'avantage d'être validé par des résultats expérimentaux. Il est défini par la limitation de la contrainte équivalente exprimée par une relation linéaire entre la racine carrée du second invariant de déviateur des amplitudes de contraintes, et la pression hydrostatique maximale pour un volume élémentaire représentatif.

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

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

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

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

Le deuxième invariant du déviateur des amplitudes de contrainte est exprimé par :

$$\xi_a = \sqrt{J_{2a}} = (\sigma_{eq})_a / 3 \dots \dots \dots (III.4)$$

La pression hydrostatique est définie par la relation suivante :

$$P_{max} = \frac{1}{3} [tr(\sigma_m) + tr(\sigma_a)] \dots \dots \dots (III.5)$$

Pour appliquer ce critère, il faut que la condition suivante soit vérifiée $\frac{f_{-1}}{\tau_{-1}} < \sqrt{3}$

Pour la contrainte équivalente de critère de Crossland, la formule est donnée par :

$$\sigma_{eq} = \xi_a + \alpha \cdot p_{max} \dots\dots\dots(III.6)$$

L'équation du critère permet de tracer le diagramme de Crossland qui contient deux zones. La première est la zone de sécurité (au-dessous de la droite). La deuxième est la zone non-sécurité (au-dessus de la droite). La figure ci-dessous schématise la position de composantes (P_{max} ; ξ_a) dans le diagramme de Crossland.

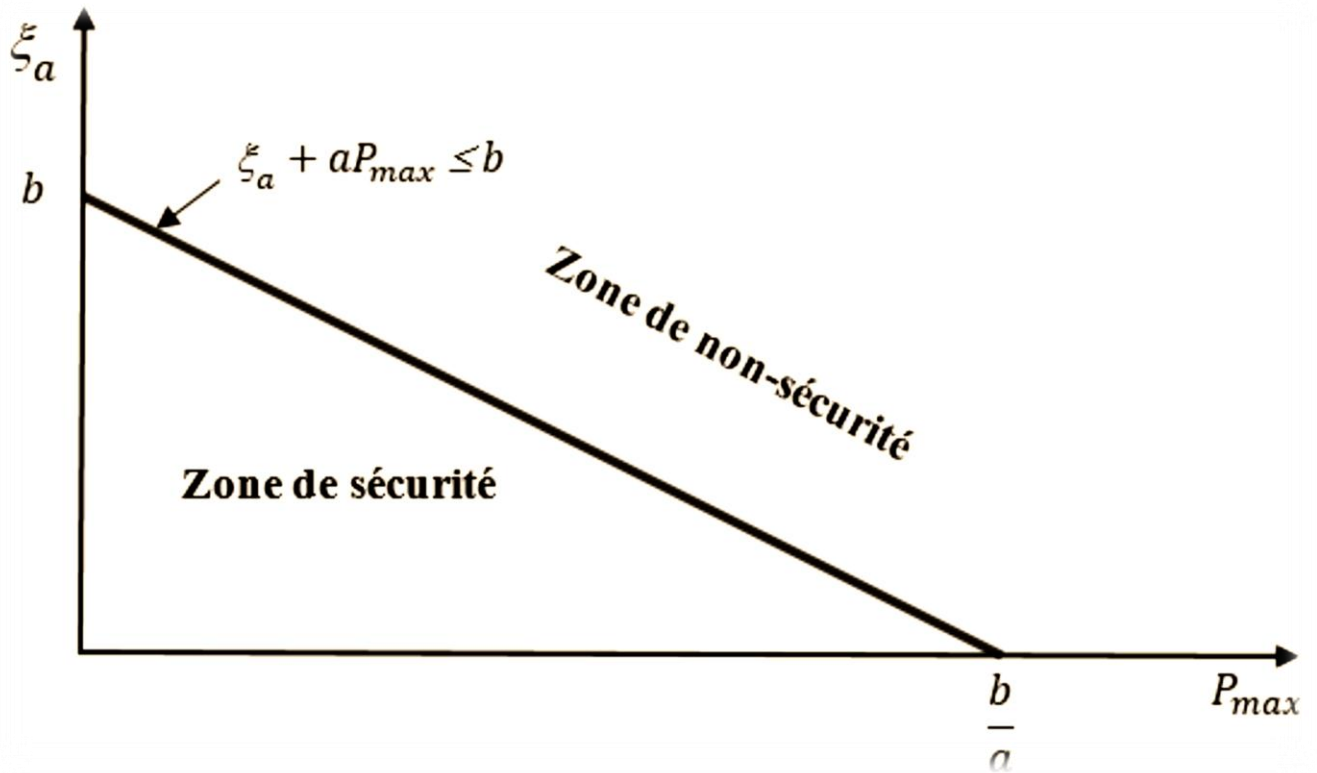


Figure III.1. Positions de composantes (P_{max} ; ξ_a) dans le diagramme de Crossland. [1]

III.3. Le critère de Marin : [1]

Marin propose en 1956 un critère où il compare $\sqrt{3}\xi_a$ (contrainte équivalente des parties alternées des contraintes au sens de Von Mises) à σ_{-1} (limite de fatigue en traction alternée symétrique) et $\sqrt{3}\xi_m$ (contrainte équivalente des contraintes moyennes) à R_m (résistance maximale à la traction).

