REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**




**F**aculté de **T**echnologie

# Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

---

# Étalonnage et mise en marche de la machine de fatigue

---

Présenté par

**Ell arbi ARAB**

**Ahmed SELMI**

Proposé et dirigé par

**Nasreddine AMOURA**

**Promotion 2019**

# Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier Allah, notre créateur,*

*Pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons à remercier*

***Monsieur Nasreddine AMOURA** notre encadreur,*

*et les membres du Jury qui évaluerons ce travail.*

*Nous remercions également*

*Tous les professeurs du département de Génie Mécanique.*

*Sans oublier de remercier*

*Toutes les personnes qui ont participé, de près*

*Ou de loin, à perfectionner notre formation,*

*Et à la réalisation de ce travail*

# Dédicaces

*Je tiens a remercié mes parents*

*Qu'ils trouvent, ici, l'expression de ma reconnaissance infinie*

*Je tiens à remercier Mes frères Nabil et Abd El hamide,*

*Ma sœur et son mari*

*Je tiens à remercier Ma fiancée ANEKA*

*Je tiens à remercier toute la famille*

*ARAB, KAIDI, ANEKA*

*Je tiens à remercier tous mes amis*

*Dans la faculté de technologies*

*ARAB Ell arbi*

# Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quel que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite

Et tout mon respect, mon cher père

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non âmes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse, mon adorable mère

A mes frères et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors

de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et

Encouragé tout au long de mon parcours.

A grand-mère et grand-père, mes oncles et tantes, Dieu Donner

Une vie longue et heureuse.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous mes amies dans la faculté de technologies

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

MERCI A VOUS TOUS !

*Ahmed*

# Résumés


**ملخص**

الهدف من هذه المذكرة هو تشغيل آلة التعب عن طريق الانحناء الدوراني التي تم إنجازها في الفترة 2017 -2018 كجزء من مذكرة نهاية الدراسات في الهندسة الميكانيكية. في الجزء الأول يتم تزويد الآلة بجهاز عد يعمل على حساب عدد دورات العينة إلى غاية انكسارها. في الجزء الثاني يتم إجراء اختبارات الكسر على عدة عينات اختبار، بمستويات تحميل مختلفة، لتحديد مدى موثوقية الالة.



الكلمات المفتاحية :التعب الدوراني، كسر، منحني اولر.



**Abstract**

The aim of this Master's degree project is the calibration and start-up of the rotary fatigue machine, build on during the 2017-2018 academic year, as part of an MDP in mechanical engineering. The first part of the project consists in fixing revolutions account device in order to be able to count the number of revolutions until breaking of the specimen. In the second part, fracture tests on several test samples, at different loading levels, are performed to decide for the reliability of the machine.



Key words: rotary fatigue, fracture, Wohler graph.



**Résumé**

L'objectif, de ce mémoire de fin d'études, est l'étalonnage et la mise en marche de la machine de fatigue rotative ,réalisée durant l'année universitaire 2017-2018, dans le cadre d'un PFE en construction mécanique. La première partie du projet consiste à fixer un dispositif de compte tours afin de pouvoir compter le nombre de révolution à rupture de l'éprouvette. Dans la seconde partie, des essais de rupture, sur plusieurs éprouvettes à des niveaux de chargement différents, sont accomplis pour décider de la fiabilité de la machine.



Mots Clé : fatigue rotative, rupture, Courbe Wöhler

# Sommaire

Remerciements....2
Dédicaces....3
Dédicaces....4
Résumés....5
Sommaire....6
Liste des figures....9
Liste des tableaux....11
Introduction générale....13
CHAPITRE I Généralités sur la fatigue....15
I.1 Introduction....16
I.2 Les différents mécanismes d'endommagement....17
I.3 Définitions....17
I.4 Les types de fatigue....18
I.5 Mécanisme de la fatigue....19
I.6 Paramètres d'influence en fatigue....23
I.6.1 Paramètres d'ordre métallurgique....23
I.6.2 Paramètres d'ordre mécanique et géométrique....24
I.7 Les lois d'endommagement de fatigue....26
I.7.1 Lois d'endommagements multiaxiales....27
I.7.2 Lois d'endommagement uni axiales....28
CHAPITRE II APPROCHE DE LA FATIGUE EN CONTRAINTES....32
II.1 Introduction....33
II.2 Généralités....34
II.3 Dommage par fatigue....35
II.4 Types d'excitations en fatigue....36

II.5 Diagramme d'endurance (courbe de Wöhler) ..... 39
II.5.1 Fatigue oligocyclique ..... 41
II.5.2 Zone d'endurance limitée ..... 41
II.5.3 Zone d'endurance illimitée ..... 41
II.6 Aspect statistique ..... 41
II.7 Lois de distribution de la résistance à la fatigue ..... 43
II.8 Représentation analytique de la courbe de Wöhler ..... 43
II.8.1 Relation de Wöhler ..... 43
II.8.2 Relation de Basquin ..... 44
II.9 Facteurs d'influence ..... 44
II.10 Estimation de la fatigue ..... 45
II.11 Développement du modelé analytique ..... 46
II.12 CONCLUSION ..... 47
CHAPITRE III Partie Expérimentale ..... 48
III.1 Introduction ..... 49
III.1.1 Description de la machine utilisée ..... 49
III.1.2 Principe de fonctionnement de la machine à flexion rotative ..... 50
III.1.3 Composants de la machine ..... 52
III.2 Réalisation des éprouvettes et choix du matériau ..... 53
III.2.1 Type d'éprouvettes utilisées ..... 53
III.2.2 Dimensions des éprouvettes ..... 53
III.2.3 Usinage des éprouvettes ..... 54
III.2.4 Choix du matériau ..... 54
III.3 Conduite des essais ..... 55
III.4 Traitement statistique des résultats ..... 56
III.5 Evaluation du seuil de rupture par fatigue ..... 60
III.6 Conclusion ..... 63

CONCLUSION GENERALE.....65

Références bibliographiques.....66

# Liste des figures

Figure I-1 Les paramètres impliqués dans la rupture d'une pièce. 16
Figure I-2 Différents sites d'amorçage de fissures. 20
Figure I-3 Stades I et II de la fissuration par fatigue. 20
Figure I-4 Rupture par fatigue rotative d'un arbre en acier et rond à béton HA Fe 50. 21
Figure I-5 Aspect schématique d'une surface de rupture par fatigue 23
Figure I-6 Cumul non linéaire. 30
Figure II-1 Allure générale d'une courbe S-N avec différents niveaux de dispersions. 34
Figure II-2 Cycle contrainte-déformation du phénomène de fatigue. 35
Figure II-3 Contraintes alternées symétriques $R=-1$. 38
Figure II-4 Contraintes alternées dissymétriques $-1<R<0$. 38
Figure II-5 Contraintes répétée $R$=0. 38
Figure II-6 Contraintes ondulées $R>0$. 38
Figure II-7 Allure générale d'une courbe de Wöhler. 39
Figure II-8 Courbe de Wöhler pour l'acier [2]. 40
Figure II-9 Courbes de Wöhler à iso probabilité. 42
Figure II-10 Signification du paramètre b de la relation de Basquin. 44
Figure III-1 La machine de fatigue par flexion rotative. 50
Figure III-2 Flexion rotative d'une éprouvette cylindrique 50
Figure III-3 Montages possibles en flexion rotative. 51
Figure III-4Vue d'ensemble de la machine. 52
Figure III-5 Eprouvette cylindrique. 53
Figure III-6 Dimensions des éprouvettes. 53
Figure III-7 Représentation graphique des résultats. 56
Figure III-8 Densité de probabilité d'une loi normale. 57
Figure III-9 Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite. 58
Figure III-10 Approximation de la courbe S-N par l'équation de Basquin (Eqn. 2.9) pour une défaillance de 50%. 59
Figure III-11 Approximation de la courbe S-N par l'équation de Basquin (Eqn. 2.9) pour une défaillance de 80%. 59

Figure III-12 Approximation de la courbe S-N par l'équation de Basquin (Eqn. 2.9) pour une défaillance de 90%. ..... 60
Figure III-13 Description qualitative du coefficient de finition de la surface. ..... 61
Figure III-14 Description qualitative du coefficient de taille du spécimen. ..... 62

# Liste des tableaux

Tableau 1 :Propriétés mécaniques de la nuance d'acier utilisé . .....55
Tableau 2 : Nombre de cycles à rupture obtenus pour cinq niveau de la contrainte. .....55
Tableau 3 : Nombre de cycles à rupture pour trois niveaux de défaillances en utilisant des fonctions de répartition gaussiennes. .....58
Tableau 4 :Coefficients de la relation de Basquin pour le lissage des courbes S-N. .....60
Tableau 5 : Valeurs du coefficient $C_L$ selon le type de chargement. .....61
Tableau 6 : Valeurs du coefficient $C_R$ selon la fiabilité .....62
Tableau 7 : Estimations des seuils de fatigue en flexion de base pour divers matériaux. ...62
Tableau 8 Estimation des seuils de fatigue selon différents niveaux de défaillance. .....63

# Introduction Générale

# Introduction générale

Une lecture attentive des pièces cassées dans presque tous les rebuts montrera qu'un grand nombre de défaillances surviennent à des contraintes inférieures à la limite d'élasticité du matériau de la pièce. Ce phénomène complexe est appelé « fatigue ». La fatigue est responsable de plus de 90% des défaillances de pièces en service survenues dans l'industrie.

Au 19ème siècle, il était considéré mystérieux qu'une rupture par fatigue ne présentait pas de déformation plastique visible, ce qui laissait à penser, à tort, que la fatigue n'était qu'un problème technique. Eh bien, ils ne se trompaient pas puisque la puissance des équipements microscopiques de cette époque était assez limitée. De plus, au cours de ce siècle, peu de tests de fatigue ont été effectués par des chercheurs notables; August Wöhler a été le plus populaire. Il a ensuite évoqué l'idée de la courbe contrainte-durée de vie (courbe S-N).

Une avancée majeure dans la compréhension du processus de rupture par fatigue a eu lieu au 20ème siècle. Grâce à des outils plus puissants tels que l'ordinateur, le microscope électronique, des méthodes d'analyse numérique avancées et bien d'autres travaux de recherche (John Mann a compilé plus de 21000 sources documentaires sur les problèmes de fatigue couvrant la période de 1838 à 1969 dans quatre livres.), la fatigue a commencé à ne plus être perçue comme un problème d'ingénierie, mais aussi bien en termes de matériaux et de conception.

Malgré les nombreuses recherches effectuées sur la défaillance en fatigue, sa nature reste inconnue et des dommages, des fissures, voire une défaillance totale due aux charges cycliques sont constamment signalés. Si le problème persiste après 100 ans de recherche au siècle précédent, il y a quelque chose à expliquer.

Le développement de nouveaux matériaux nécessite la connaissance de leurs propriétés mécaniques. En plus des paramètres classiques, tels que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'écoulement ou la résistance ultime, déterminer sa courbe S-N ou son seuil de fatigue est une nécessité si le matériau est destiné à un chargement dynamique. Ce qui nous oblige à faire un passage par le laboratoire des essais mécaniques.

Au cours de l'année universitaire 2017-2018, et dans le cadre d'un projet de fin d'études de master, une machine de fatigue rotative fut conçue et réalisée sans que les étudiants n'aient pu faire les tests nécessaires pour son étalonnage. D'où le thème du présent mémoire de PFE.

Afin d'atteindre cet objectif, le manuscrit a été répartie en trois chapitres précédés par une introduction et clôturés par une conclusion.

Le premier chapitre donne un aperçu de l'endommagement par fatigue, en passant en revue les paramètres d'influences et les lois d'endommagement par fatigue. Le second chapitre est une approche de la fatigue par les contraintes. On y défini les types d'excitations, l'aspect statistique du digramme d'endurance et les approches analytiques des courbes de fatigue. Le dernier chapitre, qui constitue l'essentiel de ce projet de fin d'études, s'intéresse à décrire la partie expérimentale, où il est question de montrer la fiabilité de la machine en y effectuant une série de tests de rupture dont les résultats sont le tracé de la courbe S-N du matériau choisi et la détermination de son seuil de fatigue.

# CHAPITRE I **Généralités sur la fatigue**

# I.1 Introduction

Les matériaux soumis à des charges *fluctuantes* ou *répétées*, tendent à prendre un comportement caractéristique, qui diffère essentiellement de leur comportement sous charge permanente.

Ce comportement est appelé *fatigue* et il se caractérise par trois particularités principales : perte de résistance, perte de plasticité et augmentation de l'incertitude, aussi bien sur la résistance que sur la longévité en service. Toutes trois dérivent de la même source « *le défaut d'homogénéité des matériaux réels* ». [1]

Tous les matériaux, même les cristaux les plus parfaits, sont remplis d'imperfections de diverses sortes, de sorte qu'aucun matériau n'est parfaitement homogène.

La fatigue est un mode important de comportement de tous les matériaux, des types les plus différents, comme les métaux, les plastiques, le caoutchouc et le béton.

Toutes les pièces tournantes des machines sont soumises à des contraintes alternées ; et comme on emploie depuis toujours les métaux dans la majorité des pièces mobiles, il est naturel qu'on ait rencontré en premier lieu la fatigue dans les métaux. La plupart des recherches ont par conséquent porté sur la fatigue des métaux.

La Figure I-1 présente les différents paramètres impliqués dans la rupture d'une pièce.

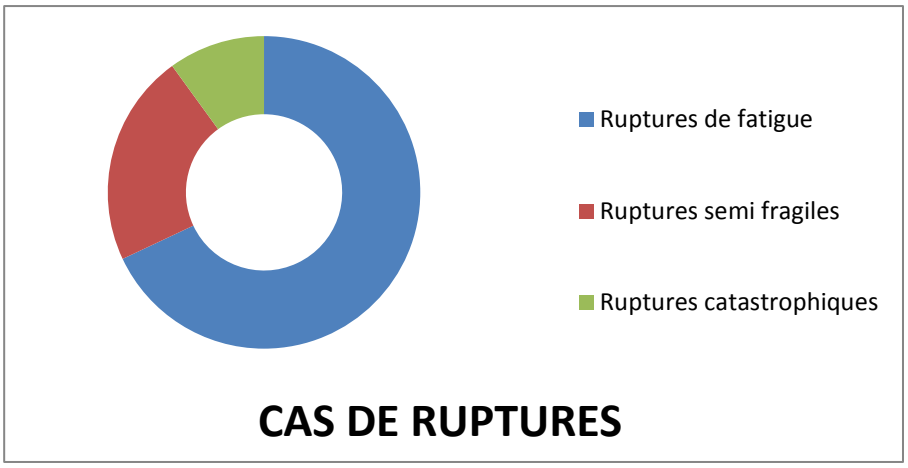



Figure I-1 Les paramètres impliqués dans la rupture d'une pièce.

