



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد باديس - مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة الميكانيكية
Department of Mechanical Engineering

N° d'ordre : M...../GM/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**MODELISATION DES COURBES D'ENDURANCE EN
FATIGUE A TRES GRAND NOMBRE DE CYCLES**

Présenté par :

- ❖ Khelifa Djelloul
- ❖ Hamiti Youcef Cherif

Soutenu le 12 /07 / 2021 devant le jury composé de :

Président : Pr.Zenasni Ramdane Université de Mostaganem UMAB

Examineur: Dr. Benkabouche Salah Eddine Université de Mostaganem UMAB

Encadrant : Pr. Guechichi Hocine Université de Mostaganem UMAB

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2020 /2021

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, l'amour du savoir et la patience pour entamer et achever ce mémoire de fin d'études. Nous tenons à remercier notre encadrant, en l'occurrence Pr. Guechichi Hocine, pour avoir su diriger ce modeste travail ainsi que les honorables membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce mémoire. Nous exprimons toute notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département de Génie mécanique pour tous les efforts consentis au cours de notre formation. Notre gratitude va aussi à toute personne, organisme et administration qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce présent mémoire fruit de notre formation

A

Nos très généreux parents pour tous leurs sacrifices et soutien

Toutes nos familles et nos amis pour leurs encouragements

Toute personne qui a su être présente lorsque nous en avons besoin

Résumé

La fiabilité est un facteur important lors de la conception de pièces mécaniques. En effet, le dimensionnement des composants est principalement déterminé à partir des essais de fatigue dont les paramètres peuvent être exprimés à l'aide de la courbe d'endurance appelée aussi de Wöhler. Il est établi qu'une courbe d'endurance est le moyen le plus courant d'analyse et de prédiction de la durée de vie d'un matériau, d'un composant ou d'une structure lesquels sont soumis aux sollicitations mécaniques de fatigue. L'objectif primordial de cette étude est de modéliser les courbes de Wöhler par un lissage en partant des données expérimentales issues de la littérature. Notre approche s'apparente à une étude globale intégrant les principaux modèles de courbe d'endurance à grand et très grand nombre de cycles. Pour ce faire, la procédure proposée s'opère en trois étapes distinctes : la première se limite à la collection des données expérimentales via le logiciel 'GetData Graph Digitizer', la seconde est formulée par une proposition d'une multitude de fonctions mathématiques par l'intermédiaire du logiciel 'Curvre expert pro 2.7', enfin nous exploitons des résultats obtenus et nous choisissons le modèle mathématique le mieux approprié. Nous avons appliqué cette méthodologie à plusieurs alliages. Nous présentons les résultats obtenus pour chacun des alliages. Les fonctions obtenues par la simulation pourraient être ultérieurement employées en vue d'un calcul prévisionnel en durées de vie.

Mots clés : Fatigue, endurance, chargement cyclique, durée de vie, courbe d'endurance, coefficient de corrélation.

تلخيص

الموثوقية عامل مهم عند تصميم الأجزاء الميكانيكية. في الواقع ، يتم تحديد حجم المكونات بشكل أساسي من خلال اختبارات الإجهاد ، والتي يمكن التعبير عن معالماتها باستخدام منحنى التحمل المسمى أيضًا Wöhler's من المعروف أن منحنى التحمل هو أكثر الوسائل شيوعًا لتحليل وتوقع عمر مادة أو مكون أو هيكل يتعرض لضغوط الإجهاد الميكانيكي. الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو نمذجة منحنيات Wöhler عن طريق الصقل بدءًا من البيانات التجريبية من الأدبيات. نهجنا مشابه لدراسة عالمية تدمج النماذج الرئيسية لمنحنى التحمل مع عدد كبير وكبير جدًا من الدورات. للقيام بذلك ، يتم تنفيذ الإجراء المقترح في ثلاث مراحل متميزة: الأولى تقتصر على جمع البيانات التجريبية عبر برنامج "GetData Graph Digitizer" ، أما الثانية فقد تمت صياغتها من خلال اقتراح العديد من الوظائف الرياضية بواسطة "الوسيط" من برنامج "Curvre expert pro 2.7" ، أخيرًا نستغل النتائج التي تم الحصول عليها ونختار النموذج الرياضي الأنسب. لقد طبقنا هذه المنهجية على العديد من السبائك. نقدم النتائج التي تم الحصول عليها لكل من السبائك. يمكن استخدام الوظائف التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة لاحقًا للحساب التنبؤي للأعمار.

الكلمات المفتاحية: التعب ، التحمل ، التحميل الدوري ، العمر الافتراضي ، منحنى التحمل ، معامل الارتباط

Abstract

Reliability is an important factor when designing mechanical parts. Indeed, the sizing of the components is mainly determined from fatigue tests, the parameters of which can be expressed using the endurance curve also called Wöhler's. It is recognized that an endurance curve is the most common means of analyzing and predicting the life of a material, component or structure which is subjected to mechanical fatigue stresses. The primary objective of this study is to model the Wöhler curves by smoothing starting from experimental data from the literature. Our approach is similar to a global study integrating the main models of endurance curve with large and very large number of cycles. To do this, the proposed procedure takes place in three distinct stages: the first is limited to the collection of experimental data via the software 'GetData Graph Digitizer', the second is formulated by a proposition of a multitude of mathematical functions by the 'intermediary of the software' Curvre expert pro 2.7 ', finally we exploit the results obtained and we choose the most appropriate mathematical model. We have applied this methodology to several alloys. We present the results obtained for each of the alloys. The functions obtained by the simulation could subsequently be used for a predictive calculation of the lifetimes.

Keywords: Fatigue, endurance, cyclic loading, lifespan, endurance curve, correlation coefficient.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE..... 04

Chapitre I : Fatigue des matériaux

I.1 Introduction05

I.2 Les domaines de fatigue.....06

➤ Fatigue oligocyclique

➤ Fatigue limitée

➤ Fatigue illimitée

➤ Expressions mathématiques de la courbe d'endurance

I.3 Méthode d'essai08

I.4 Représentation du diagramme S-N.....09

I.5 Essai de fatigue par ultrason.....10

I.7 Facteurs influents sur le comportement d'un matériau à la résistance à la fatigue 11