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

Pour obtenir la formule de σ_{eq} qui est égale à la limite d'endurance en traction alternée σ_{-1} :

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

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

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}\xi_a R_m}{\sqrt{R_m^2 - \xi_m^2}} \dots\dots\dots \text{(III.10)}$$

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

$$Y = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(1 - \frac{3x^2}{R_m^2}\right)} \dots\dots\dots \text{(III.11)}$$

$$\begin{cases} \text{Pour } x = 0 \Rightarrow y = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{3}} \\ \text{Pour } y = 0 \Rightarrow x = \frac{R_m}{\sqrt{3}} \end{cases} \dots\dots\dots \text{(III.12)}$$

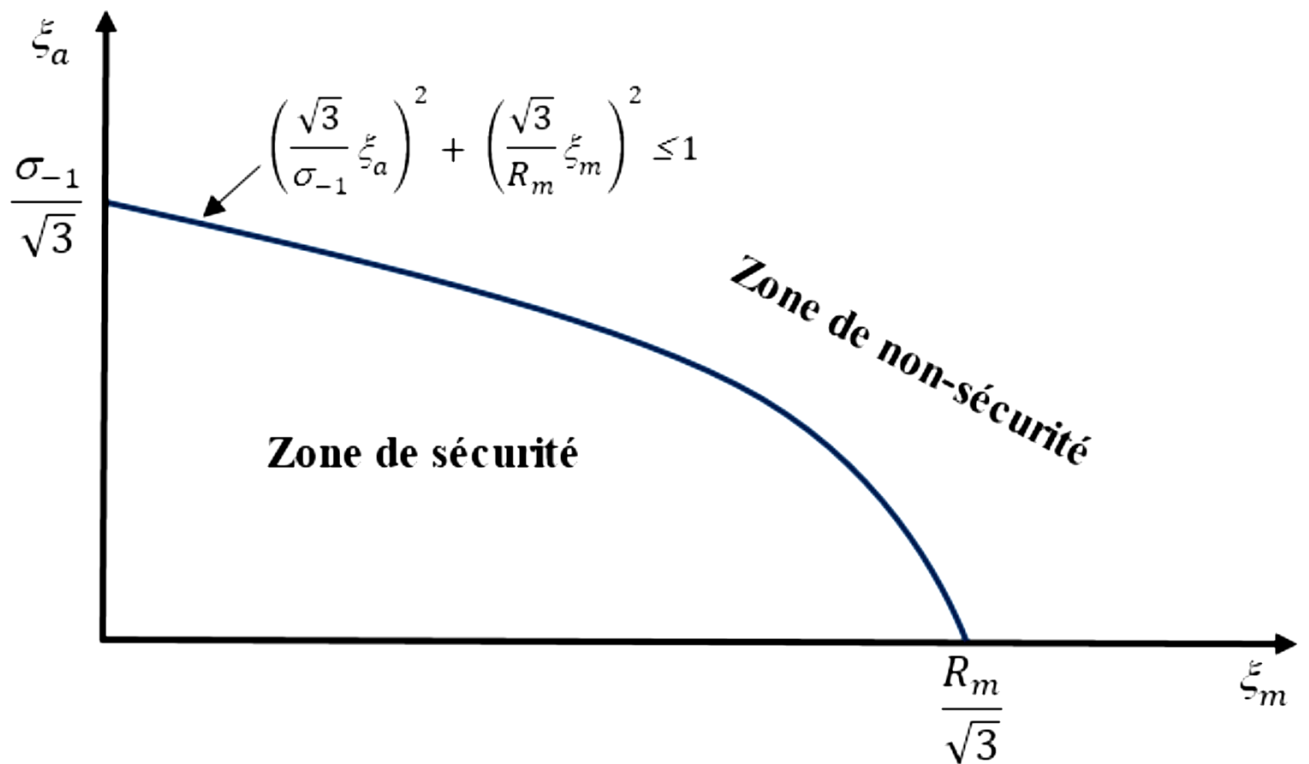


Figure III.2. Positions des composantes (ξ_a , ξ_m) sur le diagramme de Marin. [1]

III.4. Présentation de matériau étudié

Le matériau étudié dans notre mémoire un acier de nuance SM 45C. Ses caractéristiques sont présentées ci-dessous :

III.4.1. Composition chimique et caractéristiques mécaniques : [3]

L'acier SM 45C (acier dont la teneur au carbone varie de 0.42% à 0.50%). La composition chimique et les caractéristiques mécaniques de cet acier sont respectivement représentées dans les tableaux ci-dessous :

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Cu (%)
0,42	0.73	0,02	0,012	0,28	0,14	0,18	0,13

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier SM 45C.

Module d'Young E	213000 Mpa
Coefficient de Poisson ν	0,29
Limite d'élasticité σ_e	638 Mpa
Résistance à la rupture R_m	824 Mpa
Limite d'endurance en flexion alternée symétrique f_{-1}	442 Mpa
Limite d'endurance en torsion alternée symétrique τ_{-1}	311 Mpa

Tableau III.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier SM 45C.

III.4.2. Courbes de Wöhler pour l'acier de nuance SM 45C : [6]

Lee a réalisé des essais de fatigue en torsion et en flexion purement alternées. Dans la zone à endurance limitée à grand nombre de cycles: $N_i \leq N \leq N_k$, les courbes de Wöhler sont données par les équations suivantes:

- Torsion alternée $\tau_{-1}(N) = \frac{311}{1-62.3.N^{-0.53}} \dots \dots \dots \text{(III.13)}$

- Flexion alternée $f_{-1}(N) = \frac{442}{1-62.3.N^{-0.53}} \dots \dots \dots \text{(III.14)}$

Les courbes de Wöhler en torsion et flexion purement alternées sont données comme suit :