## I.2 Les différents mécanismes d'endommagement

La théorie de l'endommagement décrit l'évolution des phénomènes de dégradation de la pièce entre l'état vierge jusqu'à la rupture, cette évolution est due à plusieurs mécanismes :

- **L'endommagement plastique ductile**

Il accompagne les grandes déformations plastiques des métaux aux températures ambiantes et peu élevées [2].

- **L'endommagement viscoplastique fragile (ou de fluage)**

Fonction du temps qui, pour les métaux aux températures moyennes et élevées, correspond aux décohésions inter-granulaires accompagnent les déformations viscoplastiques [2].

- **L'endommagement macro-fragile**

Qui peut être provoqué par des sollicitations monotones sans déformation irréversibles appréciables [2].

- **L'endommagement de fatigue**

La détérioration provoquée par la fatigue consiste avant tout en formation de fissures dans le matériau dû à la répétition des contraintes.

L'endommagement par fatigue comprend trois périodes :

a- Période de germination.
b- Période de propagation
c- Rupture brutale.

## I.3 Définitions

- **Endommagement mécanique**

D'après J. Lemaître [3.4], l'endommagement est le processus physique par lequel les matériaux se fracturent. La mécanique de l'endommagement est l'étude, à travers de variables mécaniques, des mécanismes impliqués dans la détérioration sous charge des matériaux. À la micro échelle, c'est l'accumulation de micro efforts dans le voisinage de

défauts ou interfaces. À la méso échelle, c'est la croissance et la coalescence des microfissures et microcavités. À l'échelle macro, c'est la croissance de fissures.

- **Fatigue**

Les standards ASTM, contiennent la définition suivante de la fatigue : « Terme général, employé pour désigner le comportement des matériaux sous des cycles répétés de contrainte ou de déformation, qui causent une détérioration de la matière, d'où résulte une rupture progressive ».

La fatigue est la détérioration progressive d'une structure par fissuration pouvant conduire à la rupture, cette structure étant soumise à des sollicitations variables vérifiant néanmoins les critères de résistances pratiques.

Décroissance de la résistance du matériau aux actions variables (cycliques) avec le temps.

- **Limite de fatigue**

Pour une contrainte moyenne donnée, la limite de fatigue est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas constaté de rupture après un nombre infini de cycles N [1].

- **Endurance**

La capacité de résistance à la fatigue des pièces et des assemblages [3].

- **Limite d'endurance ou Durée de vie**

Pour une contrainte moyenne donnée, la limite d'endurance est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle on constate 50% de rupture après un nombre fini N de cycles [1].

- **Durée de vie ou endurance en fatigue**

Le nombre de cycle de contrainte N nécessaire pour que l'éprouvette ou la pièce se rompe pour N cycle de contrainte $(\sigma_a, \sigma_m)$. Ces valeurs peuvent être déterminées à l'aide de méthodes statistiques.

## I.4 Les types de fatigue

La rupture par fatigue peut être provoquée par plusieurs processus.

Parmi ces processus :

- **Fatigue-fluage**

L'endommagement causé par des charges cycliques appliquées à des températures élevées par rapport à la température de fusion du matériau.

- **Fatigue thermique**

Les variations de température au cours du temps engendrent également des sollicitations thermiques responsables du phénomène de fatigue thermique.

- **Fatigue thermomécanique**

Lorsque la température et la sollicitation mécanique extérieure varient au cours du temps.

- **La fatigue sous corrosion**

Lorsque les sollicitations répétées sont en présence d'un milieu corrosif.

- **Fretting-fatigue**

Résulte de contraintes engendrées aux interfaces par le mouvement relatif de deux solides.

## I.5 Mécanisme de la fatigue

Deux conditions sont nécessaires à la formation d'une fissuration progressive. Il faut d'une part que les sollicitations soient de caractère cyclique et d'autre part que le niveau des contraintes dépasse, au moins au point le plus sollicité de la pièce, certain seuil fonction du nombre de cycles supportés. Ce phénomène peut être observé sur les matériaux les plus variés qu'ils soient de haute qualité ou de qualité médiocre.
L'endommagement passe par trois étapes :

- **L'amorçage**

La définition de l'amorçage d'une fissure reste l'une des principales difficultés. Celle-ci peut en fait être différente selon que l'on s'intéresse à l'évolution microstructurale du matériau ou que l'on considère l'apparition d'une microfissure.
Cette phase (Figure I-2) s'initie le plus souvent à la surface de la pièce à partir de bandes de glissement persistantes ou au droit d'inclusions, formant des microfissures et se propagent. Ces microfissures cheminent à travers quelques grains suivant des directions cristallographiques.

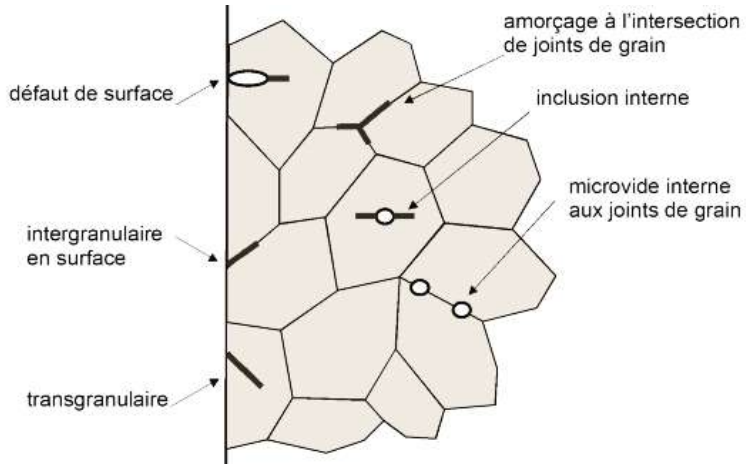



Figure I-2 Différents sites d'amorçage de fissures.[5]

- **Propagation de fissure en fatigue**

Les fissures en fatigue s'amorcent généralement à la surface du matériau, en un ou plusieurs endroits. La propagation est souvent trans-granulaire dans une direction cristallographique définie, même lorsque l'amorçage est inter-granulaire. C'est le stade I représenté sur la figure I.3 (état de contraintes planes). Il est suivi du stade II au cours duquel la fissure quitte le plan de scission maximale pour se propager dans le plan de contrainte normale majeure, c'est-à-dire perpendiculaire à la contrainte principale maximale. La surface fissurée dans le stade I est très limitée par rapport à la surface totale de rupture bien que ce stade présente une durée de vie importante (Figure I-4). Dans plusieurs cas, la fissure peut s'amorcer directement en stade II sans passer par le stade I.

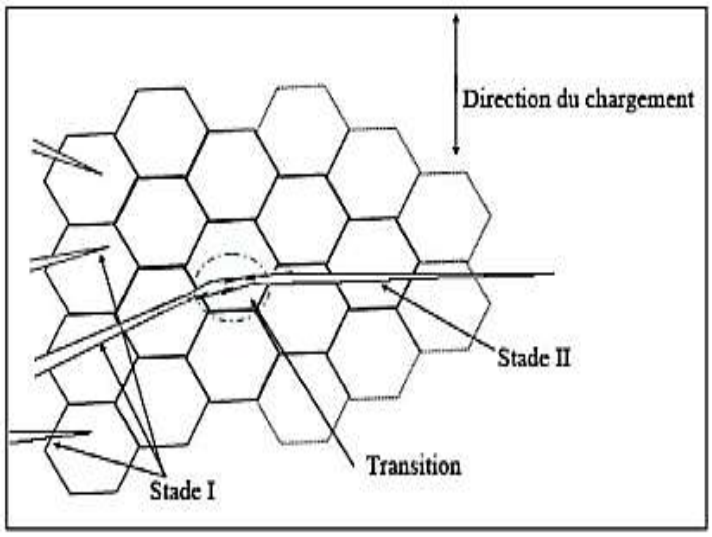



Figure I-3 Stades I et II de la fissuration par fatigue.

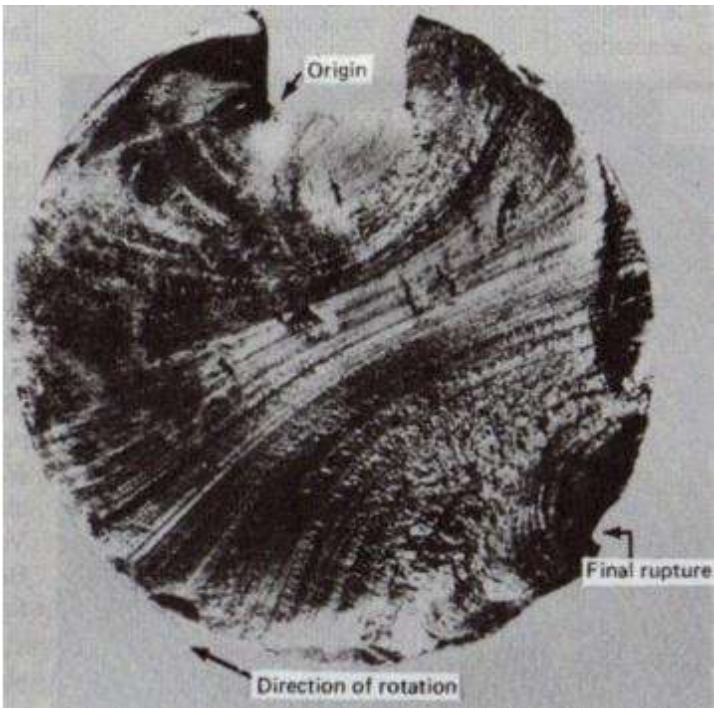





Figure I-4 Rupture par fatigue rotative d'un arbre en acier et rond à béton HA Fe 50.

- **Rupture brutale**

Le développement des fissures diminue la section soumise aux sollicitations, ce qui provoque la rupture de la pièce.

- **Morphologie d'une surface de rupture**

L'examen macroscopique de la surface de rupture d'une pièce rompue par fatigue fait ressortir généralement trois zones schématisées sur la Figure I-5. Ces différentes zones apparaissent plus ou moins distinctement suivant le mode de sollicitation, la géométrie de la pièce et le degré de corrosion.

Le site d'amorçage : est généralement identifiable par la présence de lignes de rivière notées R sur la Figure I-5 et convergeant vers un même point P de la surface de rupture. Cette surface est composée de deux zones distinctes et notées A et B.

La zone A, d'aspect lisse et plus ou moins mat, correspond à la phase de propagation stable et se caractérise souvent par la présence de lignes concentriques, comparables aux marques laissées sur le sable par la mer et correspondant à des lignes d'arrêt de la fissure. Ces lignes permettent, lors d'expertises, de retracer l'historique de la propagation au travers des contrastes générés par les différences de vitesses de propagation et les phases d'arrêt.

Lorsque plusieurs fissures s'amorcent simultanément, le front de fissure revêt un aspect plus rectiligne.

Au cours de la propagation, la concavité du front de fissure peut évoluer et d'autres lignes de rivière, convergeant vers la zone de rupture finale, peuvent apparaître. Enfin, la zone de rupture finale, représentée par la surface B sur la Figure I-5, se distingue par un aspect plus brillant et granuleux suivant les matériaux.

La transition entre les deux zones est souvent caractérisée par l'apparition de lèvres de cisaillement [5].

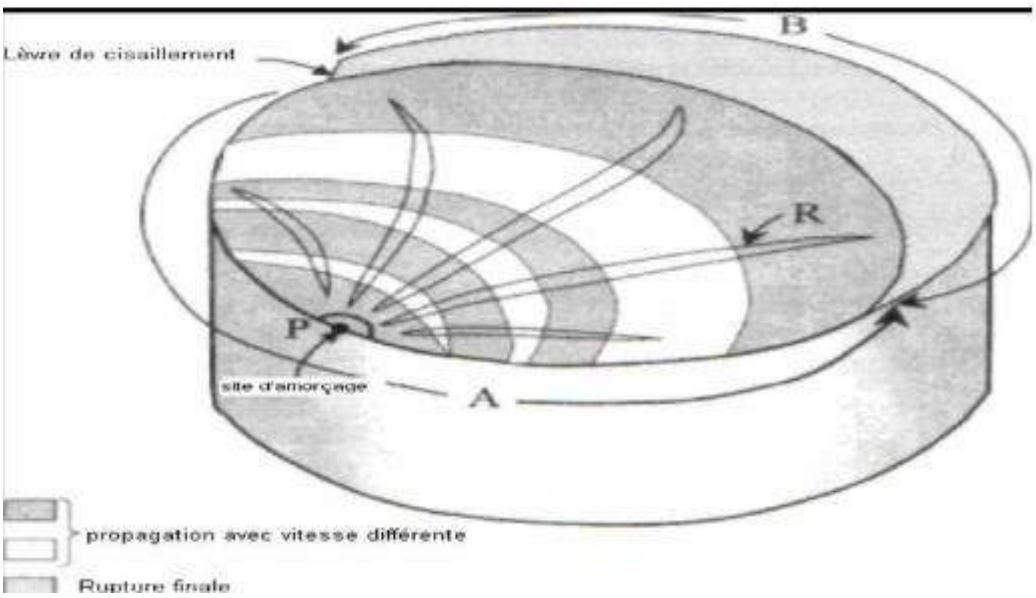



Figure I-5 Aspect schématique d'une surface de rupture par fatigue [5].

# I.6 Paramètres d'influence en fatigue

## I.6.1 Paramètres d'ordre métallurgique

- ***Taille des grains***

Les structures à grains fins présentent une meilleure tenue en fatigue que les structures à gros grains

- ***Orientation du fibrage par rapport à la direction des efforts***

L'orientation générale des grains (fibrage) confère au matériau une anisotropie plus ou moins marquée. Les caractéristiques statiques et la tenue en fatigue seront meilleures dans le sens long du fibrage que dans les autres sens (travers long et travers court).

- ***Taux d'écrouissage***

L'écrouissage résultant des opérations de formage a pour effet de consolider le matériau (augmentation de la limite d'élasticité), et par suite, améliore la tenue en fatigue.

- ***Traitement thermique***

Suivant que le traitement thermique provoque un adoucissement ou un durcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

- ***Santé métallurgique de l'alliage***

Les défauts métallurgiques (lacunes, défauts interstitiels, précipités, inclusions) peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue. Par incompatibilité des déformations, ils provoquent des concentrations de contraintes locales. L'abattement de durée de vie dépendra de leurs quantités, taille, nature, répartition, orientation par rapport aux efforts.

## I.6.2 Paramètres d'ordre mécanique et géométrique

- ***Nature du chargement***

Le chargement cyclique peut être à amplitude constante ou variable (et même aléatoire, spectre). Dans le cas des chargements à amplitude constante, les paramètres prépondérants sont :

- La forme du signal : un signal de type carré est plus pénalisant que celui de type sinusoïdal ;
- Le rapport R (rapport entre la valeur minimale et la valeur maximale du chargement). A contrainte maximale constante, si R augmente, la durée de vie augmente ;
- La contrainte moyenne : à amplitude de chargement constante, si la contrainte moyenne augmente, la durée de vie diminue.