Chapitre 2 :Fatigue à très grand nombre de cycles des matériaux

II.1- Alliage de titane13

II.2- Alliage de nickel14

II.3- Alliages d'aluminium15

II.4- Le cuivre16

II.5 Fatigue à très grand nombre de cycles des aciers17

II.5.1 Tôle d'acier à faible teneur en carbone17

II.5.2 Aciers inoxydables17

II.5.3 Aciers ressort19

II.5.4 Acier à outils20

II.5.5Fatigue à très grand nombre de cycles des matériaux en bref22

Chapitre 3 : Lissage des courbes

III-1Cadre et objectifs de l'étude.....23

III-2 Présentation des logiciels utilisés23

III.2.2GetData Graph Digitizer.23

III.2.3	Curvre expert pro 2.7	24
III.3	Le lissage.....	25
III.4	Coefficient de corrélation.....	26
III.5	Coefficient de détermination.....	26
III.6	L'erreur standard de la moyenne.....	27
III-7	Application de la procédure proposée à des alliages.....	27
•	Les équations de lissage d'Alliage de titane Ti 6Al-4V.....	28
•	Les équations de lissage d'Alliage de nickel(Udimet 500)	29
•	Les équations de lissage d'Alliage d'aluminium 2024-T351 (AlCu4Mg1)	30
•	Les équations de lissage du Cuivre pure UFG.....	31
III-8	Les acier.....	32
•	Les équations de lissage Acier ressort Cr-Si.....	32
•	Les équations de lissage Acier AISI D2.....	33
•	Les équations de lissage Acier inoxydable à 12% Cr.....	34
•	Les équations de lissage Tôle d'acier à faible teneur en carbone.....	35
•	Conclusion et perspective.....	36
	Références.....	37

Liste de figures

Figure I-1	Courbe de Wöhler théorique	06
Figure I-2.	Paramètres de contrainte utilisés pour définir le chargement d'amplitude constante.....	08
Figure I-3.	Courbe S-N typique.....	09
Figure I-4.	Machine d'essai de fatigue par ultrasons	10
Figure I-5.	Courbes de Wöhler pour l'alliage de titane de nuance Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo.....	11
Figure I-6.	Effet de la corrosion sur le comportement en fatigue.....	12
Figure I-7.	Comparaison des courbes S-N pour le cuivre avec deux granulométries différentes.....	12
Figure II-1.	Courbe en traction compression pour alliage de titane de nuance Ti 6Al-4V.....	13

Figure II-2. Courbe en traction compression pour alliage de nickel.....	14
Figure II-3. Courbe en traction-compression le superalliage de nickel	15
Figure II-4. Courbe en traction-compression pour les données de fatigue de l'alliage d'aluminium	16
Figure II-5. Courbe en traction-compression Données de fatigue de l'alliage d'aluminium.....	16
Figure II-6. Courbe en traction-compression pour le cuivre UFG.....	16
Figure II-7. Courbe en traction-compression pour les tôles d'acier à faible teneur en carbone.....	17
Figure II-8. Courbe en traction-compression pour l'acier inoxydable.(X5CrNiCuNb17-04)	18
Figure II-9. Courbe en traction-N pour l'acier inoxydable 304(X2CrNi19-11)	18
Figure II-10. Courbe en traction-compression pour de l'acier inoxydable à 12% Cr.....	19
Figure II-11. Courbe en traction-compression (a) acier ressort Cr-V.....	19
Figure II-12. Courbe en traction-compression, f=20 kHz: (b) Acier ressort Cr-Si.....	20
Figure II-13. Courbe en traction-compression pour l'acier (X153CrMoV12) (a).....	21
Figure II-14. Courbe en traction-compression pour l'acier (X153CrMoV12) (b)	21
Figure III-1. Get data Graph Digitizer	24
Figure III-2. Curve expert pro2.7.....	25
Figure III-3. Lissage d'une courbe a partir des points de données	25
Figure III-4Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'alliage de titane de nuance Ti 6Al-4V	28
Figure III-5Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'alliage de nickel de nuance Ni Cr19-Co18-Mo4-Ti3-Al3 (Udimet 500).....	29
Figure III-6Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'alliage d'aluminium (AlCu4Mg1).....	30
Figure III-7Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour le cuivre UFG.....	31
Figure III-8Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'acier ressort Cr-Si.....	32
Figure III-9Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'acier AISID2.....	33
Figure III-10Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'acier inoxydable à 12% Cr.....	34
Figure III-11Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'acier à faible teneur en carbone	35

Liste de tableaux

Tableau I.6 Essais de fatigue par ultrasons par rapport aux essais de fatigue conventionnels.....	10
Tableau II.6 Désignation des matériaux.....	22
Tableau III.1 Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'alliage de titane Ti 6Al-4V.....	28
Tableau III.2 Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'alliage de nickel (Udimet 500).....	29
Tableau III.3 Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'alliage d'aluminium (AlCu4Mg1).....	30
Tableau III.4 Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'alliage du cuivre UFG.....	31
Tableau III.5 Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'acier ressort Cr-Si	32
Tableau III.6 Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'acier AISI D2.....	33
Tableau III.7 Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'acier inoxydable à 12% Cr	34
Tableau III.8 Lois de lissage de la courbe d'endurance pour tôle d'acier à faible teneur en carbone.....	35

Nomenclature

N	Nombre de cycles
σ ou S	Contrainte de charge appliquée
σ_m	La contrainte moyenne
σ_e	L'amplitude de la contrainte
σ_{max}	La contrainte maximale
σ_{min}	La contrainte minimale
R	Rapport de charges
n	taille de l'échantillon
s	écart type d'échantillon
σ_D	La limite d'endurance
e	Erreur type de la moyenne
$a, b, \text{ et } \theta$	Constantes déterminées
f	Fréquence
x_i, \dots, x_n	ensemble de données de l'échantillon
r	Coefficient de corrélation
r^2	Coefficient de Détermination
\bar{x}	valeur moyenne de l'échantillon de données
n	taille de l'échantillon de données
σ_{max}	La contrainte maximale
σ_{min}	La contrainte minimale
σ_u	La contrainte de rupture
σ_e	La limite d'élasticité
σ_D	La limite d'endurance
$C, a, b \text{ et } \beta$	Constantes déterminées expérimentalement utilisées par Basquin
$A, B, C, E, a \text{ et } b$	Constantes déterminées de l'expérimentale utilisés par Corson et Bastenaire
R_m	Résistance à la rupture en traction

INTRODUCTION GENERALE

Le phénomène de fatigue est responsable de la ruine des pièces mécaniques et peut être d'autant plus important que les sources de fatigue sont nombreuses. La conception des structures est basée sur vérification de la résistance aux chargements cycliques, où les méthodes de calcul de la durée de vie dépendent du domaine d'endurance étudié. Le phénomène de fatigue comprend trois domaines : le domaine oligocyclique où le nombre de cycles est considéré « faible », le domaine d'endurance limité où la rupture apparaît pour un nombre de cycles limité et le domaine d'endurance illimité pour lequel la durée de vie est considérée « infinie ». Il est aujourd'hui courant de trouver des structures sollicitées au-delà de 10 millions de cycles et parfois au-delà du milliard de cycles. Ce domaine est appelé fatigue giga-cyclique ou fatigue à très grand nombre de cycles (Very High Cycle Fatigue ; $N > 10^7$ cycles). Caractériser la résistance en fatigue dans le domaine giga-cyclique est donc essentiel. En effet, une courbe d'endurance est le moyen le plus courant d'analyse et de prédiction de la durée de vie de ces structures dans le cadre de la fatigue des matériaux.