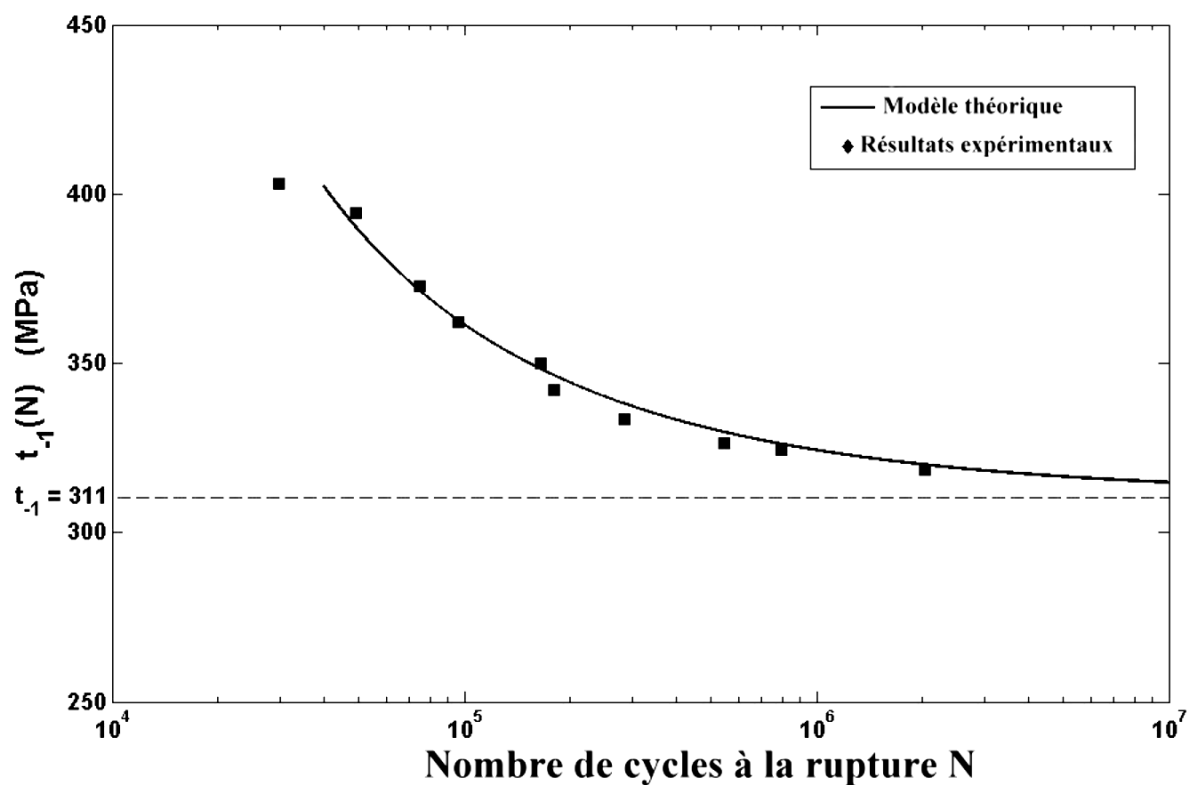


Figure III.3. Courbes d'endurance en torsion alternées de SM45C.

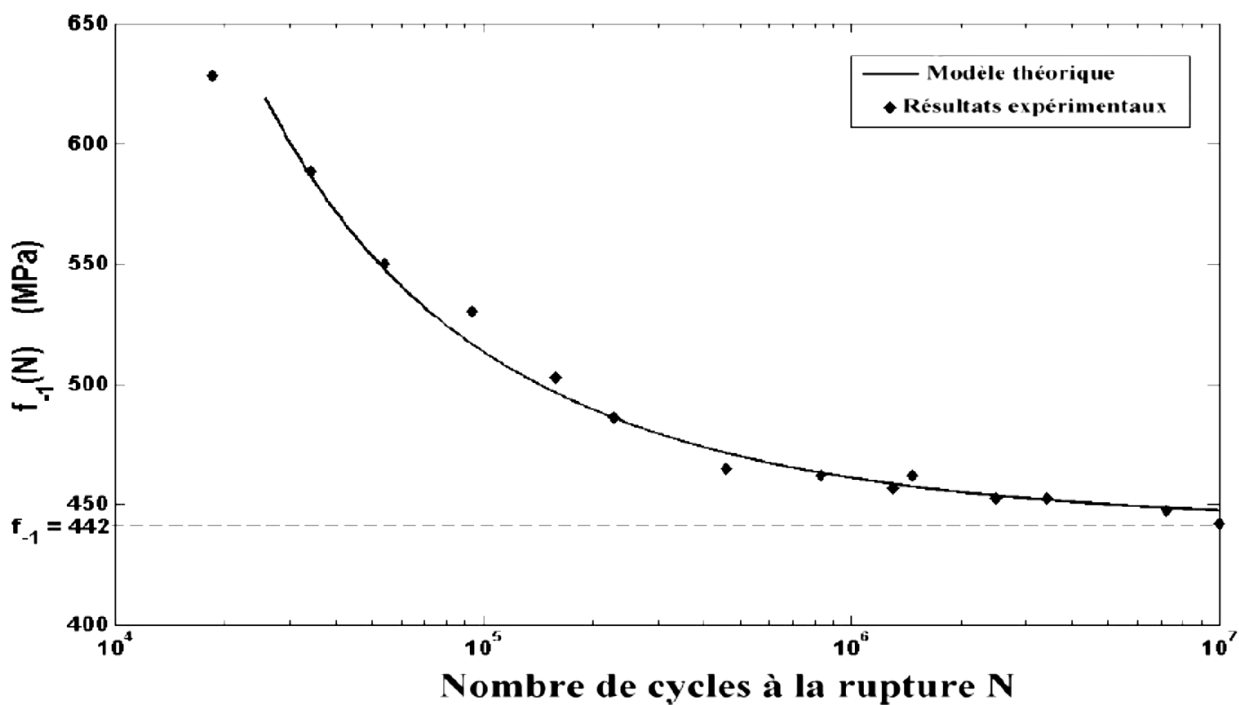


Figure III.4. Courbe d'endurance en flexion alternée de l'acier de nuance SM 45C.