La période du signal a en général peu d'influence sur la durée de vie pour les métaux. Cette règle est infirmée quand le phénomène de fatigue est associé à d'autres modes d'endommagement fonction du temps : fatigue-corrosion, fatigue-fluage, ou lorsque la rapidité des sollicitations produit un échauffement.

Dans le cas des chargements variables, les paramètres prépondérants sont :

• la présence de surcharges : la répétition périodique d'une surcharge peut retarder la propagation de fissures ;

• l'ordre d'apparition des cycles.

- ***Accidents de forme (discontinuité dans la géométrie : entailles, trous, etc...)***

Un accident de forme augmente localement le niveau de contrainte. Cette augmentation peut être traduite par un coefficient de contrainte élastique $K_t$ : rapport entre la contrainte locale maximale et la contrainte nominale. Dans le domaine d'endurance limité (domaine visé par l'industrie aéronautique), si la valeur de $K_t$ augmente, la durée de vie diminue.

Tout changement de section entraîne une réduction de la durée de vie pour une amplitude donnée de la contrainte cyclique.

- ***Effet d'échelle***

A niveau de contrainte égal, deux pièces de même géométrie mais de dimensions différentes n'auront pas la même tenue en fatigue : plus les dimensions d'une pièce croissent, plus sa résistance à la fatigue diminue. Cette observation s'explique principalement par le volume de matière sollicité : plus celui-ci est grand, plus la probabilité d'avoir des défauts métallurgiques est grande. ***Weibull*** en a donné une interprétation phénoménologique. Z.Bazant a ensuite apporté une explication quantitative grâce à la mécanique de la rupture.

- ***Qualité de l'usinage***

Généralement, l'endommagement par fatigue apparaît en premier lieu à la surface des pièces. La prise en compte des deux aspects suivants améliore la tenue en fatigue.

- L'aspect micro géométrie de la surface : un mauvais usinage provoque en surface des microreliefs susceptibles d'augmenter localement le niveau de contrainte ; l'amorçage des fissures en surface est donc retardé lorsque la rugosité est faible ;
- L'aspect contraintes résiduelles : l'usinage peut introduire des contraintes résiduelles de traction en surface (elles sont équilibrées en profondeur par des contraintes résiduelles de compression) ; ces contraintes se superposant à celles du chargement accélèrent l'endommagement par fatigue.

- ***Effet de l'état de surface***

La rugosité de la surface est toujours accompagnée d'une diminution de la résistance à la fatigue. Cet effet est comparable à celui provoqué par des micro-entailles.

- ***Effet de l'environnement***

Un milieu agressif (températures élevées, milieux corrosifs...) aggrave le phénomène de fatigue. Il apparaît des phénomènes nouveaux comme le fluage ou la corrosion. Leur action est liée au temps d'exposition.

## I.7 Les lois d'endommagement de fatigue

La théorie de l'endommagement, a pour objet de décrire l'évolution des phénomènes entre l'état vierge (matériau dépourvu de fissures ou de cavités à l'échelle microscopique) et l'amorçage de la fissure macroscopique. Le stade final de l'endommagement correspond à la rupture de l'élément, c'est à dire à l'existence d'une fissure macroscopique de la taille de cet élément (de 0.1 à 1 mm pour les métaux). Au de là, c'est le domaine de la fissuration.

Seul l'endommagement de fatigue, c'est à dire l'endommagement dû à la répétition des sollicitations, est abordé dans ce travail de thèse.

Les modifications des caractéristiques mécaniques d'un élément peuvent être interprétées en termes de variable d'endommagement. Les paramètres de dommage sont nombreux et leur choix est souvent lié au domaine dans lequel s'effectue l'étude en fatigue.

On peut citer :

- La mesure de la plasticité dans le cas de la fatigue à faible nombre de cycles (fatigue oligocyclique), qui correspond à un nombre de cycles à rupture (Nr) inférieur à 50000. Les déformations plastiques interviennent alors de manière prépondérante.
- La variation de la limite d'endurance pour les grands nombres de cycles (Nr>50000). Les déformations sont alors quasi élastiques. Lorsque $Nr>10^7$, on considère que la durée de vie est illimitée, c'est à dire que les sollicitations sont inférieures à la limite d'endurance.

Les paramètres de dommage, les plus fréquemment rencontrés dans la bibliographie, sont :

- La fraction de vie (utilisée par exemple dans la loi linéaire d'endommagement de Miner)
- La section effective (Rabotnov - Lemaitre - Chaboche).
- La déformation plastique cumulée (Papadopoulos, Morel).
- L'énergie de déformation (Ellyin).

Le cas le plus général de sollicitations pouvant être imposées à un système mécanique est un chargement multiaxial aléatoire. Les sollicitations uniaxiales aléatoires forment un cas particulier de ce cas général. Les lois d'endommagement peuvent être classées suivant deux catégories :

- La première regroupe les lois d'endommagement ne pouvant être utilisées que dans le cas de, sollicitations uniaxiales. Elles sont appelées lois d'endommagement uni axiales.
- La seconde englobe l'ensemble des lois d'endommagement applicables dans le cas de sollicitations multiaxiales. Elles sont appelées lois d'endommagement multiaxiales.

## I.7.1 Lois d'endommagements multiaxiales

Deux approches sont possibles :

- La première consiste à coupler une loi d'endommagement uni axiale et un critère de fatigue multiaxiale.
- La seconde, comme pour les lois d'endommagement uni axiales, repose sur le choix d'un ou plusieurs paramètres de dommage dont il faut suivre l'évolution au cours du chargement :

- ***Par couplage*** **(**Cette méthode est basée sur le couplage d'une loi d'endommagement uni axiale et d'un critère de fatigue multiaxiale)
- ***Par choix d'une variable*** (Loi de Papadopoulos, Loi d'ELLYIN)

## I.7.2 Lois d'endommagement uni axiales

### I.7.2.1 Loi de Palm green-Miner

Cette loi est sans aucun doute la plus connue et la plus utilisée en bureau d'étude, du fait de sa simplicité. Elle suppose que le dommage se cumule de manière linéaire. Le paramètre de dommage retenu dans cette formulation est la fraction de vie définie par :

$$\sum_i \frac{N_i}{N_{ri}} = 1 \qquad \text{(I.1)}$$

où $N_i$ est le nombre de cycles effectués avec un chargement donné pour lequel le nombre de cycles à rupture serait $N_{ri}$, La condition de rupture s'écrit :

$$\sum_i D_i = 1 \;\Leftrightarrow\; \sum_i \frac{N_i}{N_{ri}} = 1 \qquad \text{(I.2)}$$

Cette loi rend bien compte du fait que les niveaux de contraintes inférieurs à la limite d'endurance sont supposés non endommageant.

Le dommage induit par un cycle de sollicitation est donc fonction de la durée de vie $N_{ri}$ du matériau pour le cycle en question. Une évaluation de cette quantité peut être obtenue à partir de la connaissance de la courbe de ***Wöhler (ou courbe S-N)*** relative aux conditions de chargement.

Cette courbe représente la contrainte dynamique $\sigma_a$ (contrainte maximale, contrainte minimale ou encore amplitude de contrainte), en fonction du nombre de cycles *N* à rupture (reporté sur une échelle logarithmique), pour une contrainte moyenne $\sigma_m$ fixée.

### I.7.2.2 Loi de Lemaitre-Chaboche

Cette loi repose sur les notions de fraction de vie $\frac{N_i}{N_{ri}}$ et de contrainte effective $\sigma_{eff}$ introduite par Rabotnov.

Par définition

$$D_n = \frac{s_D}{s} \tag{I.3}$$

$S$ : aire d'une section d'un élément de volume endommagé de normale $\vec{n}$

$S_D$ : aire totale des traces des défauts (microcavités, microfissures). $D_n$ : permet de mesurer mécaniquement l'endommagement local relatif à la direction $\vec{n}$

La contrainte effective représente la contrainte rapportée à la section qui résiste effectivement aux efforts. Dans le cas d'un endommagement isotrope (c'est-à-dire : $D = D_n$ pour tout $\vec{n}$), elle est définie par :

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma}{1-D} \tag{I.4}$$

L'expérience montre que les courbes d'évolution du dommage en fonction du paramètre d'endommagement $\frac{N_i}{N_{ri}}$ peuvent dépendre du niveau de sollicitation imposée. Il n'y a donc pas de cumul linéaire du dommage. La Figure I-6 permet d'illustrer ces propos. Elle est relative à un essai de fatigue à deux niveaux de contrainte.

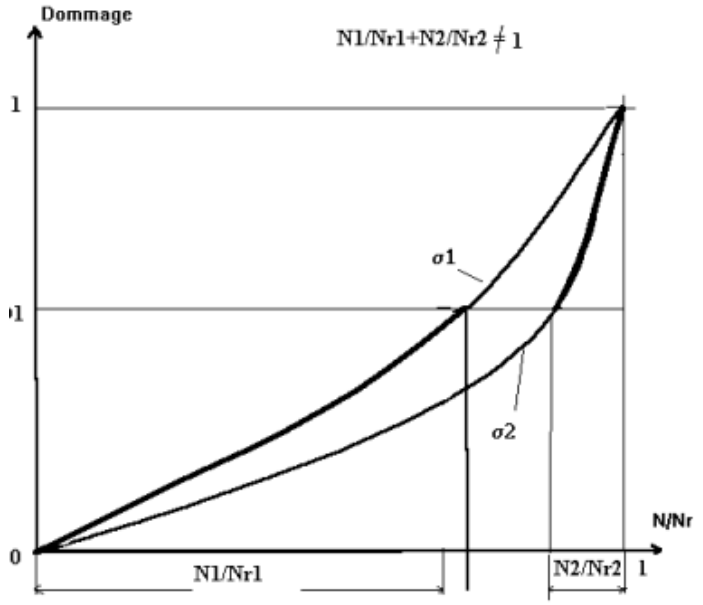



Figure I-6 Cumul non linéaire.

On constate à la vue de cette courbe que le cumul du dommage n'est pas linéaire. En effet on a :

$$\sum_i \frac{N_i}{N_{ri}} = \frac{N_1}{N_{r1}} + \frac{N_2}{N_{r2}} \neq 1 \qquad \text{(I.5)}$$

Une façon simple de rendre compte de cette remarque dans la formulation de l'évolution du dommage consiste à rendre non séparables les variables de chargement et la variable de dommage. Les auteurs ont proposé l'expression suivante :

$$dD = \left[1-(1-D)^{\beta+1}\right]^{\alpha} \left[\frac{\sigma_\alpha}{M_0\left(1-b\sigma_m\right)\left(1-D\right)}\right]^{\beta} dN \qquad \text{(I.6)}$$

*D :* est le dommage représentant l'état actuel du matériau.

d*D :* est l'accroissement de dommage dû à dN.

$\sigma_\alpha$ : est l'amplitude de contrainte du cycle.

$\sigma_m$ : est la contrainte moyenne du cycle.

$\beta$, $M_0$ et *b* sont des constantes liées au matériau.

$\alpha$ est un paramètre dépendant des caractéristiques de chargement ainsi que du matériau.

L'évolution du dommage est donc non seulement fonction de l'état de contrainte appliquée, mais aussi de l'état de dommage de la structure étudiée. Ceci permet de rendre compte de l'historique de chargement.

La loi d'endommagement de LEMAITRE-CHABOCHE permet de rendre compte du comportement d'un matériau d'une manière plus correcte que la loi de MINER mais est beaucoup moins pratique pour les bureaux d'études car plus difficile à mettre en œuvre.

# CHAPITRE II **APPROCHE DE LA FATIGUE EN CONTRAINTES**

# II.1 Introduction

Durant la moitié des années 80, on a réalisé que les composants mécaniques et les structures se rompent souvent par fissuration quand ils sont soumis à un chargement cyclique (répété), bien que l'amplitude de ce chargement soit bien au-dessous de la limite critique du chargement monotone. Les premières investigations ont concerné les ruptures des arbres et des ponts qui se produisaient à un chargement cyclique dont l'amplitude est inférieure à 50% du chargement monotone critique. La rupture sous chargement répété avait été appelée « La rupture par fatigue ».

Les premières études en fatigue ont tenté de déterminer la durée de vie des structures en termes de grandeurs globales mesurables (tels que la contrainte, la déformation, la contrainte moyenne, etc.) sans tenir compte du mode mis en jeu ni de l'existence ou de la propagation d'imperfections initiales dans le matériau.

Les résultats des tests faits en laboratoires sur des éprouvettes soumises à un chargement cyclique sinusoïdal, étaient tracés sur des graphes donnant l'amplitude de la contrainte appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture, connus sous l'appellation de courbes S-N. La durée de vie en fatigue augmentait au fur et à mesure que le chargement diminuait, et sous un certain niveau de chargement, appelé *seuil de fatigue*, la rupture ne se produisait pas même si le nombre de cycles est très grand. Le niveau de la contrainte moyenne, définie comme la moyenne entre les contraintes maximale et minimale du chargement, est un autre paramètre important dans la détermination de la durée de vie en fatigue. Il a été montré que la durée de vie diminuait lorsqu'on augmentait la contrainte moyenne pour un niveau donné de la contrainte maximale. Un certain nombre de relations empiriques, pour le calcul de la durée de vie en fatigue, ont été développées par lissage des courbes S-N expérimentales.

## II.2 Généralités

La fatigue est la modification des propriétés des matériaux sous des efforts ou des déformations variables et répètes. Elle correspond à une succession de phénomènes néfastes et complexes : évolutions métallurgiques, endommagement physique, écrouissage, détérioration locale du matériau, etc. Ce qui entraine, en premier lieu, l'apparition de microfissures, généralement localisées au niveau des surfaces, et en seconde étape, une progression de microfissures aboutissant à la rupture finale de la structure.