L'objectif de notre étude est de proposer une modélisation des courbes d'endurance en choisissant le modèle le mieux adapté aux données expérimentales. Ce choix est basé sur le coefficient de corrélation et l'erreur standard de la moyenne. Pour ce faire, notre étude requiert l'utilisation du logiciel dénommé 'Curve expert professionnel' qui permet de faire le lissage en calculant les paramètres des modèles disponibles en spécifiant pour chacun des modèles les coefficients de corrélation. Le modèle adopté permettra de faire ultérieurement un calcul prévisionnel en durée de vie.

Ce mémoire se compose de trois chapitres : le premier chapitre est consacré à des généralités sur le phénomène de fatigue. Le second chapitre traite de la fatigue dans le domaine giga-cyclique en se focalisant sur le comportement de certains matériaux vis-à-vis de la fatigue à grand et très grand nombre de cycles. Le troisième chapitre représente notre contribution qui consiste en une proposition d'une procédure de détermination de modèles mathématiques décrivant la courbe d'endurance. A cet effet, nous exploitons les résultats obtenus par la simulation pour laquelle nous comparons, pour chacun des matériaux considérés, les coefficients de corrélation donnés par chacun des modèles. Ceci nous conduit au choix du modèle mathématique le mieux ajusté aux données expérimentales. Nous achevons ce chapitre par une conclusion générale et des perspectives à ce travail.

Chapitre 1 : Fatigue des matériaux

I.1 Introduction

Le mot fatigue est utilisé fréquemment en science de l'ingénierie pour montrer l'endommagement, la fissuration et la rupture des matériaux sous des sollicitations mécaniques cycliques. Le premier vrai travail de recherche sur métal a commencé en 1842 à cause d'un accident de chemin de fer à côté de Versailles en France. Cet accident a causé 1500 à 1800 morts à l'époque. [1]

Devant cette nécessité compétitive, ils se sont orientés vers l'étude du domaine de l'endurance limitée. Ce domaine qui intéressait peu de chercheurs, constitue actuellement un axe important de leurs recherches devant la forte demande industrielle. La fatigue des métaux est un phénomène souvent méconnu qui est responsable d'environ 75% de rupture de pièces en service.[2]

En ingénierie, la fatigue terminologique est un endommagement structurel progressif des matériaux sous des charges cycliques. La fatigue mécanique pourrait être décrite comme un dommage induit par l'application des contraintes et de déformations fluctuantes.

Le pouvoir dévastateur du phénomène de fatigue est souligné par le fait que très souvent la rupture finale par fatigue se produit à des contraintes bien inférieures à la limite d'élasticité du matériau. La durée de vie à la fatigue est une caractéristique importante d'un composant d'ingénierie et est mesurée par un nombre de cycles qu'il peut supporter avant la rupture par fatigue. Basé sur le concept de la durée de vie en fatigue, la fatigue mécanique pourrait être subdivisée en:

-Fatigue à nombre de cycles bas (LCF) - jusqu'à environ 10^4 cycles.

-Fatigue à grand nombre de cycles (HCF) - entre environ 10^4 et 10^7 cycles.

-Fatigue à très grand nombre de cycles (VHCF) - plus de 10^7 cycles.

La fatigue représente le sujet principal de ce travail. Avec les progrès du développement technologique, la durée de vie à la fatigue requise pour de nombreux composants a augmenté pour dépasser 10^8 cycles de charge. Aujourd'hui, la fatigue à très grand nombre de cycles constitue l'un des principaux critères de conception pour un certain nombre d'applications dans les domaines aéronautique, automobile, ferroviaire et autres. Quelques exemples de tels composants sont : les disques de turbine à gaz (10^{10} cycles), le moteur de voiture culasses et blocs (10^8 cycles), roulements à billes, perceuses à haute fréquence, moteurs diesel de navires et de trains à grande vitesse (10^9 cycles), etc.

Même si une grande quantité de données de fatigue est disponible sous forme de courbes S-N, ces résultats sont souvent limités à 10^7 cycles de charge, après quoi le matériau est souvent considéré comme ayant une vie infinie. Une telle hypothèse de limite de fatigue (contrainte maximale à laquelle le matériau peut maintenir un nombre illimité de cycles) était suffisamment satisfaisante dans le passé lorsque les composants d'ingénierie dont on ne s'attend guère à ce qu'ils durent plus de 10^7 cycles de charge.

Au vu des développements technologiques actuels, La fatigue à très grand nombre de cycles des matériaux est devenue un sujet d'intérêt majeur. Il est important de connaître avec un bon

degré de certitude le comportement en fatigue d'un matériau lorsqu'il est soumis à $10^8 - 10^{10}$ cycles de charge, qu'il ait une limite de fatigue ou présente une réponse contrainte-durée de vie décroissante en permanence. Cette ambiguïté pourrait être levée par l'expérience.

Les contraintes de temps et de coût entravent l'utilisation des essais de fatigue conventionnels dans la gamme à grand nombre de cycles. Au lieu, les machines de fatigue piézoélectriques ont évolué, ce qui a permis des essais efficaces et fiables dans cette gamme souhaitée. Ils sont capables de produire 10^{10} cycles en moins d'une semaine (à 20 kHz), alors qu'il faudrait plus de quelques années pour la même expérience en utilisant un équipement conventionnel. [3]

I.2 Les domaines de fatigue

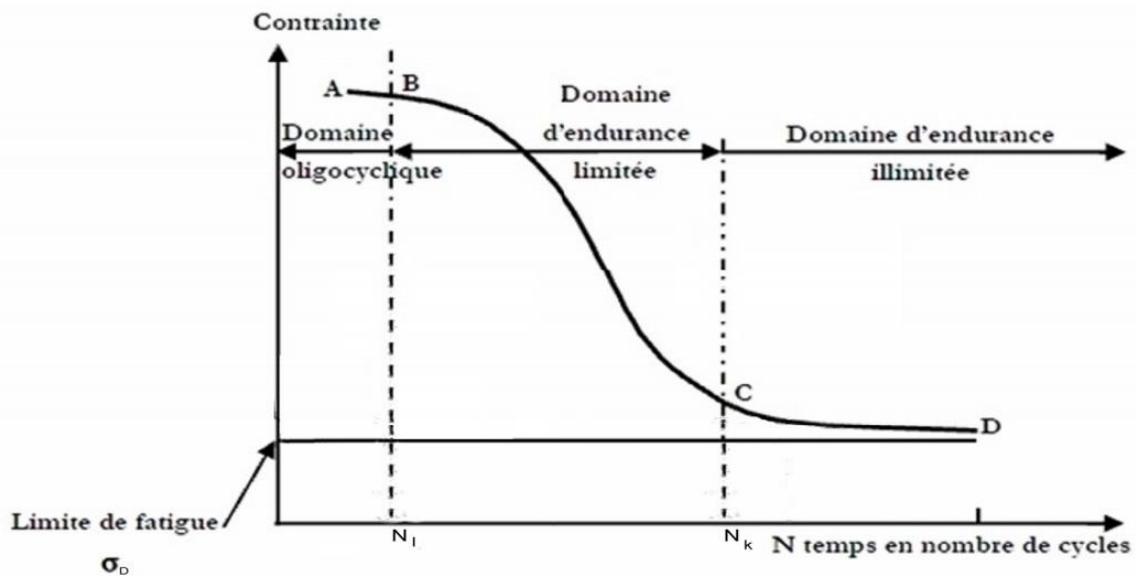


Figure I-1 Courbe de Wöhler théorique [4]