III.4.3. Droites limites du critère de Crossland : (6)

L'application du critère de **Crossland** sera présentée dans le domaine à endurance limitée (courbe de Wöhler) entre $N_I = 81254$ cycles et $N_k = 10^7$ cycles :

III.4.3.A. Droite limite du domaine de durée de vie illimitée :

L'utilisation des équations **III.2 III.3** à $N = N_k = 10^7$ cycles permet de calculer les constantes **a** et **b** pour déterminer la zone de sécurité.

$$\begin{cases} a = 0.37 \\ b = 314,82 \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.15})$$

Le critère s'écrit de la manière suivante :

$$\xi_a + 0,37 \cdot P_{\max} \leq 314,82 \dots\dots\dots (\text{III.16})$$

Cette équation est représentée par une droite séparant la zone de sécurité de celle de non sécurité.

III.4.3.B. Droite limite du domaine de durée de vie limitée :

Le calcul des constantes **a** et **b** pour une durée de vie $N = N_i$ se fait respectivement par les équations en prenant pour nombre de cycles $N = N_i$. Ce calcul donne:

$$\begin{cases} a = 0.37 \\ b = 368.35 \text{MPa} \end{cases} \dots\dots(\text{III.17})$$

Par conséquent l'équation de la droite du domaine sécurité pour une durée de vie $N = N_i$ est donné par :

Le critère s'écrit de la manière suivante :

$$\xi_a + 0,37 \cdot P_{\max} \leq 368,35 \dots\dots\dots(\text{III.18})$$

Le diagramme de Crossland selon la figure ci-dessous est délimité par deux droites, présentant le domaine des durées de vie limitées.

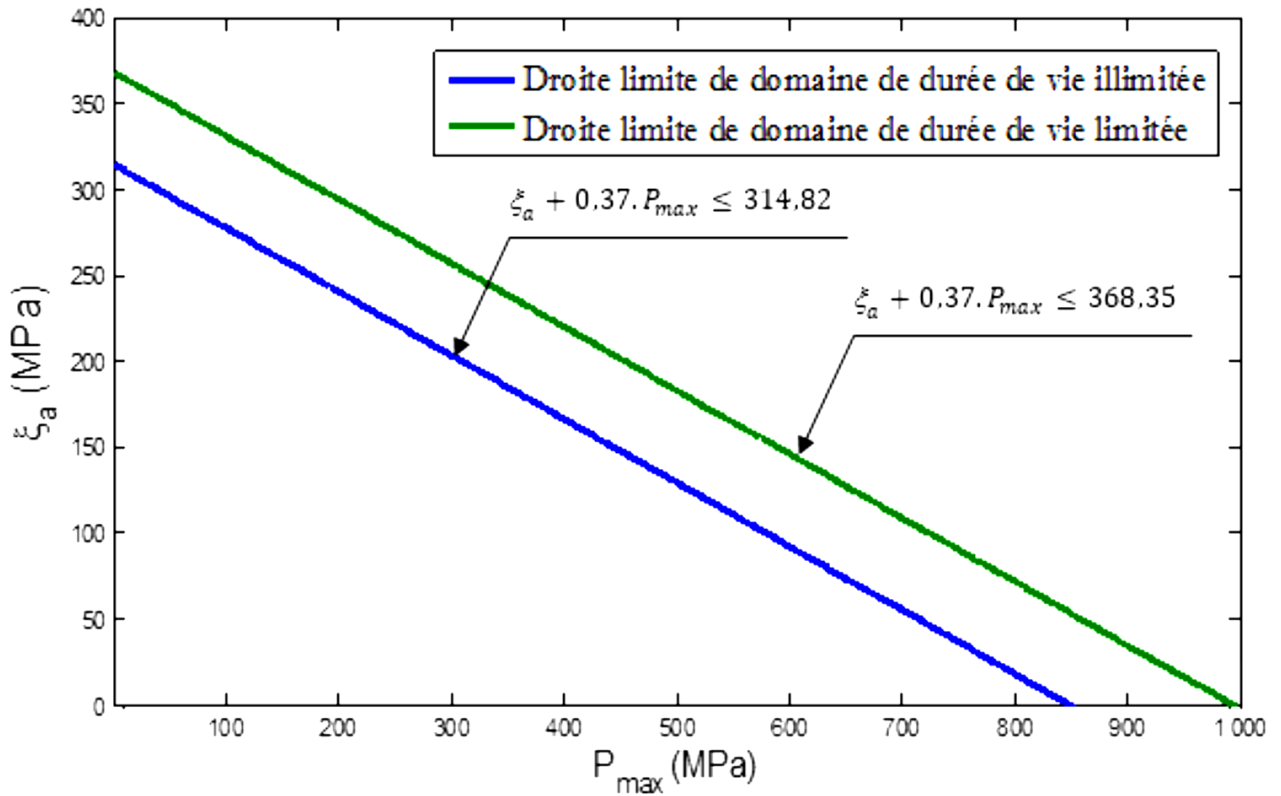


Figure III.5. Droites limites du critère de Crossland pour l'acier de nuance SM 45C. [1]

III.5. La géométrie de structure :

La première structure est une plaque rectangle de largeur $l=100$ mm et hauteur $h=40$ mm de faible épaisseur $e=7$ mm, qui présente un défaut de forme circulaire de Rayon $R=8$ mm, au centre de la pièce afin de montrer la zone où les contraintes sont maximales **figure III.1**. La structure est soumise à une traction monotone superposée à une autre alternée.