Les essais de fatigue sont généralement réalisés sur des éprouvettes. Elles sont soumises à des sollicitations uni-axiales pour différents niveaux de contrainte. On obtient, ainsi, la courbe donnant l'évolution de l'amplitude de la contrainte en fonction du nombre des cycles. Cette Courbe est dite courbe S-N (Stress-Number of cycles) ou courbe de ***Wöhler***. Elle est divisée en trois zones : (i) zone de fatigue oligocyclique, (ii) zone de fatigue à durée de vie limitée et (iii) zone de fatigue polycyclique (ou à grand nombre de cycle). On observe, pour plusieurs matériaux, que la courbe S-N présente une asymptote horizontale lorsque le nombre de cycles tend vers l'infini, permettant de déterminer la limite d'endurance du matériau étudie [2-4]

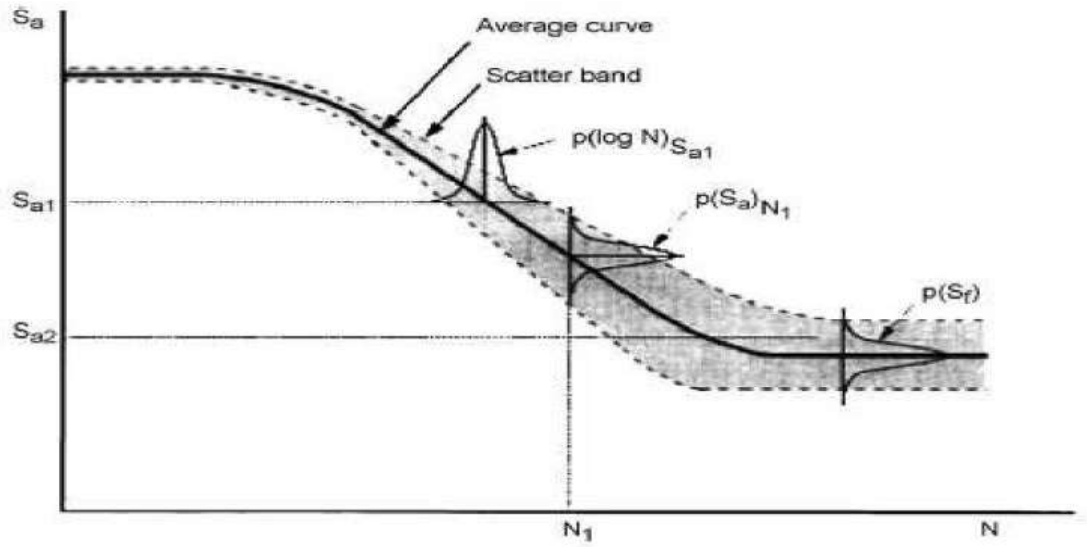



Figure II-1 Allure générale d'une courbe S-N avec différents niveaux de dispersions.

Les résultats des essais de fatigue sont caractérisés par une dispersion très importante (Figure II-1). Cet effet est encore plus net dans la zone de fatigue polycyclique (c'est-à-dire au voisinage de la limite d'endurance) [4].

Les résultats obtenus, généralement sur les courbes S-N, montrent des dispersions significatives qui sont expliquées, d'une part, par des sources physiques internes au matériau (défauts, inclusions, hétérogénéités) et liées à la préparation des éprouvettes et, d'autre part, par des sources extérieures à l'éprouvette à savoir les conditions expérimentales. Il est à noter dans ce cadre, que les sources physiques liées au matériau, souvent très importantes, sont plus difficiles à étudier et à maitriser.

## II.3 Dommage par fatigue

On appelle dommage par fatigue la modification des caractéristiques d'un matériau, tenant essentiellement à la formation de fissures et résultant de l'application répétée de cycle de contraintes, en dessous de la limite élastique du matériau et relativement faible. La fatigue engendrée par les chocs et les vibrations ne sera pas approchée dans cette étude.

Le phénomène de fatigue débute par une déformation plastique des défauts macroscopiques (inclusion, microfissures). Lors de sollicitations répétées, d'intensité plus ou moins importantes, ces défauts se transforment en fissures de plus en plus importantes jusqu'à la rupture de la pièce.

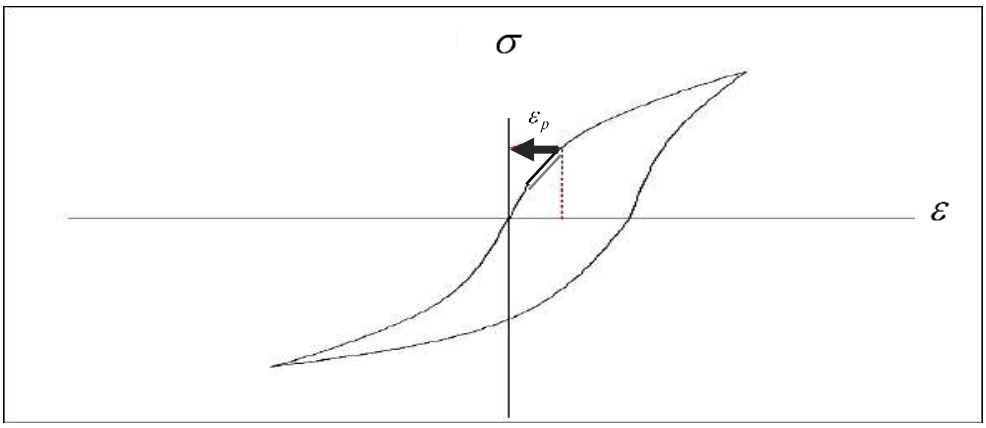



Figure II-2 Cycle contrainte-déformation du phénomène de fatigue.

Si l'on trace le cycle contrainte- déformation, la boucle d'hystérésis ainsi obtenue est une courbe non fermée dont la forme évolue en fonction du nombre de cycles appliqués. Chaque cycle de contrainte produit un certain dommage et la succession des cycles se traduit par un effet cumulatif.

L'endommagement s'accompagne de modification des propriétés mécaniques et en particulier d'une diminution de la résistance mécanique à la traction $R_m$.

Le dommage peut-être caractérisé par :

- L'évolution d'une fissure l'absorption d'énergie de déformation plastique.
- La diminution de la résistance mécanique à la traction Rm.
- La réduction de la limite de la résistance à la fatigue, jusqu'à la valeur critique correspondant à la rupture.
- La variation de la déformation plastique qui augmente avec le nombre de cycles.

## II.4 Types d'excitations en fatigue

Le type de chargement en fatigue est généralement défini par la contrainte moyenne $\sigma_m$ , qui peut être positive, négative ou nulle, et par une composante variable de la contrainte $\sigma$ mais pas forcément sinusoïdale. En effet, elle peut être aussi périodique ou aléatoire comme le cas de la suspension automobile, et par le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale R. Plusieurs types d'essais de fatigue peuvent être distingués selon le type de sollicitation à savoir :

• fatigue en traction-compression ;

• fatigue en torsion alternée ;

• fatigue en flexion.

Ainsi dérivent 3 types de contraintes ; une première alternée « symétrique ou dissymétrique », une seconde répétée et une dernière ondulée elles sont toutes en fonction du rapport R.

L'étude expérimentale du comportement d'une pièce en fatigue exige des moyens permettant de reproduire exactement les mêmes efforts auxquels la pièce est soumise en service. Étant donné que dans la plupart des cas le chargement est de nature aléatoire, alors on doit procéder au comptage des cycles. Pour cela on doit avoir recours aux techniques de calcul des cycles. Appelée aussi « méthode de la goutte d'eau », la méthode Rainflow est de loin la plus utilisée par les auteurs dans ce domaine. Au départ, deux traitements sur le signal sont à effectuer : le premier est une quantification du signal en un nombre de classes raisonnable (64 classes préconisées par la norme française AFNOR), et le second est la transformation du signal en une succession de pics et de vallées. Le comptage peut ensuite commencer.

Une fois la durée de vie du matériau relative à chaque cycle est déterminée, les lois d'endommagement comme celle proposée par Palmgren-Miner, nous permettent de calculer l'endommagement correspondant et d'en faire le cumul. Une telle loi, est une sorte de règle permettant d'accumuler une variable d'endommagement D, dont elle-même est définie par une loi d'endommagement. À la fin, ce cumule de dommage conduit à l'estimation de la durée de vie du matériau. Dans le cas d'un chargement à amplitude variable, on utilise la loi de cumul d'endommagement de Palmgren-Miner. En effet l'endommagement provoqué par un certain niveau d'amplitude est pris comme le quotient du nombre de cycles de chargement $n_i$ à ce niveau par le nombre de cycles à la rupture $N_i$ à ce même niveau, lequel est fourni par la courbe de Wöhler ou par le calcul analytique comme dans le présent travail. On suppose ensuite que les endommagements se cumulent sans qu'il y ait influence d'un niveau sur l'autre. L'endommagement total est donné par l'équation suivante :

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \tag{2.1}$$

Une hypothèse souvent utilisée est que la fissuration se produit lorsque la variable d'endommagement D choisie atteint la valeur 1. D'après *Miner*, le nombre de séquences total à la rupture $N_{Rs}$ pour ce cas de cumule est calculé avec l'endommagement total, avec $D_i$ est l'endommagement élémentaire associé à chaque cycle.

$$D = \sum_i D_i \tag{2.2}$$

Reste à noter que loi de Palmgren-Miner est la plus connue et la plus utilisée par le fait que non seulement elle apparaît logique, mais en plus facile à appliquer. Par contre, pour simplifier les essais en laboratoire, on réalise généralement des chargements simples qui varient sinusoïdalement. Les Figure II-3 à Figure II-6 montrent les paramètres caractérisant les essais de fatigue. On remarque que la différence entre les essais est liée directement à la nature de l'effort appliqué. Elle est liée au rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale [5]

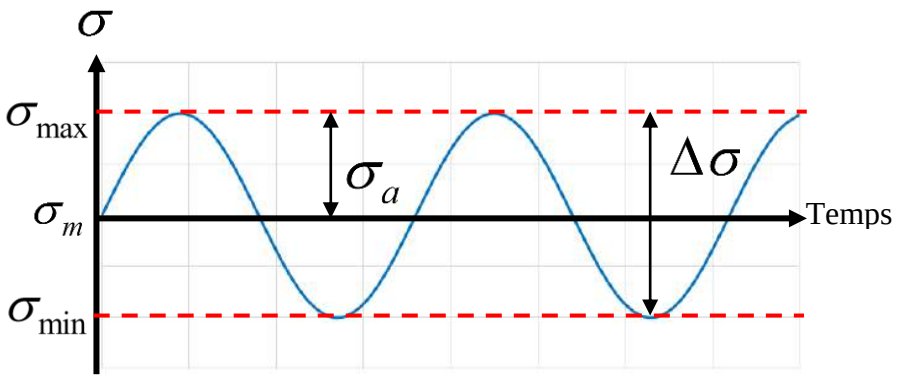



Figure II-3 Contraintes alternées symétriques $R=-1$.

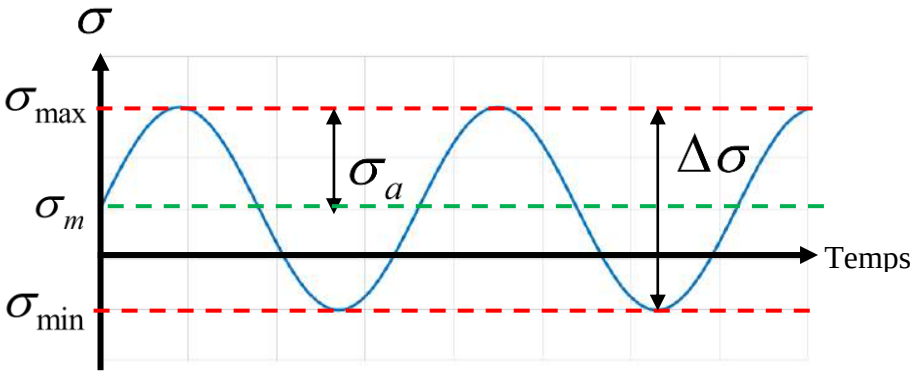



Figure II-4 Contraintes alternées dissymétriques $-1<R<0$.

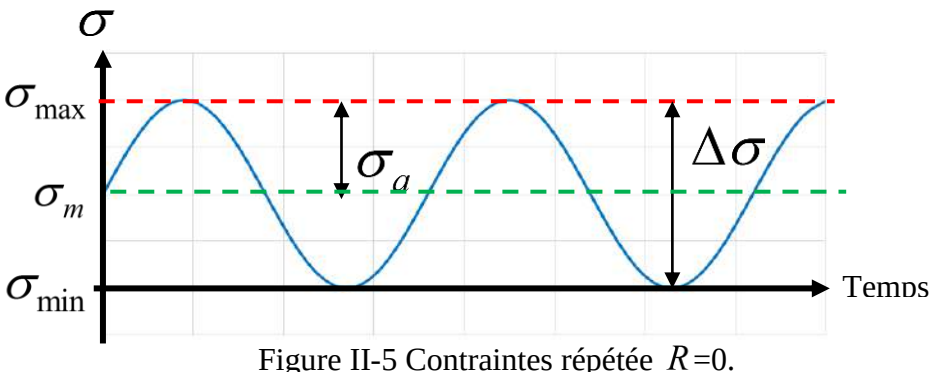



Figure II-5 Contraintes répétée $R$=0.

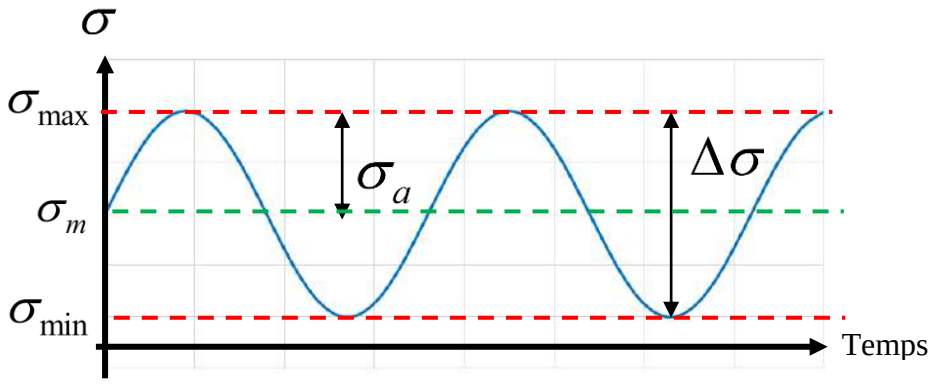



Figure II-6 Contraintes ondulées $R>0$.

Les paramètres ci-dessous sont utilisés pour définir un diagramme de contrainte :

- $\sigma_{max}$ , $\sigma_{min}$ sont respectivement la contrainte maximale et la contrainte minimale
- $\sigma_a$ est l'amplitude de la contrainte : $\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min})$ (2.3)
- $\Delta_\sigma$ est la variation de la contrainte : $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ (2.4)
- $\sigma_m$ est la contrainte moyenne : $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min})$ (2.5)
- Le rapport des contraintes R : $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ (2.6)
- L'amplitude de la contrainte est donné par : $A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$ (2.7)

## II.5 Diagramme d'endurance (courbe de Wöhler)

La courbe qui décrit le comportement des pièces aux sollicitations de fatigue s'appelle courbe de Wöhler ou courbe d'endurance S-N (contrainte ou Stress - Nombre de cycles) telle qu'illustrée par la Figure II-7. On peut distinguer trois zones :

- Zone de fatigue oligocyclique.
- Zone d'endurance limitée.
- Zone d'endurance illimitée.