- **Fatigue oligocyclique**

La zone AB dite zone de fatigue oligocyclique est caractérisée par des contraintes se situant entre la contrainte de rupture et la limite d'élasticité. La rupture survient après une durée de vie faible (N est de l'ordre inférieur à 10^4 cycles). En outre, ces contraintes sont généralement associées à des déformations plastiques considérables [4].

- **Fatigue limitée**

La zone BC dite zone de fatigue limitée (ou endurance limitée) est caractérisée par des contraintes en dessous de la limite d'élasticité. Le nombre de cycles à la rupture N croît quand l'amplitude de contrainte décroît. La rupture survient après un nombre limité de cycles, compris approximativement entre 10^4 et 10^7 cycles, sans être accompagnée de déformations plastiques [4,5]. La contrainte au point D est appelée limite d'endurance ou limite de fatigue.

- **Fatigue illimitée**

La zone CD est dite zone de fatigue illimitée (ou endurance illimitée). Après le point C la droite (asymptote parallèle à l'axe des N) présentée par la courbe de Wöhler tend vers une contrainte limite asymptotique. A partir de ce point il n'y a pas de rupture fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué [4,5]. La contrainte au point D est appelée limite d'endurance ou limite de fatigue.

- **Expressions mathématiques de la courbe d'endurance**

Pour modéliser la courbe d'endurance diverses expressions analytiques ont été proposées pour décrire les domaines à endurance limitée et illimitée. Ces équations permettent de tracer la courbe d'endurance c'est-à-dire le nombre de cycles à rupture en fonction de l'amplitude de la contrainte appliquée.

Dans le domaine à endurance limité, les principales expressions sont les suivantes:

- Formule de Wöhler [6,7] : constitue la plus ancienne courbe d'endurance, elle fut proposée par Wöhler :

$$a - b \cdot \sigma = \log(N) \dots \dots \dots (I.1) \quad \text{Avec } a > 0 \text{ et } b > 0$$

Nous remarquons que lorsque N tend vers l'infini, la contrainte tend aussi vers l'infini te. C'est pour cette raison que cette relation n'est valide que dans le domaine à endurance limité de la courbe d'endurance.

- Formule de Basquin [6,7]: Basquin a proposé en 1910 la formule suivante :

$$a - b \cdot \log(\sigma) = \log(N) \dots \dots \dots (I.2)$$

Où $N \cdot \sigma^b = C \dots \dots \dots (I.3)$ et en posant $\beta = \frac{1}{b}$ et $\ln C = \frac{a}{b}$

b est nommé index de la courbe de fatigue.

Les relations présentent la zone à endurance limitée. L'amplitude de la contrainte ne tend pas vers la limite σ_D lorsque le nombre de cycle N tend vers l'infini.

Pour les deux domaines à endurance limité et illimité, les principales relations sont les suivantes:

- Formule de Stromeier [6] : Stromeier a proposé en 1914 la relation suivante :

$$\ln(\sigma - \sigma_D) = a - b \log(N) \dots \dots \dots (I.4)$$

Où

$$\sigma = \sigma_D \left(\frac{C}{N} \right)^{1/b} \dots \dots \dots (I.5)$$

On remarque que lorsque la contrainte σ tend vers la limite d'endurance σ_D lorsque le nombre de cycles N tend vers l'infini.

- Formule de Palmgreen: Cette formule a été proposée en 1924:

$$\sigma = \sigma_D + \left(\frac{C}{A+N}\right)^{1/b} \dots\dots\dots (I.6)$$

➤ Formule de Weibull (1949):

$$\frac{\sigma - \sigma_D}{R_m - \sigma_D} = \left(\frac{C}{A+N}\right)^{1/b} \dots\dots\dots (I.7)$$

➤ Formule de Corson (1949) [6] :

$$\sigma - \sigma_D \cdot A^{\sigma - \sigma_D} = \frac{C}{N} \dots\dots\dots (I.8)$$

➤ Formule de Bastenaire [6,7] :

$$(N + B) \cdot (\sigma - \sigma_D) \cdot e^{A \cdot (\sigma - \sigma_D)} = C \dots\dots\dots (I.9)$$

Pour toutes ces relations N désigne le nombre de cycle, σ la contrainte appliquée, σ_D la limite d'endurance et A,B,C,a,b sont des constantes déterminées à partir des données expérimentales.

I.3 Méthode d'essai

L'objectif des essais de fatigue est d'établir la résistance d'un matériau vis-à-vis d'un chargement cyclique et répété. En effet, un essai de fatigue met en évidence la capacité des matériaux à résister aux charges cycliques. Si un matériau est chargé cycliquement, cela signifie qu'il subit une charge répétée d'un certain caractère, qui dans la plupart des cas est soit une flexion, une torsion, une charge de traction ou une combinaison de ces types de chargement. Un cycle de charge est caractérisé par un rapport de charge $R = (\sigma_{\min}) / (\sigma_{\max})$ et amplitude de contrainte $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$.

Pour cela, les résultats de fatigue avec un chargement d'amplitude constante sont discutés. Les autres paramètres décrivant les essais cycliques sont la contrainte moyenne $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$ et l'étendue de contraintes $\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$. Figure I.2.

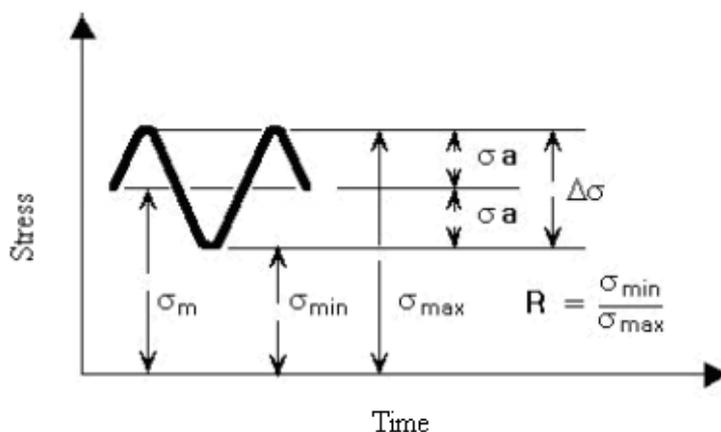


Figure I-2. Paramètres de contrainte utilisés pour définir le chargement d'amplitude constante.[3]

La résistance à la fatigue est mieux définie à un certain nombre de cycles et pourrait être présentée sous la forme d'une courbe « contrainte - nombre de cycles » ou en terminologie

anglo-saxonne (Stress-Number of cycles connu sous le terme S-N), établie par les résultats expérimentaux .FigureI.3.