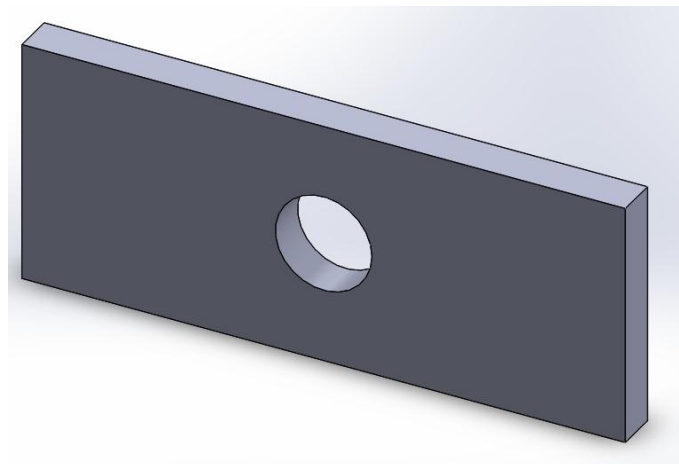


Figure III.6. La géométrie de structure.

III.6. Méthodologie de travail adoptée :

Afin de faire une comparaison entre les deux critères étudiés : critère de Crossland et critère de Marin, on passe par quelques étapes pour atteindre la durée de vie.

1ère étape : identification des caractéristiques mécaniques et les géométries des matériaux étudiés, les limites d'endurance en flexion et en torsion alternées symétriques et les courbes de Wöhler en flexion et en torsion alternées.

2ème étape : détermination de l'équation de la contrainte équivalente à partir du critère utilisé en fonction des limites d'endurances en torsion, flexion alternées symétriques.

3ème étape : établissement d'une relation entre la durée de vie et la contrainte équivalente.

4ème étape : nous avons mis en œuvre un programme sous le code ANSYS pour chaque critère. A partir des données de la première étape, ce programme sera présenté avec le tenseur des contraintes caractérisant un chargement proportionnel. Pour chaque critère, nous réalisons des contraintes multiaxiales, on étudie cinq cas de chargements où la démarche de calcul sous ANSYS est comme suit :

- Calcul des paramètres de chaque critère avec les données de la première étape.
- Calcul de la contrainte équivalente avec les paramètres du critère considéré.
- Calcul de la durée de vie laquelle est en fonction de la contrainte équivalente déterminée préalablement.

5ème étape : les valeurs trouvées sont classées dans des tableaux

III.7. Calcul des durées de vie :

Dans ce travail, on utilise le critère de fatigue d'approche globale de basé sur les invariants du critère de plasticité de Von Mises. Le critère de Crossland permet de calculer la durée de vie à l'aide de la contrainte équivalente, composée de la pression hydrostatique maximale et le deuxième invariants de déviateurs⁰ de contraintes.

III.8. Le critère de Von Mises : [3]

Ce critère prend compte des composantes de contraintes en traction, compression et cisaillement pour donner un niveau de contrainte isotrope (le même dans toutes les directions).Le critère de **Von Mises** n'indique pas le type de sollicitations (traction, compression, cisaillement, ...) est un critère de plasticité et le plus couramment utilisé.

Soit :

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (III.19)$$

$$\sigma_{Ve q} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \dots \dots \dots \text{(III.20)}$$

Von Mises est un surface d'élasticité en rapport avec matériels ductile (Il est donc un critère affaiblissement) isotrope, avec égalité résistance à traction et compression.

Selon ce critère, on a atteint la limite d'élasticité matériau lorsque l'énergie de déformation distorsion atteint une valeur limite.

III.9. Conditions aux limites de la structure :

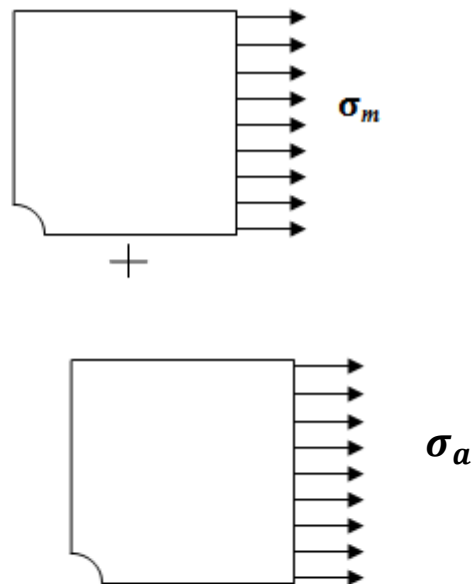


Figure III.7. Conditions aux limites de la structure

III.10. Maillage de la structure :

Le maillage de la structure que nous avons adopté pour cette étude est présenté dans la figure III.4. Il est modélisé par le quart de la géométrie totale (présence de symétrie géométrique suivant l'axe x et l'axe y). Ceci permet de rendre les calculs plus simples et plus rapides (ANSYS permet de simplifier la modélisation et les calculs). La forme de maillage étant ordonnée. Nous avons utilisé un type d'éléments finis sous forme de quadrilatérale. Ce type d'éléments est constitué de 4 nœuds