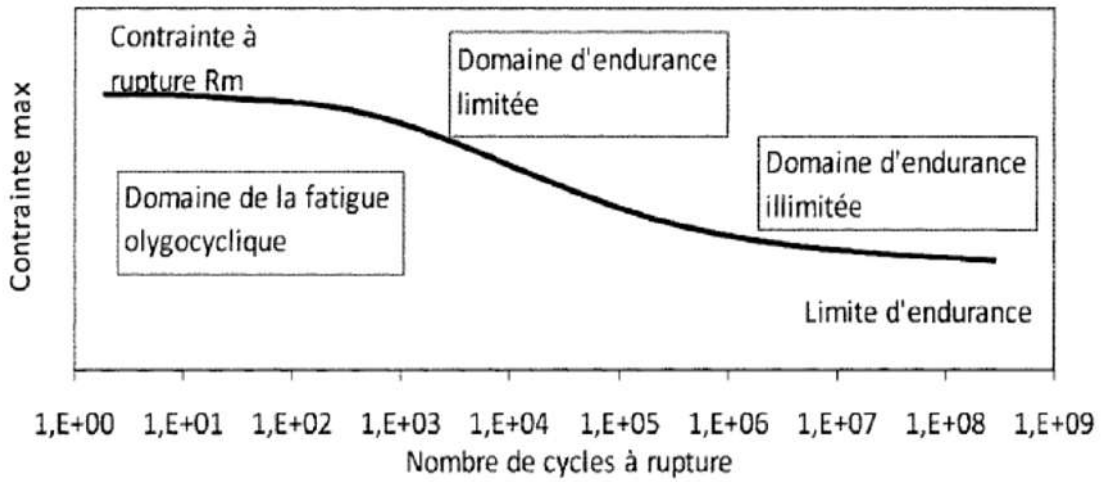



Figure II-7 Allure générale d'une courbe de Wöhler.

L'allure générale d'une courbe S-N peut être décrite par différentes représentations mathématiques [2]. Un traitement statistique des résultats expérimentaux permet de déterminer des faisceaux de courbes iso-probables. On constate que plus le nombre de cycles est élevé, plus la dispersion est importante (Figure II-1) [6]. Au voisinage de la limite d'endurance, la dispersion est portée par la contrainte pour un grand nombre de cycle fixe. Par contre, pour la fatigue oligocyclique, la dispersion est portée par le nombre de cycle pour une contrainte fixe. La détermination de la limite d'endurance s'effectue selon différentes techniques statistiques (méthodes de ≪ Probit ≫, méthode de l'escalier, méthode d'itération, méthode des K éprouvettes non rompues, etc.). La dispersion de celle-ci est le plus souvent considérée comme normale dont la valeur moyenne et l'écart type dépendent de la méthode adoptée [2].

Le tracé de la courbe de Wöhler nécessite de soumettre des éprouvettes à des efforts périodiques — sinusoïdaux généralement — d'amplitude maximale $\sigma$ et de fréquence constante, et de noter à chaque fois le nombre de cycles à la rupture (N). À chaque éprouvette correspond un nuage de point (pour une même contrainte, on note plusieurs nombres de cycles voisins). À partir d'un lot d'éprouvettes soumises à différent niveau de contraintes on obtient une courbe qui a l'allure de celle représentée dans la Figure II-8.

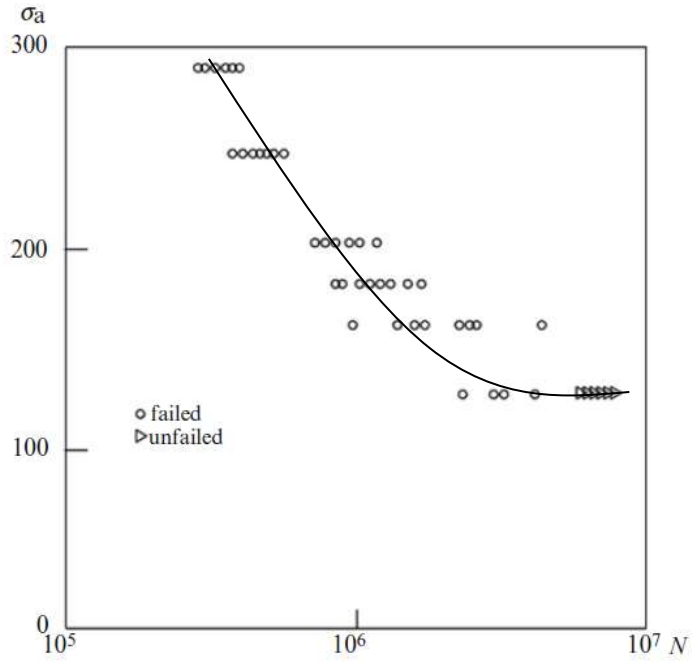



Figure II-8 Courbe de Wöhler pour l'acier [1].

### II.5.1 Fatigue oligocyclique

Ce terme désigne par définition un domaine de très faible durée de vie, les contraintes dans cette zone sont généralement supérieures à la limite élastique du matériau, c'est-à-dire qu'une déformation plastique significative se produit à chaque cycle.

La rupture se produit après un nombre faible de cycles où les matériaux ont une endurance finie à ce type de sollicitation. Pour cette partie, le nombre de cycles avant la rupture est définie d'un quart de cycle jusqu'à $10^{2}$ voir $10^{4}$ cycles [7].

L'intérêt des études relatives à la fatigue oligocyclique existe essentiellement en deux points :

• La prise en compte de ce phénomène pour le dimensionnement et la conception des appareils est rendue nécessaire par le développement des techniques avancées ; et possible grâce aux méthodes de calcul très puissantes.

• L'utilisation des résultats de la fatigue oligocyclique permet avec plus de précision l'analyse du comportement des matériaux et de mieux interpréter les phénomènes mécaniques.

### II.5.2 Zone d'endurance limitée

Les contraintes dans cette zone sont plus faibles, l'endurance augmente au fur et à mesure que l'amplitude de la contrainte diminue.

### II.5.3 Zone d'endurance illimitée

Cette zone est considérée comme illimitée ou de sécurité. Elle est caractérisée par les faibles contraintes, la rupture dans ce cas apparaît pour les nombres de cycles supérieurs à $10^{7}$ .

## II.6 Aspect statistique

La courbe de Wöhler est tracée en soumettant successivement une dizaine d'éprouvettes à des contraintes sinusoïdales de différentes amplitudes. L'expérience montre qu'il y a une dispersion considérable dans les résultats, en particulier pour les grandes durées de vie [8]. Pour un niveau de contrainte donné, le rapport entre la valeur maximale et la valeur minimale du nombre de cycles à la rupture peut dépasser 10 [8]. La dispersion des résultats est liée à l'hétérogénéité des matériaux, aux défauts superficiels, aux tolérances d'usinage et surtout à des facteurs métallurgiques. Parmi ces facteurs, les inclusions sont les plus importantes. La

dispersion est due en fait, à ce que l'action de la fatigue dans un métal est en général fortement localisée. Contrairement au cas des charges statiques, seul un petit volume de matériau est concerné. Le taux de fatigue dépend de la taille, de l'orientation et de la composition chimique de quelques grains de matériau qui sont situés dans une zone critique [9-11]. Il est par conséquent peu réaliste de vouloir caractériser la tenue en fatigue d'un matériau par une courbe de Wöhler tracée en effectuant un seul essai de fatigue à chaque niveau de contrainte. Il est plus juste de décrire cette tenue par une courbe à caractère statistique, l'axe des abscisses donnant la longévité $N_p$ pour une survie de $p$ pourcent des éprouvettes [12].

On donne en général la courbe de longévité (ou courbe d'équiprobabilité) médiane (N50, soit survie de 50% des éprouvettes) et parfois les courbes médianes ± 1 à 3 écarts type ou

D'autres courbes à iso probabilité.

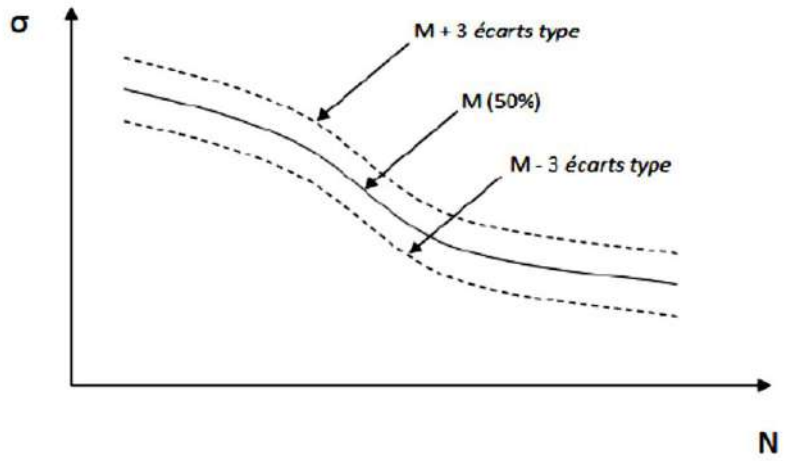



Figure II-9 Courbes de Wöhler à iso probabilité.
Sans précision, la courbe de Wöhler est la courbe médiane.

# II.7 Lois de distribution de la résistance à la fatigue

Une autre façon d'aborder le problème peut consister à étudier la résistance à la fatigue du matériau [13], soit la contrainte à laquelle le matériau peut résister pendant N cycles. Cette résistance a elle aussi un caractère statistique et on définit ici encore une résistance à P % de survie et une résistance médiane.

La courbe représentant la probabilité de rupture au cours d'un essai dont la durée est limitée à N cycles en fonction de la contrainte σ est nommée courbe de réponse [14].

L'expérience montre que la résistance à la fatigue suit une loi approximativement normale quel que soit N et à peu près indépendante de N. Cette constance est masquée sur les diagrammes de Wöhler par le choix des échelles log-lin ou log-log, la dispersion semblant augmenter quand N croît.

# II.8 Représentation analytique de la courbe de Wöhler

Diverses expressions ont été proposées depuis le siècle dernier pour décrire la courbe de Wöhler représentative de la résistance à la fatigue d'un matériau, souvent dans la zone d'endurance limitée (la définition de cette courbe ayant d'ailleurs évolué au fil des ans pour passer d'une courbe déterministe à une courbe à caractère statistique).

Comme nous l'avons vu précédemment, la courbe de Wöhler est en général tracée dans des axes semi-logarithmiques (Log N ,$\sigma$ ) dans lesquels elle présente une partie (BC) approximativement linéaire (autour d'un point d'inflexion) variable suivant le matériau suivie d'une asymptote à la droite $\sigma = \sigma_D$.

Parmi les nombreuses représentations plus ou moins compliquées et dont aucune n'a un caractère vraiment général, on trouve les suivantes.

## II.8.1 Relation de Wöhler

$$\sigma = \alpha - \beta L \log N \tag{2.8}$$

Cette relation ne décrit pas la totalité de la courbe puisque σ ne tend pas vers une limite $\sigma_D$ lorsque N tend vers l'infini. Elle ne représente que la partie BC.

### II.8.2 Relation de Basquin

La relation proposée par Basquin en 1910 [15] est de la forme :

$$Log\sigma = \alpha - \beta LogN \tag{2.9}$$

Où : $$N\sigma^{b} = c \tag{2.10}$$

En posant : $$\beta = \frac{1}{b} et \rightarrow Log(c) = \frac{\alpha}{\beta}$$

(2.11)

b est quelquefois nommé index de la courbe de fatigue (Figure II-).

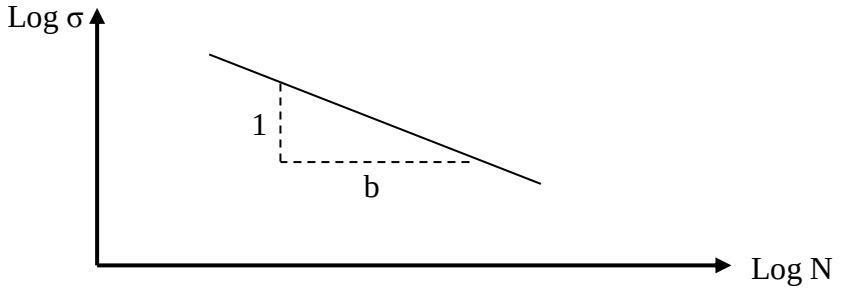



Figure II-10 Signification du paramètre b de la relation de Basquin.

## II.9 Facteurs d'influence

Il y a un grand nombre de paramètres susceptibles d'affecter la résistance à la fatigue et donc de modifier la courbe S-N. La limite de fatigue d'une éprouvette peut ainsi être exprimée sous la forme [16]:

$$\sigma_D = K_e K_s K_\theta K_d K_g K_h \sigma_D^{'}$$

Où $\sigma_D^{'}$ est la limite de fatigue d'une éprouvette lisse, et où les autres facteurs permettent de prendre en compte les principaux effets suivants :

$K_e$ : Effet d'échelle

$K_s$ : Effet de surface

$K_\theta$ : Effet de la température

$K_d$ : Effet de forme (entailles, congés, …)

$K_g$ : Effet de fiabilité

$K_h$ : Effets divers (vitesse de charge, type de charge, corrosion, contraintes résiduelles, fréquence de la sollicitation, …)

Ces facteurs peuvent être classés comme suit [17]:

- facteurs dépendants des conditions de sollicitation (nature des charges : traction/compression, flexion alternée, flexion rotative, torsion alternée, …)
- facteurs géométriques (effet d'échelle, forme, …)
- facteurs dépendant des conditions de surface
- facteurs d'ordre métallurgiques
- facteurs d'environnement (température, corrosion, …)

## II.10 Estimation de la fatigue

La dispersion des résultats d'essais de fatigue, liée, soit à la nature du matériau, soit aux conditions expérimentales utilisées au cours de l'obtention, nécessite l'utilisation des méthodes d'analyse statistiques appropriées, lors du dépouillement des résultats d'essais [18].

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

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

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

Les méthodes de l'escalier et d'itération restent utilisables avec des nombres arbitraires d'essais tandis qu'il faut prévoir au moins soixante à quatre-vingts essais par celle des probits. La méthode de l'escalier conserve l'avantage de la simplicité mais son exécution est rendue très longue par la nécessité d'essayer des éprouvettes les unes à la suite des autres. La méthode d'itération a une exécution plus délicate mais moins longue on effectuant les

effets par groupe. Ces méthodes requièrent un nombre d'éprouvettes minimal et des conditions des mises en œuvre différentes qui permettent d'obtenir une précision des estimations variables.

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

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

- L'augmentation de la contrainte statique réduit l'amplitude de contrainte admissible ;
- La contrainte admissible diminue quand on passe successivement de la flexion à la traction, puis à la torsion ;

## II.11 Développement du modelé analytique

Dans cette partie, nous allons analyser quelques méthodes de prédiction de la durée de vie. À cet effet, nous allons examiner et évaluer les différentes méthodes existantes dans la littérature et qui lient le nombre de cycles N aux contraintes maximales et aux déformations.

Les méthodes de prévision de durée de vie en fatigue sont classées selon trois approches.

Tout d'abord en déformation, en contrainte et pour conclure celle en énergie. Bien évidemment chaque technique est propre à un domaine de fatigue, c'est-à-dire à la fatigue oligocyclique, endurance limitée ou limite d'endurance [19].

Les approches en déformation existantes sont :

- Celles qui dérivent de la courbe de Manson-Coffin-Basquin (1965).
- La proposition de Wang et Brown (1992).
- Celle de Fatemi et Socie (1988).