La résistance à la fatigue en référence à un certain nombre de cycles de charge décrit un niveau de contrainte auquel il existe une probabilité de 50% qu'un matériau tombe en panne en raison de dommages de fatigue. Contrairement à la résistance à la fatigue, une limite de fatigue est un niveau de contrainte en dessous duquel aucune rupture de fatigue n'est attendue quel que soit le nombre de cycles de charge supportés par le matériau. En ce qui concerne la fatigue à très grand nombre de cycles, l'une des tâches principales est d'étudier s'il existe ou non une limite de fatigue pour différents matériaux, ainsi que d'établir leurs résistances à la fatigue à 10^7 nombre de cycles de charge et plus.

I.4 Représentation du diagramme S-N

La base de la méthode contrainte-durée de vie est le diagramme S-N de Wöhler, représenté schématiquement pour deux matériaux sur la figure I-3. Le diagramme S-N représente l'amplitude de la contrainte nominale S en fonction des cycles jusqu'à la rupture à N cycles. Il existe de nombreuses procédures d'essai pour générer les données requises pour un diagramme S-N représentatif. Les données d'essai S-N sont généralement affichées sur un tracé , la courbe S-N réelle représente la moyenne des données expérimentales de plusieurs essai de fatigue.

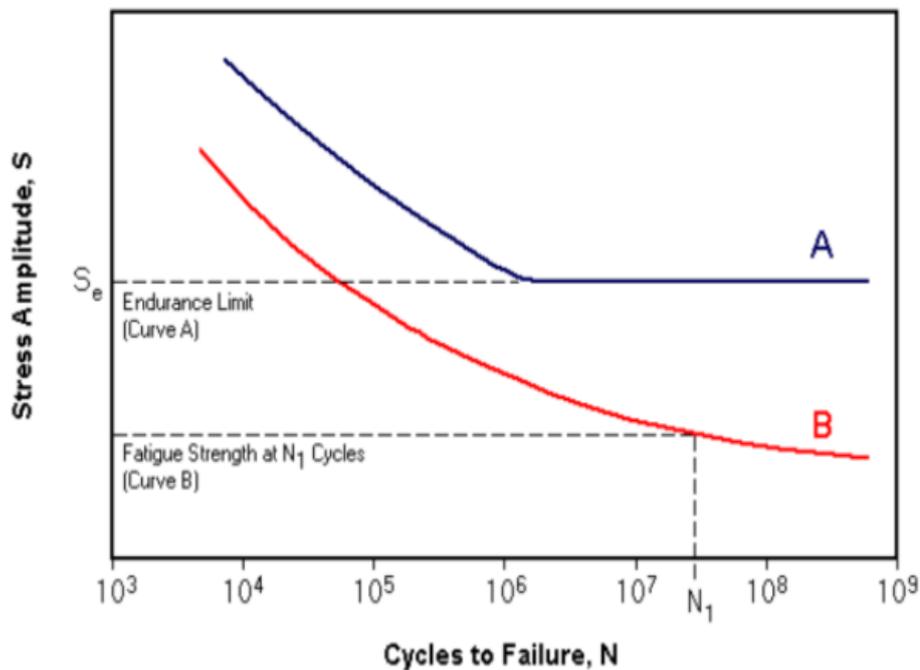


Figure I-3 .Courbe S-N typique [8]

I.5 Essai de fatigue par ultrasons

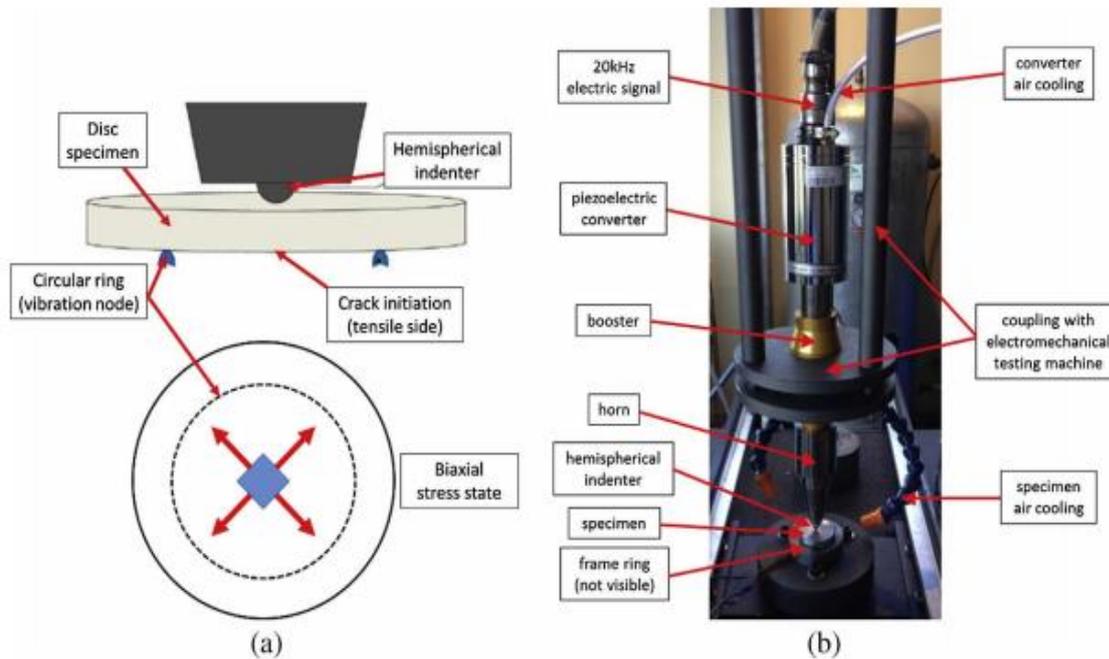


Figure I-4. Machine d'essai de fatigue par ultrasons [9].

Comme mentionné précédemment, les essais de fatigue conventionnels n'ont pas la capacité pratique de fournir des résultats de fatigue dans la gamme à très grand nombre de cycles. Cela pourrait être accompli avec succès en utilisant une machine d'essai de fatigue par ultrasons. Figure I-4. La fréquence des essais de fatigue par ultrasons varie de 15 à 30 kHz, la fréquence typique étant de 20 kHz. Cela permet une réduction drastique du temps de l'essai et par la suite du coût de l'expérimentation. Le tableau 1 illustre une comparaison entre les machines d'essai conventionnelle et ultrasonique en terme de durée d'expérimentation.