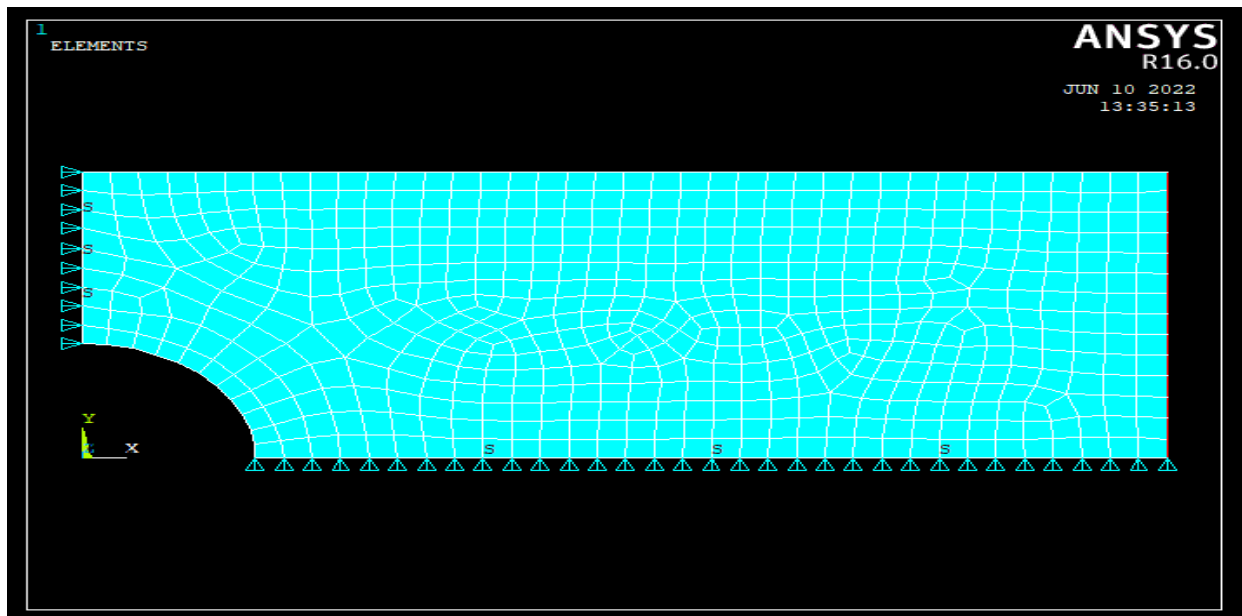


Figure III.8. Maillage de structure

III.11. Détermination de la zone critique :

Nous allons solliciter la structure par une succession de chargements tout en gardant les mêmes conditions aux limites. Les valeurs des charges appliquées ainsi que les résultats obtenus sont résumés dans le **tableau III.2**. La zone critique est représentée par un élément de maillage appelé élément critique « 65 ». Il est montré sur la **figure.III.5**

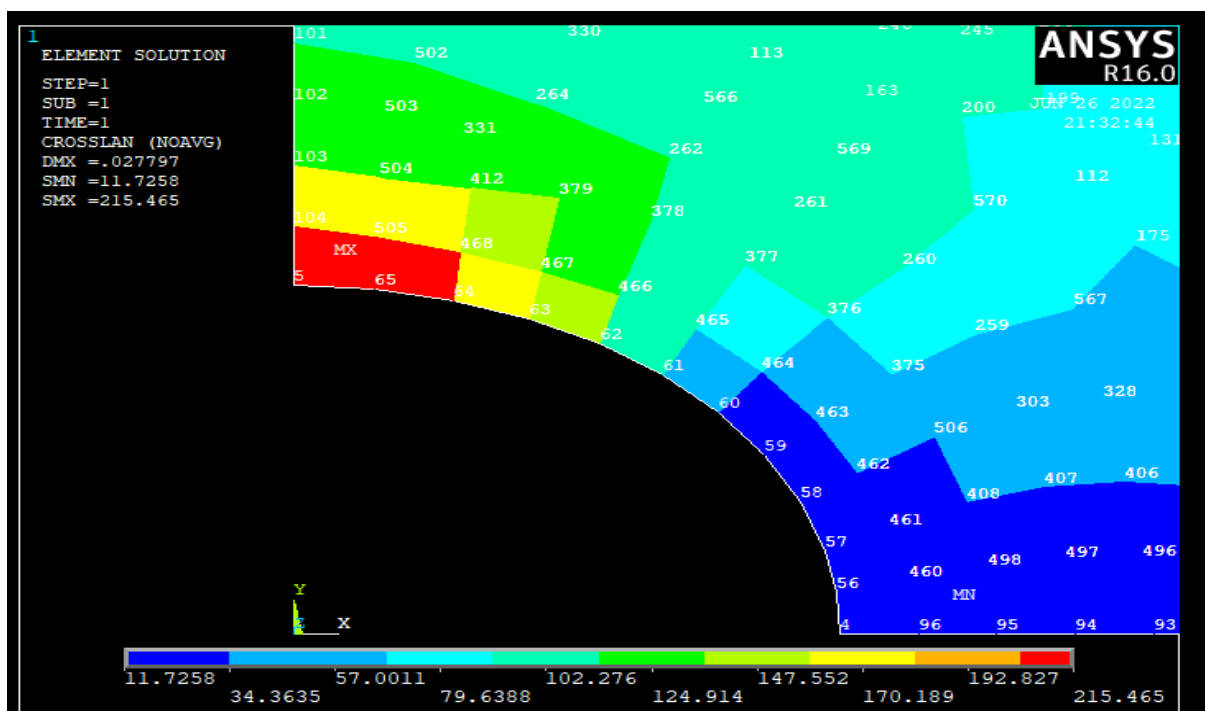


Figure III.8. Position de l'élément 65

III.12. Raffinement du maillage :

Afin de donner plus précision sur les paramètres de Crossland, un raffinement de la structure est effectué selon le tableau ci-dessous :

Ordre de maillage	1	2	3
$P_{\max}(MPa)$	176,45	209,88	283,20
$\xi_a(MPa)$	145,12	170,19	229,06
$\sigma_{EQ}(MPa)$	212,17	249,94	336,82

Tableau III.3. Résultats du Raffinement du maillage de la structure pour Crossland

III.13. Résultats obtenus pour l'utilisation de critère de Crossland :

Nous utilisons les deux contraintes moyenne et alternée pour calculer les paramètres du critère (ξ_a, P_{\max}) qui sont utilisés pour obtenir la contrainte équivalente σ_{eq} et la durée de vie N . Nous utilisons cinq cas du tenseur de contrainte représentant le chargement appliqué, et à l'aide d'un programme ANSYS nous obtenons N et σ_{eq} dans un **tableau II 2** regroupant toutes les valeurs. L'équation de la courbe Wöhler de torsion permet de calculer la contrainte de torsion à rupture si le nombre de cycle est connu. Nous utilisons la fonction inverse de torsion.