Les approches en contrainte sont celles de :

- Macha-Bedkowsky(1989).
- Robert (1996).
- Preumont Piéfort et Pitoiset (1994).
- Morel (1996).
- Stephanov(1993).

Les approches énergétiques évaluées sont :

- De Bannantine (critère de Smith-Watson-Topper (1974)) ;
- Celle Lagoda et Mâcha (1997).

# II.12 CONCLUSION

La fatigue est l'une des maladies des métaux, elle survient sur toutes structures soumises à des sollicitations répétées à amplitude constante ou variable. Ce terme signifie des endommagements qui conduisent à la rupture des pièces mécaniques. Elle a des conséquences très néfastes et malgré tous les travaux réalisés sue ce domaine elle reste toujours méconnue. C'est pour cette raison que plusieurs auteurs ont consacrés leurs travaux sur le comportement en fatigue afin d'éviter leurs ruptures et améliorer leurs durées de vie. La dureté de la géométrie et de la capacité de la machine a utilisé. Ils ont une inspiration indirecte sur le comportement en fatigue car ils résultent des irrégularités qui ont un caractère micrographique ou macrographique appelées rugosité ou plusieurs modèles pour l'estimation des durées de vie se sont basés sur ce paramètre géométrique.

# CHAPITRE III **Partie Expérimentale**

# III.1 Introduction

Ce chapitre comprend quatre parties. La première partie est consacrée à la description de la machine utilisée. Ensuite, sont données les propriétés mécaniques du matériau utilisé pour l'usinage des éprouvettes. La troisième section décrit la procédure suivie pour la réalisation des essais, et dans la dernière partie un traitement statistique des résultats est effectué.

## III.1.1 Description de la machine utilisée

### III.1.1.1 Présentation de la machine

| | |
|---|---|
| **Nom de la machine** | -Machine de fatigue par flexion rotative |
| **Capacité** | -Moment de flexion maximal : 120 Nm.<br>-Puissance 1.1KW.<br>-Vitesse de rotation 900 tr/min.<br>-Couple moteur 11,67 *N.m* |
| **Température** | Essais à température ambiante |
| **Géométrie des éprouvettes** | - Longueur : 90 mm.<br>- Diamètre des queues : 12,60 mm.<br>- Zone active cylindrique de diamètre utile : 8 mm. |
| **Principe** | Une éprouvette cylindrique de révolution soumise à de la flexion quatre points tourne autour de son axe longitudinal.<br>La mise en charge est faite par l'intermédiaire de masses fixées aux paliers flottants. |



Figure III-1 La machine de fatigue par flexion rotative.

## III.1.2 Principe de fonctionnement de la machine à flexion rotative

Dans les essais de flexion rotative, l'éprouvette, entrainée en rotation, est soumise à un effort de flexion de direction fixe, par conséquent, toutes les fibres, sauf la fibre neutre, sont successivement tendues puis comprimées Figure III-2**.**

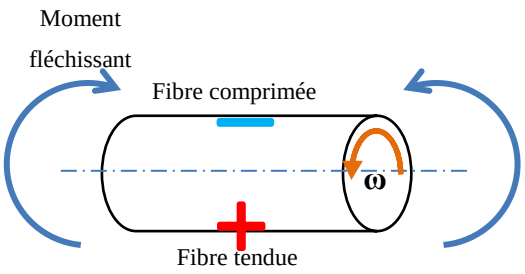



Figure III-2 Flexion rotative d'une éprouvette cylindrique

Il existe deux modes de montage de l'éprouvette : en console (en Porte-à-faux), ou sur deux appuis. Si l'effort est appliqué en un point, le moment de flexion varie linéairement le long de l'éprouvette Figure III-3 a et b). S'il est appliqué en deux points, le moment de flexion peut être constant tout le long de la partie utile de l'éprouvette ce qui donne un chargement en flexion pure (Figure III-3 c et d).

Dans chaque cas, l'éprouvette tourne à une certaine vitesse, le plus souvent de 1500 à 2500 tours/minute, et supporte l'effort (donné par un poids) par le moyen d'une chape montée sur un roulement à billes.

Chaque révolution correspondant à une période ou à un cycle de l'effort et les contraintes agissant sur chaque fibre seront donc alternées pure ou symétrique [19].

Un autre mode d'essai qui correspond à une flexion rotative est celui où l'éprouvette est fixe d'une extrémité et soumise à l'autre à une flexion tournante par l'effet de la force centrifuge au moyen d'une masse excentrée par exemple.

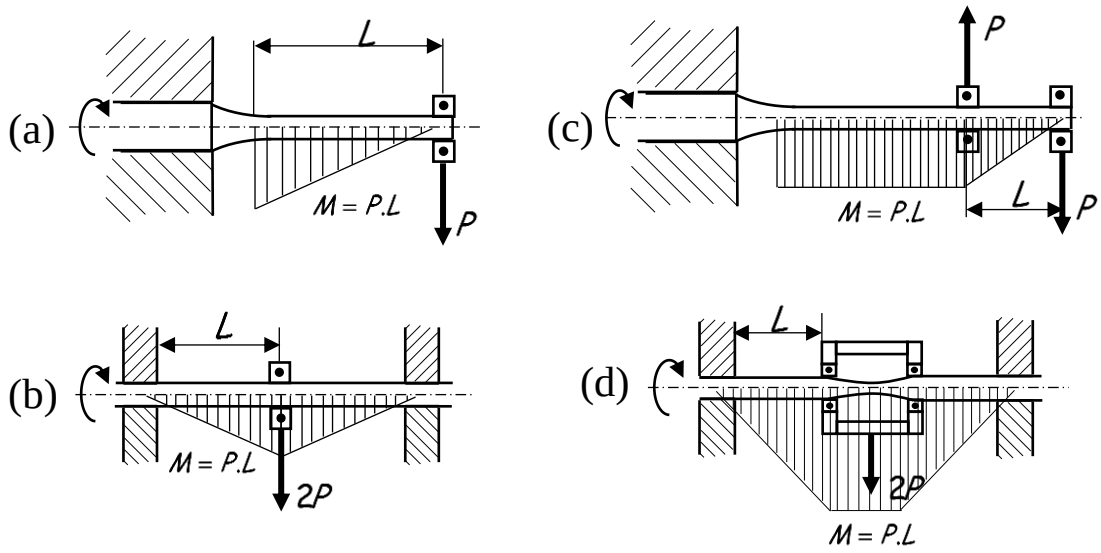



Figure III-3 Montages possibles en flexion rotative.

La contrainte dans la fibre externe, qui est la plus sollicitée, se calcule par la formule de NAVIER ;

$$\sigma_{max} = \frac{M.y_{max}}{I} \tag{3.1}$$

Où :

$M$ : Moment fléchissant par rapport à la section considérée $M = P.L$

$P$ : Charge appliquée

$L$ : Distance de l'axe d'application de la charge à la section considérée ;

$y_{max}$ : Distance de la fibre neutre à la fibre externe ($y_{max} = \frac{d}{2}$ pour une section circulaire)

$I = \frac{\pi d^4}{64}$ (Cas d'une section circulaire).

Ce qui donne pour la contrainte maximale :

$$\sigma_{max} = \frac{32PL}{\pi d^3} \tag{3.2}$$

### III.1.3 Composants de la machine

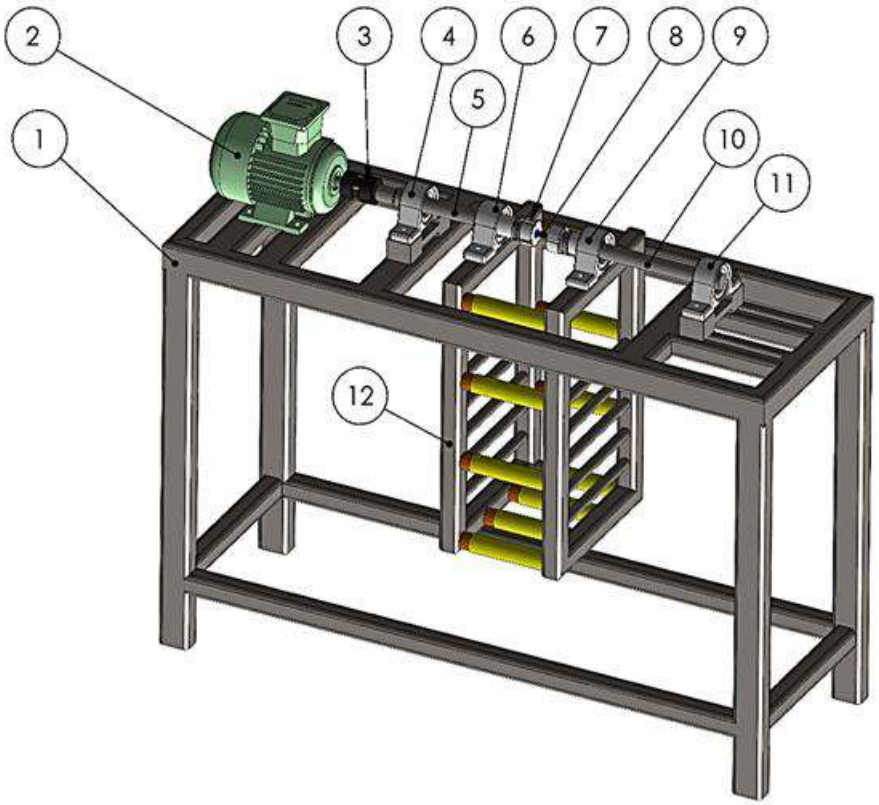



Figure III-4Vue d'ensemble de la machine.

| | |
|---|---|
| 1 : Le châssis | 7 : Ecrou de serrage de la pince |
| 2 : Moteur | 8 : Eprouvette |
| 3 : Accouplement | 9 : Palier flottant 2 |
| 4 : Palier fixe 1 | 10 : Arbre porte éprouvette 2 |
| 5 : Arbre porte éprouvette 1 | 11 : Palier fixe 2 |
| 6 : Palier flottant | 12 : Mécanisme porte-charge |

# III.2 Réalisation des éprouvettes et choix du matériau

## III.2.1 Type d'éprouvettes utilisées

Les éprouvettes utilisées dans les essais de flexion rotative sont toujours de révolution. Elles peuvent être cylindriques, toroïdales ou coniques. Les éprouvettes cylindriques (Figure III-5) sont utilisées sur des machines à moment constant. Dans ce cas, la rupture de l'éprouvette peut se produire indifféremment tout le long de la partie utile.



Figure III-5 Eprouvette cylindrique.

## III.2.2 Dimensions des éprouvettes

L'éprouvette utilisée est composée de deux parties. Les deux extrémités (queues) ont un diamètre de fixation de 12.5 mm et une longueur de 29.50 mm. La partie utile a un diamètre de 8.00 mm et une longueur de 14.2mm. Le congé de raccordement entre les deux parties à un rayon de 15mm.

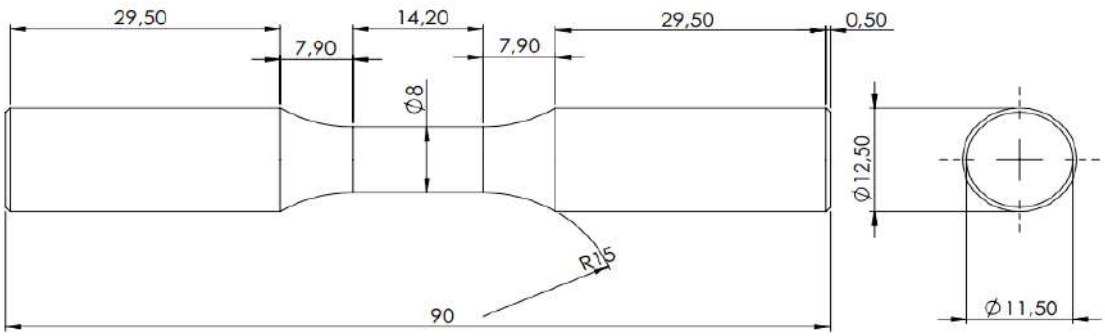



Figure III-6 Dimensions des éprouvettes.

### III.2.3 Usinage des éprouvettes

Pour ne pas altérer la structure et les caractéristiques mécaniques du métal, l'usinage d'une éprouvette doit éviter tout échauffement excessif et réduire au maximum l'écrouissage de la surface.

Lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques d'un métal en fatigue, il faut réduire au maximum l'influence de l'état de surface de l'éprouvette sur le processus de fatigue qui conduira à la rupture. Pour cette raison, l'état de surface des éprouvettes devra être particulièrement soigné et répétitif pour le même lot d'éprouvettes.

L'usinage doit se faire par la préparation d'une ébauche avec une surépaisseur de 0.5 mm, puis par des passes de finition de plus en plus fines pour terminer avec une profondeur de passe de 0.025 mm. Enfin, la surface de l'éprouvette est polie longitudinalement avec des toiles et des papiers abrasifs de plus en plus fins pour terminer avec un papier au carbone silicone, imperméable à l'eau, de degré 600. On obtient ainsi, une finesse de surface de l'ordre de 0.4 microns.

On donne par exemple pour une éprouvette cylindrique avec congé de raccordement, les étapes à suivre :

1. Une ébauche de l'éprouvette, et obtenue par usinage au tour à partir du diamètre d+0.5 mm, en évitant tout écrouissage. Il est conseillé d'opérer par passes successives de 1.0 mm,

2. Rectification transversale à l'aide d'une meule appropriée à l'acier à partir du diamètre d+0.05 mm par passes décroissantes de 0.05 à 0 .01mm.

3. Un polissage à la toile abrasive jusqu'à l'obtention d'une rugosité de 0.4.

### III.2.4 Choix du matériau

Le matériau utilisé pour la fabrication des éprouvettes est de l'acier pour rond à béton de nuance **HAFeE50** (Tableau (4.1)) fabriqué par la société TOSYALI ALGERIE. Le rond à béton de TOSYALI est fabriqué selon un procédé élaboré permettant d'obtenir des aciers avec de bonnes caractéristiques [11]. Les barreaux utilisés pour la réalisation des éprouvettes ont été récupérées sur un chantier de la ville.

| Dénomination | Limite élastique (MPa) | Contrainte de rupture (MPa) | Allongement de rupture (%) |
|---|---|---|---|
| **HAFeE50** | 500 | 550 | 14 |

Tableau 1 :Propriétés mécaniques de la nuance d'acier utilisé [20].

Les barres d'acier du rond à béton sont obtenues par un laminage effectué à l'état austénitique particulièrement malléable. Le dégrossissage a lieu entre 1100°C et 1200 °C et la finition est faite à des températures descendant jusqu'à 800 °C [20].

Après traitement thermique, le produit final est constitué approximativement d'une surface de martensite trempée à haute résistance, d'un noyau de ferrite-perlite et d'une zone de transition en bainite [21].