I.6 Tableau

Essais de fatigue par ultrasons par rapport aux essais de fatigue conventionnels.

Essai de fatigue à un nombre de cycles N	Durée d'essai pour une machine de fatigue ultrasonique (20 kHz)	Durée de l'essai pour une machine de fatigue conventionnelle (à une fréquence de 100 Hz)
N=10 ⁷ cycles	9 minutes	Un jour
N=10 ⁹ cycles	14 heures	4 mois
N=10 ¹⁰ cycles	6 jours	3 années

Le développement d'équipements à ultrasons en combinaison avec la demande de propriétés de fatigue à très grand nombre de cycles de différents matériaux a conduit à un intérêt accru pour les essais de fatigue par ultrasons. La technologie d'essai de fatigue par ultrasons fournit une méthode économique et rapide pour obtenir des données de fatigue dans le régime à très grand nombre de cycles. En outre, il offre un moyen fiable de réaliser des essais avec des taux

extrêmement faibles de croissance de fissures dans le régime de seuil. Voici une brève description de l'équipement pour un essai de fatigue avec une machine à ultrasons.

I.7 Facteurs influents sur le comportement d'un matériau à la résistance à la fatigue

Comme mentionner ci-dessus, un matériaux peut se comporter d'une façon inattendue, alors qu'il fallait chercher la cause de ce comportement pour lequel les recherches ont abouti aux observations suivantes :

- le traitement thermique d'un matériau peut jouer un grand rôle sur son comportement, cela signifie que la microstructure à une grande influence sur la résistance à la fatigue. La Figure I-5 illustre cette observation.

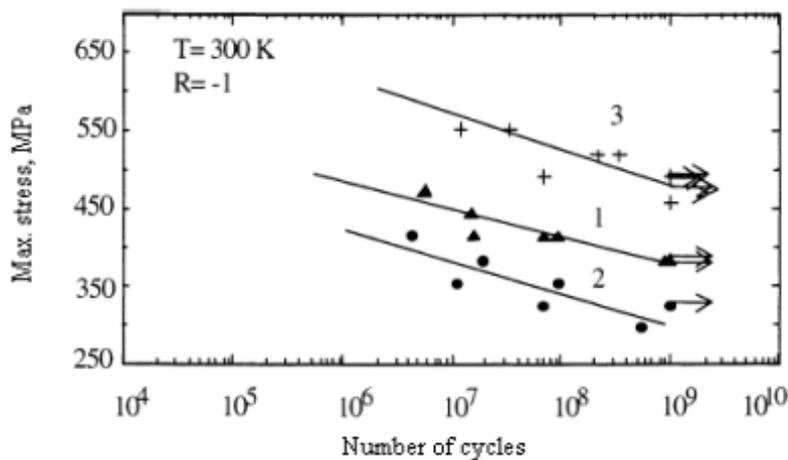


Figure I-5. Courbes de Wöhler pour l'alliage de titane de nuance Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo avec différents traitements thermiques 1-2-3. [10]

-La fréquence à aussi une influence sur la résistance des matériaux à la fatigue. Plus la fréquence est grande, meilleure est la résistance à la fatigue. Néanmoins cette observation n'est pas valable pour tous les matériaux.

-Les essais de fatigue réalisés par S. Stanzl-Tschegg et H. Mayer [13], montrent que la corrosion diminue la performance des matériaux. Les auteurs ont constaté que la résistance à la fatigue baisse d'environ 30 à 40% pour un matériau plongé dans un milieu d'eau distillée par rapport au même matériau à l'air ambiant. La Figure I-6 illustre cette remarque.

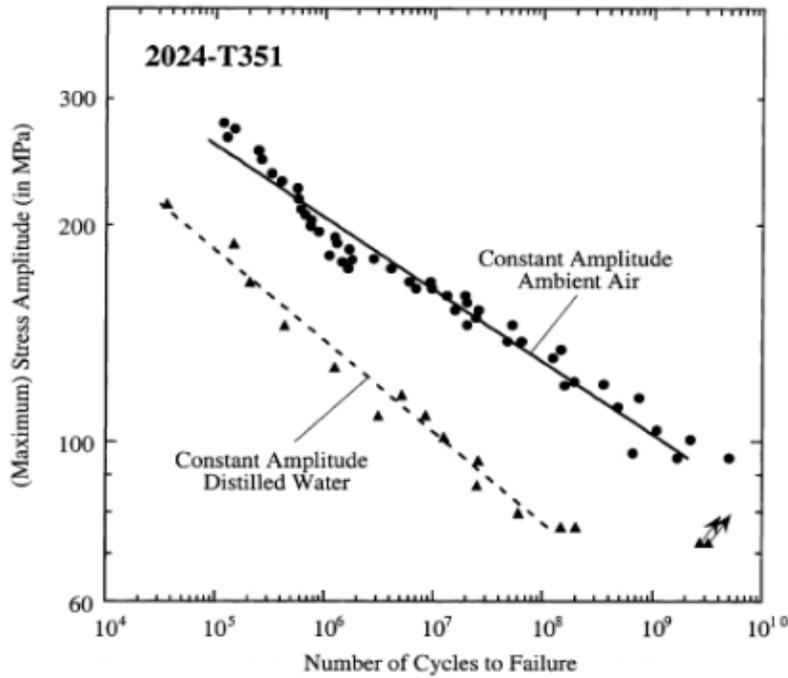


Figure I-6 : Effet de la corrosion sur le comportement en fatigue.[11]

La composition chimique est un facteur qui joue un rôle très important sur la résistance à la fatigue. En effet ce facteur définit l'échelle microscopique de la structure du matériau, là où on peut observer des inclusions, cavités, porosité et autres. La Figure I-7 met en évidence l'influence de la taille des grains sur la tenue en fatigue; en effet, il s'agit du cuivre polycristallin avec deux granulométries différentes à savoir : Granulométries conventionnelles (CG) (environ $10\ \mu\text{m}$) et grains ultrafins (UFG) (granulométrie d'environ $300\ \text{nm}$). On remarque que le plus les grains sont fins, plus la tenue à la fatigue est meilleure.