$$\sigma_{eq} = \tau_{-1}(N) = \frac{311}{1 - 62,3N^{-0,53}} \dots \dots \dots (III.21)$$

Par inversement de cette formule on obtient le nombre de cycles à la rupture suivant la formule si-dessous:

$$N(\sigma_{eq}) = \left(\frac{\sigma_{eq} - 311}{62,3\sigma_{eq}} \right)^{-1/0,53} \dots \dots \dots (III.22)$$

σ_m (MPa)	σ_a (Mpa)	p_{max} (Mpa)	ϵ_a (Mpa)	σ_e (Mpa)	Nombre de cycles
100	80	196,06	140,96	215,46	Illimité
140	120	283,20	211,44	319,06	2 512 163,26
130	130	283,20	229,06	336,68	312 282,62
140	130	294,09	229,06	340,82	241 038,16
140	135	299,54	237,87	351,70	142 218,05
160	160	348,56	281,92	414,37	HD (Hors domaine)

Tableau III.3. Calcul des paramètres de Crossland et la durée de vie

III.14. Résultats obtenus pour l'utilisation de critère de Marin :

$$\sigma_{-1} = \sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}\xi_a R_m}{\sqrt{R_m^2 - \xi_m^2}} \dots \dots \dots \text{(III.23)}$$

L'utilisation de ce critère requiert la connaissance de la valeur de la limite d'endurance en traction alternée symétrique. Compte tenu que nous ne disposons pas de cette valeur expérimentale, nous considérons, que dans le cas des matériaux durs, il existe un rapport entre les limites d'endurances donné par la relation suivante :

$$0,6 \leq \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} \leq 0,8 \dots \dots \dots \text{(III.24)}$$

On prend la moyenne : $\frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} = 0,7 \dots \dots \dots \text{(III.25)}$

Pour la limite d'endurance en traction alternée symétrique, on obtient:

$$\sigma_{-1}(N) = \frac{442,29}{1 - 62,3N^{-0,53}} \quad \sigma_{-1} = 442,29 \dots \dots \dots \text{(III.26)}$$

On déduit la relation pour le calcul de durée de vie donnée comme suit :

$$N(\sigma_{eq}) = \left(\frac{\sigma_{eq} - 442,29}{62,3\sigma_{eq}} \right)^{-1/0,53} \dots \dots \dots \text{(III.27)}$$

Le **tableau II 3** regroupant toutes les valeurs :

σ_m (Mpa)	σ_a (Mpa)	ξ_a (Mpa)	ξ_m (Mpa)	σ_e (Mpa)	Nombre de cycles
140	120	246,68	211,44	476,95	342 146,39
140	130	246,68	229,06	487,48	216 133,31
140	135	246,68	237,87	493,36	175 514,67
160	160	281,92	281,92	606,2	28 677,7

Tableau III.5. Calcul des paramètres de Marin et la durée de vie

III.15. Comparaison et interprétation des durées de vie obtenues pour les deux critères :

Pour comparer les valeurs des deux critères utilisés dans notre étude (critère de Crossland et le critère de Marin), nous comparons les durées de vie obtenues pour chaque état de contrainte.

Pour l'interprétation nous commentons un tableau qui comporte les durées de vie prédites de l'acier étudié pour l'état de contraintes multiaxiale.

Chargement		Nombre de cycles	
σ_m (MPa)	σ_a (MPa)	Crossland	Marin
140	120	2 512 163	342 146
140	130	241 038	216 133
140	135	142 218	175 514

Tableau III.6. Durées de vie prédites

III.16. Commentaire des résultats :

La comparaison est réalisée sur les valeurs de nombre cycles dans le domaine d'endurance limitée. Pour le premier cas de chargements (140, 120 MPa) on remarque que la durée de vie obtenue par le critère de Crossland (2 512 163 cycles) est largement supérieure à celle déterminée par le critère de Marin (342 146 cycles).

Dans le cas suivant (140, 130 MPa), le premier critère nous donne 241 038 cycles, valeur rapprochée par celle déterminée par le deuxième critère 216 133 cycles.

Dans le dernier cas (140 135 MPa) on constate que la durée de vie calculée par le critère de Marin (175 514 cycles) est supérieure par rapport à la valeur obtenue par Crossland (142 218 cycles), malgré une légère augmentation de la contrainte alternée.

On conclut que dans la structure étudiée, il y a des chargements où la durée de vie calculée par le critère de Crossland, est supérieure par rapport à celle déterminée par le critère de Marin. Si l'intensité de chargement augmente, le deuxième critère prévoit des valeurs importantes par au critère de Crossland.