Lors de l'usinage les parties superficielles trempées, et la zone de transition, sont retirées, et l'éprouvette obtenue est constituée de ferrite-perlite.

## III.3 Conduite des essais

Pour mener les essais sur les éprouvettes, nous avons opté pour la méthode classique qui consiste à choisir plusieurs niveaux de contraintes et à essayer, à chaque niveau quatre éprouvettes. Car on a jugé que c'est suffisant vu le nombre d'éprouvette disponibles et la difficulté de choisir les niveaux de contraintes. Nous avons préféré cette méthode aux deux méthodes des probits et d'essai en escalier car ces dernières se limitent à déterminer la limite d'endurance pour un nombre de cycle jusqu'à rupture fixé. En effet, il nous était impossible d'estimer, à priori, les résultats qui seraient obtenus par les essais.

Nous faisons une remarque importante à ce niveau concernant les essais : en effet, nous avons utilisé une 20 d'éprouvettes qui correspondent à cinq niveaux de contrainte. Les résultats des essais sont groupés dans le Tableau 2.

| Contrainte appliquée (MPa) | N1 | N2 | N3 | N4 | Moyenne | Ecart-type |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 144,2 | 61002 | 47520 | 50553 | 51975 | 52763 | 4120 |
| 163,8 | 12483 | 20160 | 14472 | 24597 | 17928 | 4450 |
| 233,6 | 11925 | 15912 | 10872 | 20925 | 14909 | 3510 |
| 287,8 | 11727 | 13680 | 11619 | 10440 | 11866 | 907 |
| 353,3 | 1224 | 810 | 747 | 1080 | 900 | 202 |

Tableau 2 : Nombre de cycles à rupture obtenus pour cinq niveaux de la contrainte.

Le graphe de la Figure III-7 fait ressortir trois zones représentatives de trois domaines de fatigue :

1. Le domaine de rupture à faible nombre de cycles (Fatigue Oligocyclique).
2. Le domaine de fatigue ou d'endurance limitée.
3. Le domaine de fatigue illimitée (Zone de sécurité).

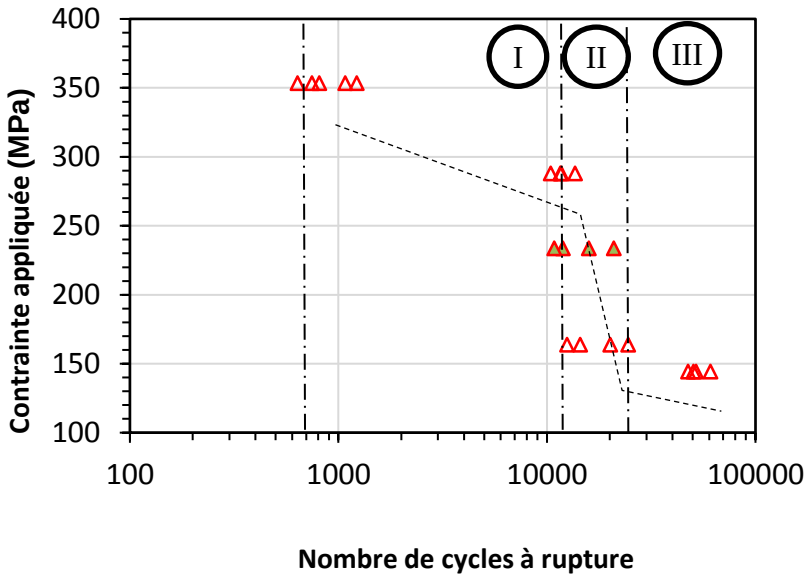



Figure III-7 Représentation graphique des résultats.

Les courbes des deux premiers domaines peuvent être approximées par des tracés linéaires sur un graphe Log-Log. Quant à la limite d'endurance, et faute d'avoir suffisamment d'éprouvettes pour appliquer la méthode « Escalier », nous utiliserons une relation empirique pour évaluer le seuil de rupture par fatigue pour différents niveaux de probabilité de rupture.

## III.4 Traitement statistique des résultats

Pour le traitement statistique des résultats, nous avons utilisé une approximation par la loi normale de Gauss. La loi normale est l'une des lois de probabilité les plus adaptées pour modéliser des phénomènes naturels issus de plusieurs événements aléatoires. Lorsqu'une variable aléatoire X suit la loi normale, elle est dite gaussienne ou normale et il est habituel d'utiliser la notation avec la variance **σ** :

$$X \sim N\left(\mu, \sigma^2\right) \tag{3.3}$$

La densité de probabilité de la loi normale est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{3.4}$$

Les deux paramètres d'une loi gaussienne sont, son espérance, un nombre réel noté μ, et son écart type, un nombre réel positif noté **σ.**

Historiquement, la loi normale est apparue comme la loi limite dans le théorème central limite à l'aide de sa fonction de répartition. Il est alors utile de définir la loi par cette fonction. La loi normale est la loi de probabilité dont la fonction de répartition est donnée par la fonction $\Phi : R \rightarrow R^+$, définie par [22]:

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \tag{3.5}$$

Elle donne la probabilité qu'une variable aléatoire de loi normale appartienne à un intervalle $[a,b]: P(X \in [a,b]) = \Phi(b) - \Phi(a)$. (Figure III-8 et Figure III-9)

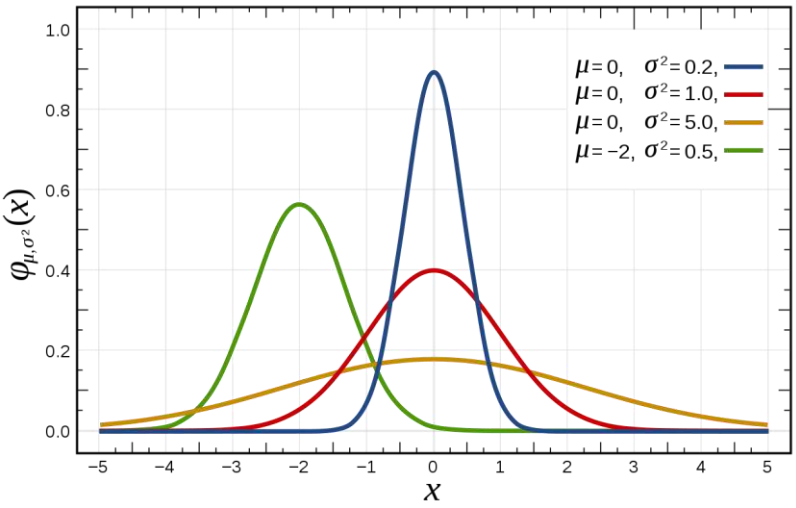



Figure III-8 Densité de probabilité d'une loi normale.

La courbe rouge représente la fonction φ densité de probabilité de la loi normale centrée réduite.

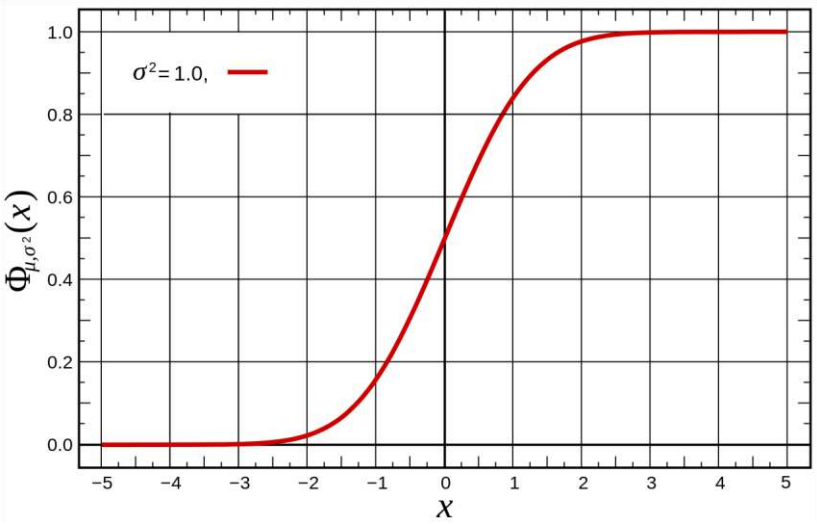



Figure III-9 Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

Afin de pouvoir tracer les courbes S-N, sous l'hypothèse d'une répartition normale des résultats des essais, pour trois niveaux de défaillances (50%, 80% et 90%), nous avons calculé pour chaque niveau de contrainte, la moyenne et l'écart type des essais. Les fonctions obtenues sont ensuite utilisées pour évaluer les défaillances de rupture. Le Tableau 3, regroupe les nombres de cycles à rupture pour les trois niveaux de défaillances fixés.

| Contrainte (MPa) | Espérance μ (cycles) | Ecart-type σ (cycles) | Nr (50%) (cycles) | Nr (80%) (cycles) | Nr (90%) (cycles) |
|---|---|---|---|---|---|
| 144,2 | 52763 | 4120 | 52763 | 56230 | 58043 |
| 163,8 | 17928 | 4450 | 17928 | 21674 | 23632 |
| 233,6 | 14909 | 3510 | 14909 | 17863 | 19407 |
| 287,8 | 11866 | 907 | 11867 | 12630 | 13029 |
| 353,3 | 900 | 202 | 900 | 1070 | 1158 |

Tableau 3 : Nombre de cycles à rupture pour trois niveaux de défaillances en utilisant des fonctions de répartition gaussiennes.

Les figures Figure III-10Figure III-11et Figure III-12 donnent un lissage des courbes S-N pour trois niveaux de défaillances, à savoir : 50%, 80% et 90% respectivement et ceci pour les deux domaines, de rupture à faible nombre de cycles et de fatigue à nombre de cycle limité.

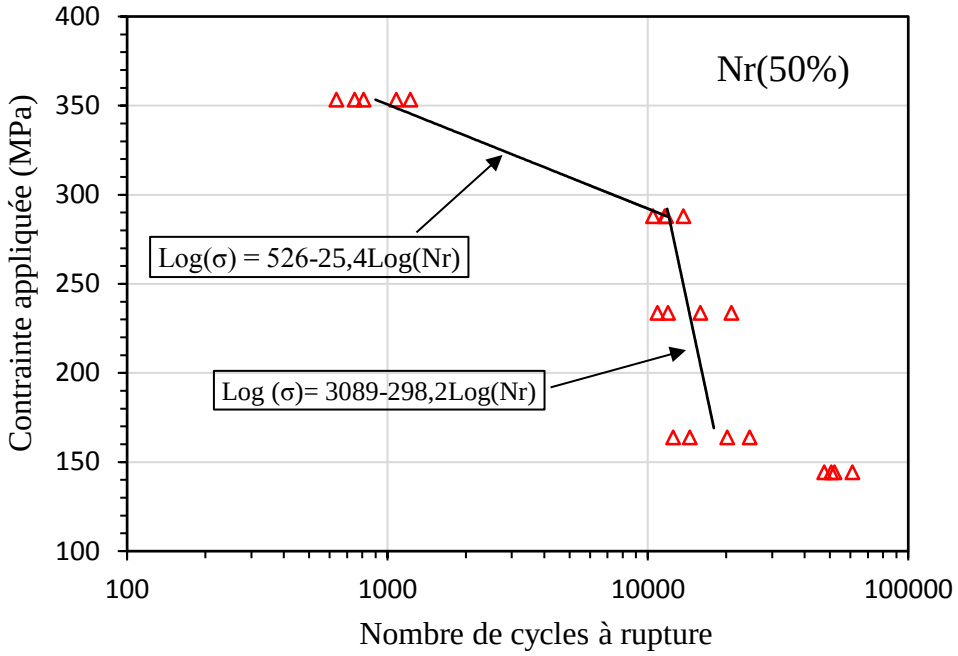



Figure III-10 Approximation de la courbe S-N par l'équation de Basquin (Eqn. 2.9) pour une défaillance de 50%.

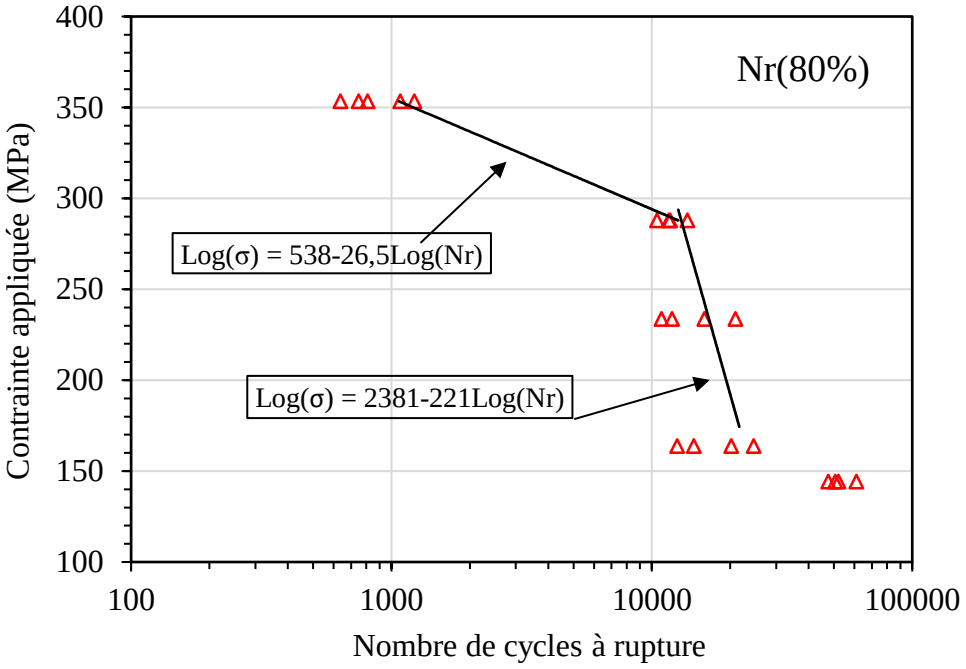



Figure III-11 Approximation de la courbe S-N par l'équation de Basquin (Eqn. 2.9) pour une défaillance de 80%.