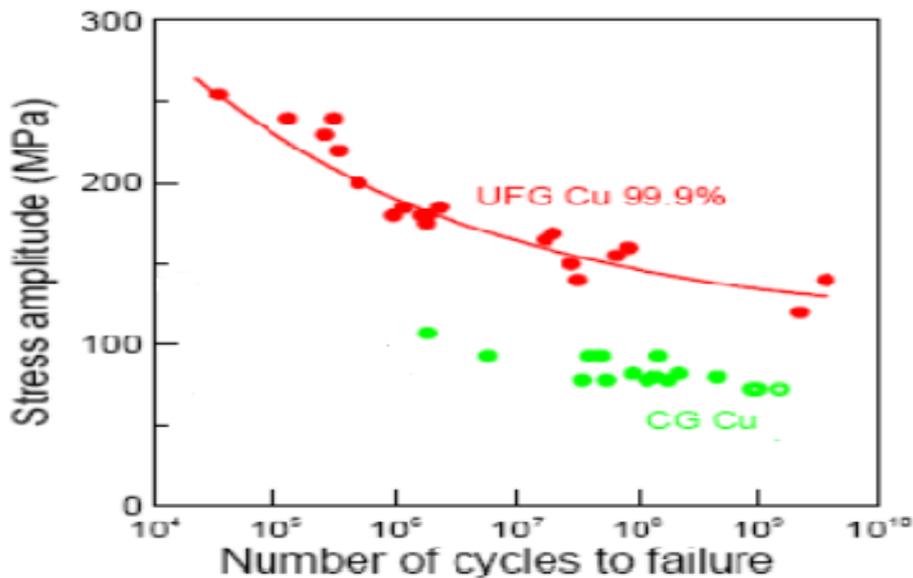


Figure I-7. Comparaison des courbes S-N pour le cuivre avec deux granulométries différentes: CG et UFG.[13]

Chapitre 2: Fatigue à très grand nombre de cycles des matériaux

Le comportement en fatigue à très grand nombre de cycles varie d'un matériau à un autre. La précision de la prédiction basée sur certains modèles théoriques est jusqu'à présent très difficile à atteindre. Par conséquent, les données expérimentales pour différents matériaux, qui ont été générées principalement au cours de la dernière décennie, sont d'une grande importance. Les résultats montrent que certains matériaux affichent une limite de fatigue à généralement 10^6 - 10^7 cycles de charge, tandis que la plupart des autres ne présentent pas cette réponse, montrant une diminution progressive de la résistance à la fatigue lorsque le nombre de cycles est de l'ordre du giga-cycle. En ce qui concerne les propriétés de fatigue à très grand nombre de cycles, les matériaux peuvent être classés en deux classes : les matériaux de type I et de type II. Pour la première classe de matériaux, la différence entre la résistance à la fatigue à 10^6 et 10^9 cycles est inférieure à 50 MPa [10]. À cette catégorie appartiennent les métaux monophasés homogènes ductiles (le cuivre et le nickel sont des représentants typiques) et certains alliages. Les aciers à faible teneur en carbone, certains aciers inoxydables et la fonte à graphite sphéroïdal présentent également un tel comportement.

Les matériaux de type II présentent une diminution de la résistance à la fatigue à 10^9 cycles par rapport à 10^6 cycles dans la plage de 50 à 300 MPa. Cette classe couvre principalement les aciers à haute résistance et autres matériaux contenant des hétérogénéités sous forme d'inclusions, de pores, de particules grossières de seconde phase, qui pourraient tous servir de sites internes d'initiation de fissures de fatigue. Il semble que plus la résistance ultime à la traction d'un matériau est élevée, plus la courbe S-N est raide dans la gamme des giga-cycles. Nous tentons de présenter un aperçu des données fatigue à très grand nombre de cycles disponibles pour différents matériaux. Parmi les matériaux souvent étudiés par les essais de fatigue à très grand nombre de cycles figurent les matériaux ferreux, les alliages de titane, les alliages de nickel, les alliages d'aluminium et le cuivre poly cristallin. Ces matériaux sont largement utilisés dans les industries aéronautiques, aérospatiales, automobiles, ferroviaires et autres. Ils constituent la base pour la fabrication de composants fonctionnant dans des conditions de fatigue à très grand nombre de cycles.

II.1- Alliage de titane

Les alliages de titane jouent un rôle très important dans l'industrie aérospatiale, où la fatigue à très grand nombre de cycles est un phénomène courant. On pense généralement au domaine de fatigue de l'ordre du giga-cycle. [10] L'alliage de titane (Ti 6Al-4V). Qui a été soumis à des essais de fatigue par C. Bathias et al. Avec une fréquence de 20 kHz Les résultats sont présentés sur [Fig. 8] avec des données supplémentaires obtenues dans d'autres laboratoires lors des essais à 20 et 100 Hz. On a pu observer que le comportement en fatigue de l'alliage (Ti 6Al-4V) en régime de fatigue à très grand nombre de cycle est meilleur que celui observé lors des essais de fatigue traditionnels à des fréquences plus basses. En outre, la figure 8 indique suggère qu'en termes de résistance à la fatigue, le matériau ne se dégrade pas beaucoup avec un nombre croissant de cycles lorsqu'il est sollicité dans la gamme de fatigue à très grand nombre de cycles.

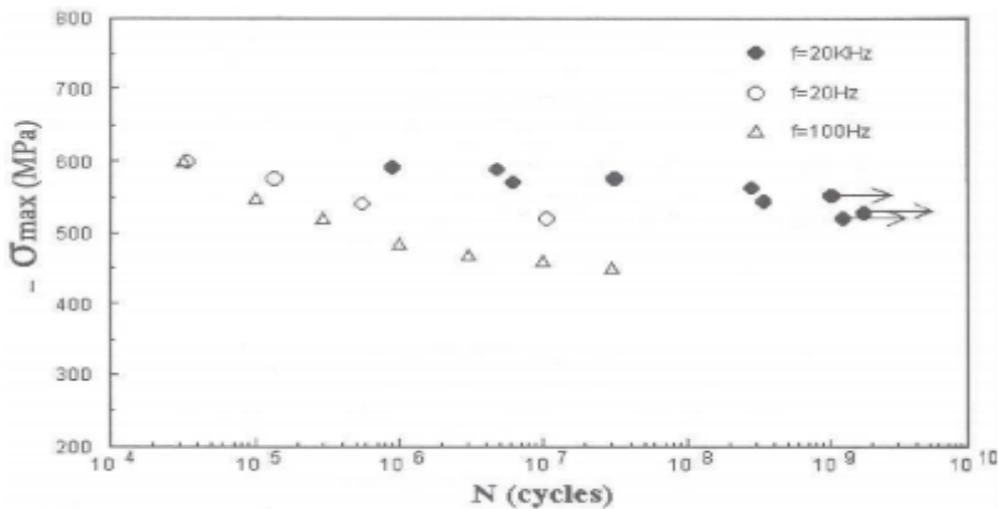


Figure II-1 . Courbe en traction compression pour alliage de titane de nuance Ti 6Al-4V [10].

II.2- Alliage de nickel

La grande famille d'alliages de nickel a été largement utilisée pour des applications à hautes performances telles que, par exemple, les aubes de turbines à gaz et les rotors de turbocompresseurs. Par conséquent, certaines recherches ont été effectuées en ce qui concerne le comportement à la fatigue a très grand nombre de cycle de ces alliages. C. Bathias a étudié l'alliage de nickel de nuance (Ni Cr19-Co18-Mo4-Ti3-Al3) et a constaté que la résistance à la fatigue diminue de 200 MPa lors du passage de 10^6 à 10^9 cycles de charge [Fig. 9]. En plus de cela, l'effet de la fréquence sur les résultats expérimentaux de fatigue a été jugée insignifiant pour ce matériau.