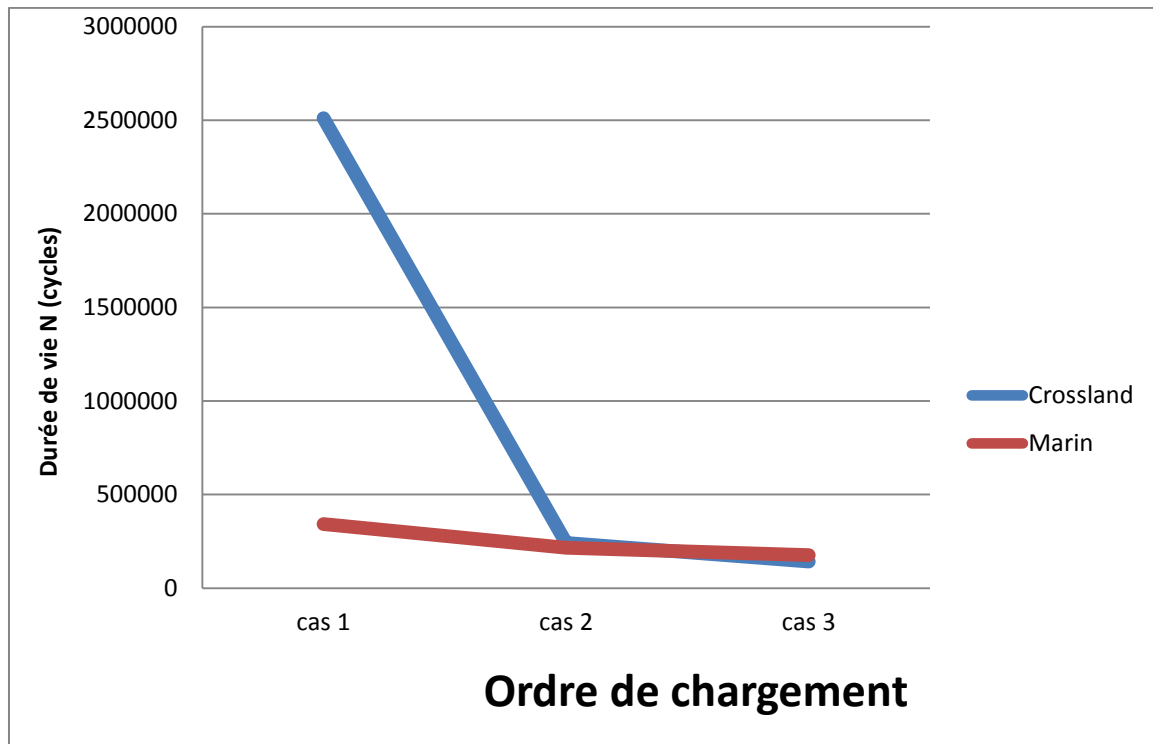


Figure III.10. Représentation graphique des durées de vie prédites par les deux critères de fatigue.

Conclusion générale

L'objectif principale de cette étude est de réaliser une comparaison entre deux critères de fatigue d'approche globale. Nous avons considéré une plaque de faible épaisseur présentant un trou au centre, de nuance SM 45C, dont les courbes de fatigue en torsion et flexion purement alternée sont connues. La simulation par la méthode des éléments finis via le code ANSYS, après introduction des conditions aux limites, nous a permis de déterminer la contrainte équivalente de chaque critère située au niveau de la zone critique de la pièce.

Les résultats obtenus et après comparaison, nous avons constaté ce qui suit :

- Les durées de vie calculées sont des valeurs appartenant au domaine d'endurance limitée.
- Les durées de vie déterminées par le critère de Crossland sont importantes par rapport aux celles calculées par le critère de Marin, pour un chargement donné.
- Si l'intensité de chargement augmente, cas de la contrainte alternée, on remarque que les valeurs de durée de vie calculées par le critère de Marin sont supérieures aux celles réalisées par celui de Crossland.

En perspective il sera très important d'enrichir cette étude, en traitant les points suivants :

- Etude des pièces réelles en appliquant notre démarche.
- Validation ces résultats avec des essais expérimentaux.
- Application d'une comparaison avec l'utilisation des critères de type plan critique.

Les références :

- ❖ [1] KAWTHER DRAOU et BOUMADIEN DJALTI « comparaison des différents critères de fatigue multiaxiale » mémoire de fin d'étude master académique Université Abdelhamid Ben Badais de Mostaganem en 2021
- ❖ [2] BENDOUBA Mostefa « Etude de la fatigue des structures sous l'effet d'un état de contraintes multiaxiales » Thèse de Doctorat en génie mécanique. Université Djilali Liabes de SIDIBEL-ABBES en 2013.
- ❖ [3] LARBAOUI ABDELHAQ et LADJAL HANDA « Etude de l'effet des défauts de forme sur la tenue à la fatigue des pièces mécaniques » mémoire de fin d'étude master académique Université Abdelhamid Ben Badais de Mostaganem en 2020.
- ❖ [4] ABDULKADER ZALT « Endommagement et prédiction de la durée de vie des joints soudés de type Caisson » Thèse de Doctorat en génie mécanique. Université de Lorraine en 2012.
- ❖ [5] BENKABOUCHE SALAH-EDDINE « Endommagement en fatigue multiaxiale des pièces traitées superficiellement » Thèse de Doctorat en génie mécanique. Université Abdelhamid Ben Badais de Mostaganem en 2016.
- ❖ [6] BENKHATTAB MOHAMED « Prise en compte des contraintes résiduelles et des déformations plastiques dans un critère de fatigue » Thèse de Magistère en génie mécanique. Université Abdelhamid Ben Badais de Mostaganem 2011.
- ❖ [7] MOHAMAD ABBADO « Fatigue polycyclique des structures métalliques : durée de vie sous chargements variables » Thèse de Doctorat en génie mécanique. Ecole Polytechnique en 2006.
- ❖ [8] MEDDOUR BELKACEM « Fatigue des matériaux et mécanique de rupture » Cour de 2^{ème} année master LMD constructions mécaniques. Université Abbas Laghour.
- ❖ [9] YOUSFI HICHEM « Etude expérimentale sur la Fatigue des Matériaux en Flexion Rotative » Thèse de Magistère en génie mécanique. Université de BATNA en 2013
- ❖ [10] Weber Bastien « Fatigue multiaxiale des structures industrielles sous chargement quelconque » Thèse de Doctorat en génie mécanique. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon en 1999

- ❖ [11] SHAIMA ABDEL-KHADER HAMZA « Effet des charges capacitives constantes et variables sur la durée de vie en fatigue d'un alliage d'acier à faible teneur en carbone »
Magazine de l'Université de Babylone Sciences pures et appliquées et sciences de l'ingénieur 2018