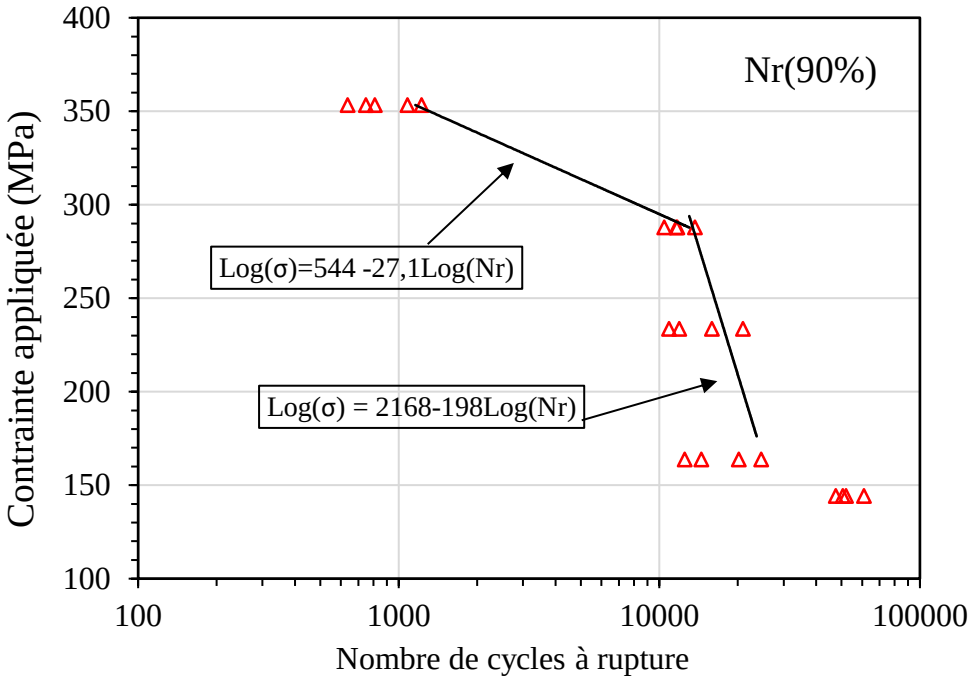



Figure III-12 Approximation de la courbe S-N par l'équation de Basquin (Eqn. 2.9) pour une défaillance de 90%.

Les courbes obtenues peuvent être représentées par l'équation de Basquin :

$$Log\sigma = \alpha - \beta LogN$$

Le tableau 4 regroupe les différents coefficients selon les niveaux de défaillances.

| Niveau de probabilité | Coefficients de la relation de Basquin | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Fatigue Oligocyclique | | Fatigue limitée | |
| | α | β | α | β |
| 50% | 526 | -25.4 | 3089 | -298 |
| 80% | 538 | -26.5 | 2381 | -221 |
| 90% | 544 | -27.1 | 2168 | -198 |

Tableau 4 : Coefficients de la relation de Basquin pour le lissage des courbes S-

## III.5 Evaluation du seuil de rupture par fatigue

Compte tenu du caractère asymptotique de la courbe S-N, le seuil de rupture par fatigue peut être défini comme l'amplitude de la contrainte constante à laquelle la durée de vie en fatigue devient infinie ou aucune défaillance en fatigue ne se produit. Cependant, dans certains cas où les essais de fatigue doivent être terminés à un grand nombre de cycles spécifique (par

exemple, $10^7$ cycles), cette amplitude de contrainte non défaillante est souvent appelée limite d'endurance. Même la limite d'endurance n'est pas nécessairement un seuil de fatigue, mais du point de vue de l'ingénierie, le terme seuil de fatigue est couramment utilisé pour désigner l'un ou l'autre cas.

Le seuil de fatigue $\sigma_d$ peut être estimé en modifiant la limite de fatigue en flexion $\left(\sigma_{\lim-f}\right)$ avec les quatre facteurs suivants : type de chargement ($C_L$), état de surface (Cs), taille ($C_D$) et niveau de fiabilité ($C_R$) [23] :

$$\sigma_d = \sigma_{\lim\text{-}f}.C_L.C_s.C_D.C_R \tag{3.6}$$

Le coefficient $C_L$, relatif au type de chargement, est donné dans le tableau5, ci-dessous [23] :

| Type de chargement | $C_L$ | Remarque |
|---|---|---|
| Axial pur | 0.9 | |
| Axial avec légère flexion | 0.7 | |
| Flexion | 1.0 | |
| Torsion | 0.58 | Aciers |
| Torsion | 0.8 | Fonte |

Tableau 5 : Valeurs du coefficient $C_L$ selon le type de chargement.

Le coefficient Cs, relatif à l'état de finition de la surface, est donné par le graphe de la Figure III-13 [23].

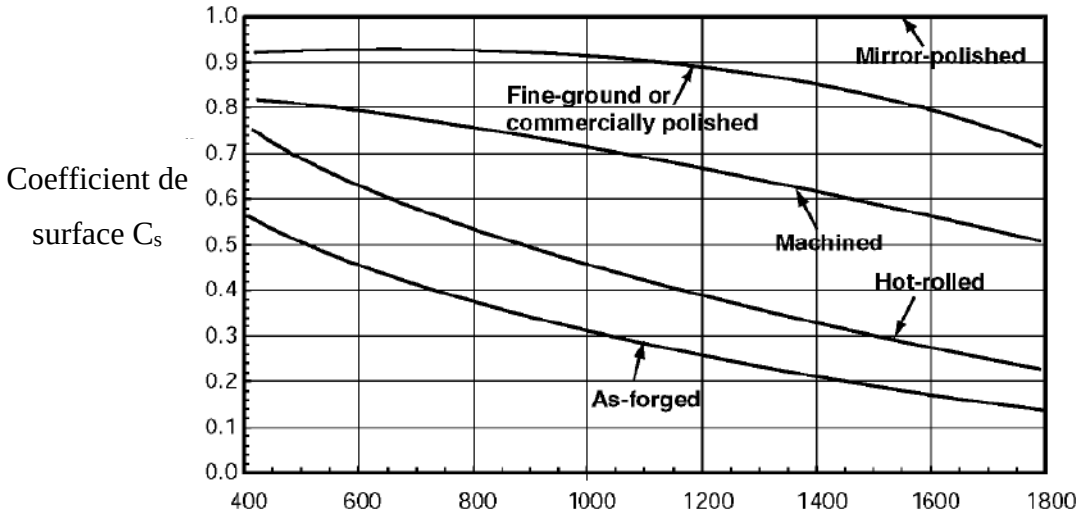



Figure III-13 Description qualitative du coefficient de finition de la surface.

Le coefficient $C_D$, relatif à la taille du spécimen, est donné par le graphe de la Figure III-14 [23].

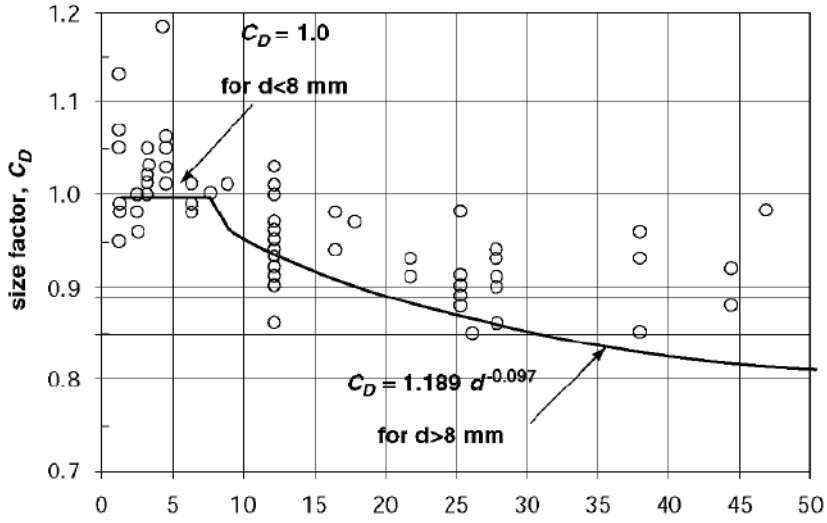



Figure III-14 Description qualitative du coefficient de taille du spécimen.

Le dernier facteur relatif à la fiabilité est donné dans le Tableau 6.

| Défaillance | $C_R$ |
|---|---|
| 0.50 | 1.000 |
| 0.80 | 0.923 |
| 0.90 | 0.897 |
| 0.95 | 0.868 |
| 0.99 | 0.814 |
| 0.999 | 0.753 |
| 0.9999 | 0.702 |
| 0.99999 | 0.620 |

Tableau 6 : Valeurs du coefficient $C_R$ selon la fiabilité.

Juvinall [24] a relié la limite de fatigue en flexion $(\sigma_{\lim-f})$ à la contrainte ultime $\sigma_u$ en utilisant des coefficients selon la microstructure de l'acier (Tableau 7).

| | $\sigma_{\lim-f}$ | @ Cycles |
|---|---|---|
| *Type of Material* | | |
| Microstructure of Steels | | |
| Steel - Ferrite | $0.58 \times S_u$ | $10^6$ |
| Steel – Ferrite + Pearlite | $0.38 \times S_u$ | $10^6$ |
| Steel - Pearlite | $0.38 \times S_u$ | $10^6$ |
| Steel – Untempered martensite | $0.26 \times S_u$ | $10^6$ |
| Steel – Highly tempered Martensite | $0.55 \times S_u$ | $10^6$ |
| Steel – Highly Tempered Martensite + | $0.5 \times S_u$ | $10^6$ |

Tableau 7 : Estimations des seuils de fatigue en flexion de base pour divers matériaux.

La limite d'endurance théorique pour un acier Ferrite-Perlite, dont la contrainte ultime est de 550MPa est : $\sigma_{\lim-f} = 550 * 0.38 = 209 MPa$

Le Tableau 8, regroupe les valeurs des différents coefficients qui entrent dans le calcul du seuil de fatigue selon le niveau de défaillance.

| Défaillance | $\sigma_{\lim-f}$ | $C_S$ | $C_D$ | $C_R$ | $\sigma_d$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 50% | 209 | 0,8 | 0,95 | 1 | 158.8 |
| 80% | 209 | 0,8 | 0,95 | 0,923 | 146.6 |
| 90% | 209 | 0,8 | 0,95 | 0,897 | 142.5 |

Tableau 8 Estimation des seuils de fatigue selon différents niveaux de défaillance.

# III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, qui constitue l'essentiel de notre travail, nous avons réalisé des essais de rupture par fatigue en utilisant un échantillon de 20 éprouvettes d'acier pour rond à béton.

Les essais ont porté sur cinq niveaux de contraintes, ce qui nous a permis de déterminer les deux domaines de fatigue oligocyclique et d'endurance limitée. Les courbes S-N des deux domaines ont été lissées en utilisant la relation de Basquin pour trois niveaux de défaillance. Pour la détermination du seuil de fatigue, nous avons utilisé une relation empirique qui fait intervenir un certain nombre de coefficients que nous avons pu évaluer en utilisant les données de la littérature.

# CONCLUSION GENERALE

# CONCLUSION GENERALE

Le phénomène de fatigue débute par une déformation plastique des défauts macroscopiques (inclusion, microfissures), lors de sollicitations répétées, d'intensité plus ou moins importantes, ces défauts se transforment en fissures de plus en plus importantes. La fatigue est l'une des maladies des métaux, elle survient sur toutes structures soumises à des sollicitations répétées à amplitude constante ou variable, cette étude a permis de mettre en évidence, par expérimentation, dans des conditions prédéterminées et avec certaines hypothèses, l'évolution de la dégradation d'un matériau soumis à une contrainte de fatigue en flexion rotative.

Les éprouvettes utilisées dans les essais de flexion rotative sont toujours de révolution. Elles peuvent être cylindriques, toroïdales ou coniques. Les éprouvettes cylindriques sont utilisées sur des machines à moment constant. Pour le traitement statistique des résultats, nous avons utilisé une approximation par la loi normale de Gauss.

La loi normale est l'une des lois de probabilité les plus adaptées pour modéliser des phénomènes naturels, issus de plusieurs événements aléatoires, Afin de pouvoir tracer les courbes S-N, sous l'hypothèse d'une répartition normale des résultats des essais, pour trois niveaux de défaillances (50%, 80% et 90%), nous avons calculé pour chaque niveau de contrainte, la moyenne et l'écart type des essais. Nous avons traité les deux domaines, de rupture à faible nombre de cycles et de fatigue à nombre de cycle limité, et faute d'avoir un dispositif électronique pour mesurer le nombre de cycle à rupture, nous utilisé le temps à rupture en utilisant un chronomètre. Le traitement des résultats, on peut dire que cette machine de fatigue donne des résultats fiables avec une marge d'erreur acceptable.

# Références bibliographiques


[1] H.P. Lieurade, F. Bastenaire, L. Régnier, Modeling of fatigue strength and endurance curve, in: P.A.e. Bathias C (Ed.) Fatigue of materials and structures; fundamentals., Wiley, Hoboken, 2010, pp. 23-66.
[2] H.P. Lieurade, La pratique des essais de fatigue, Pyc livres, 1982.
[3] J. Schijve, Fatigue of Structures and Materials, Springer, 2001.
[4] Y. Murakami, Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions, Elsevier, 2002.
[5] Agathos K, Chatzi E, Bordas SPA, in: V. Saouma, J. Bolander, E. Landis (Eds.) 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, University of California, Clark Kerr Campus, Berkeley, California USA, 2016.
[6] F. Bastenaire, M. Bastien, G. Pomey, in: Conférence de l'Académie Hongroise des Sciences sur la résistance des matériaux, Acta Technica Academia Scientiarum Hungaricae, Budapest, 1961, pp. 7-26.
[7] Bathias C, Pineau A, Fatigue des matériaux et des structures 1, Hermes, Paris, 2008.
[8] D. V. Nelson, H.O. Fuchs, Predictions of Cumulative Fatigue Damage Using Condensed Load Histories, 1975.
[9] A. Brand, J.F. Flavenot, R. Gregoire, C. Tournier, in: CETIM (Ed.), 1980.
[10] J.C. LEVY, Engineering 179 (1955) 585-591.
[11] P.H. WIRSHING, J.T.P. YAO, Methods of Structural Analysis, 1, ASCE (1976) 324-339.
[12] F. Bastenaire, in: Journée d'étude sur la fatigue, Université de Bordeaux I,, 29 Mai1975.
[13] W. SCHUTZ, Engineering Fracture Mechanics, 6 (1974) 745-773.
[14] R. CAZAUX, G. POMEY, P. RABBE, C.H. JANSSEN, La fatigue des matériaux, Dunod, 1969.
[15] O.H. Basquin, American Society for Testing and Materials Proceedings, 10 (1910) 625-630.
[16] J.E. SHIGLEY, Mechanical engineering design, Mc Graw Hill Book Co, NewYork, 1972.
[17] B. Milet Otva, in: Revue Pratique de Contrôle Industriel,, Avril 1982, pp. 60-62.
[18] R. Cazaud, G. Pomey, P. Rabbe, C. Janssen, La fatigue des métaux, Dounod, Paris, 1969.
[19] B. Atchi, Y. Serrar, in: Département du Génie Mécanique, PFE de Master en Construction Mécanique de l'Université de Médéa, 2018.
[20] N. Imzi, in, PFE de Master en Génie Métallurgique de l'Université badji Mokhtar de Annaba, 2018.
[21] P.F.L. João, in, Dissertation for obtaining the degree of master in Civil Engineering, 2012.
[22] H. Cramér, Random Variables and Probability Distributions, Cambridge University Press, 3rd ed, 1970.
[23] Y.-L. Lee, J. Pan, R.B. Hathaway, M.E. Barkey, Fatigue testing and analysis, Theory and Practice, Elsevier, 2005.
[24] r.c. Juvinall, Stress, strain, and strength, McGraw Hill, 1967.