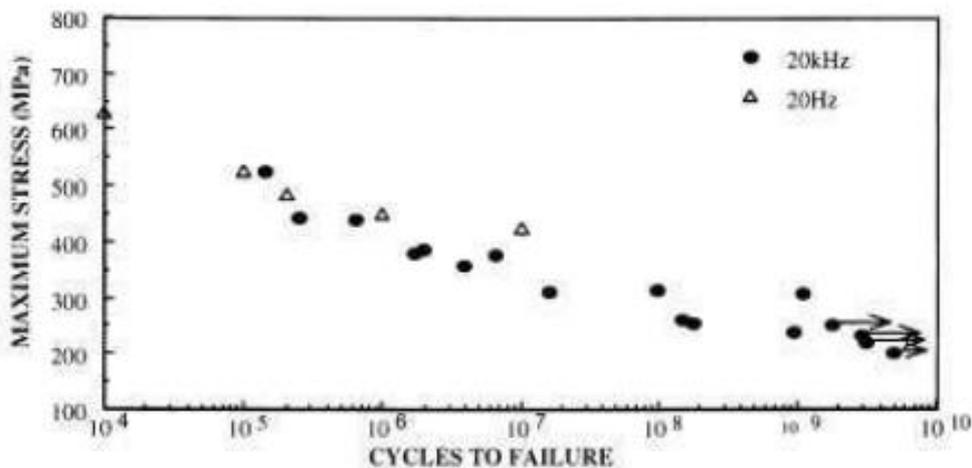


Figure II-2. Courbe en traction compression pour alliage de nickel de nuance Ni Cr19-Co18-Mo4-Ti3-Al3. [11].

Un autre exemple présente les performances de fatigue à grand nombre de cycles à haute température du superalliage de nickel de nuance N18 (Ni - 11,5Cr - 15,6Co - 6,47Mo- 4,41Al - 4,37Ti) utilisé pour la fabrication de disques de turbine sur la figure 10.

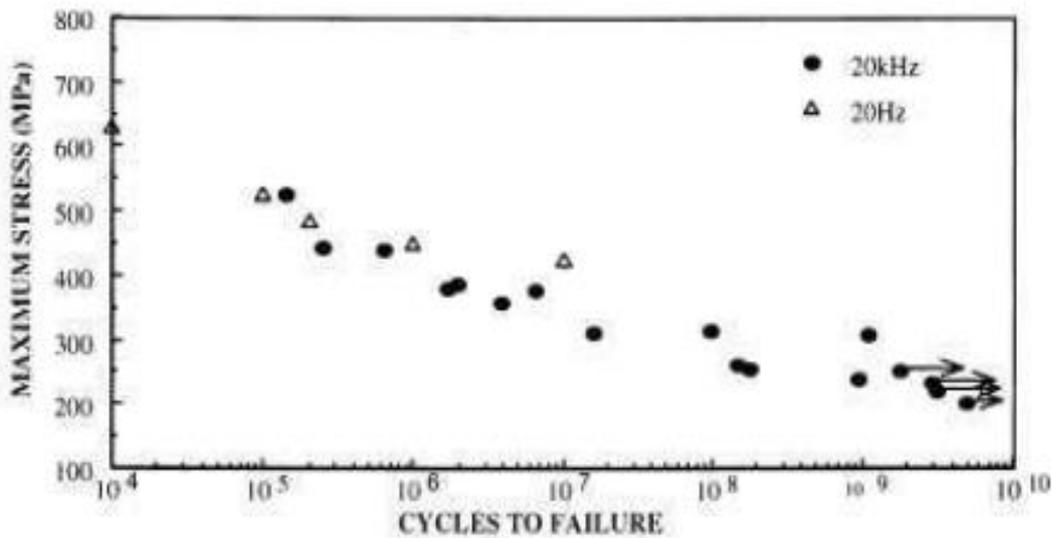


Figure II-3. Courbe en traction-compression le superalliage de nickel de nuance N18 (Ni - 11,5Cr - 15,6Co - 6,47Mo- 4,41Al - 4,37Ti) à 450 ° C [11].

II.3- Alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium constituent une autre catégorie importante de matériaux utilisés pour la fabrication de composants soumis à la fatigue à très grand nombre de cycle. Quelques résultats obtenus par des machines de fatigue par ultrasons sont présentés sur la figure II-4.

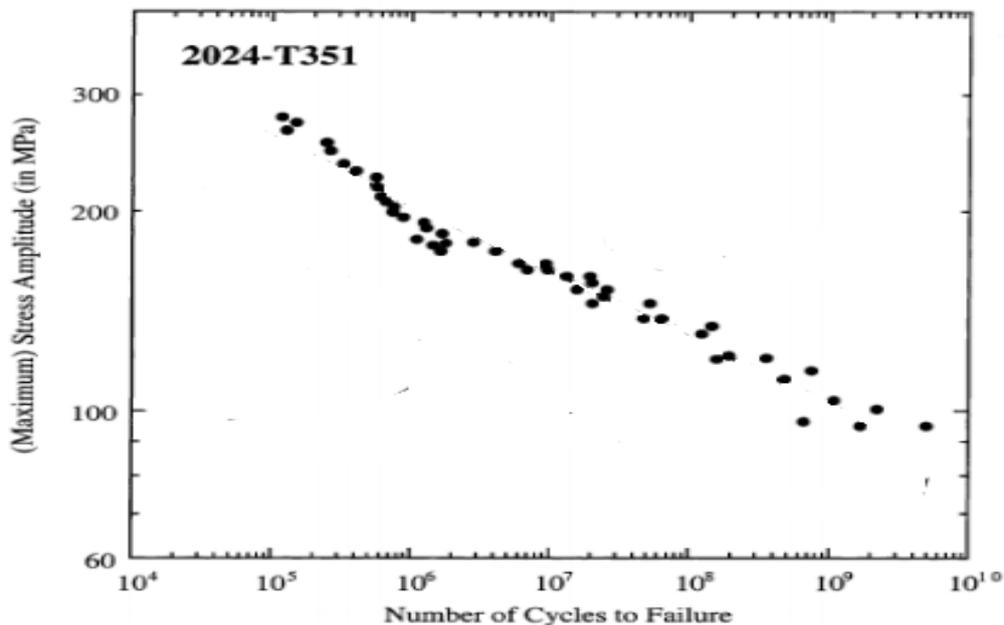


Figure II-4. Courbe en traction-compression pour les données de fatigue de l'alliage d'aluminium 2024-T351 (AlCu4Mg1).[12]

La figure montre les résultats expérimentaux de fatigue obtenus pour deux alliages d'aluminium, à savoir les nuances AlZnMgCu1.5 et AlMg1SiCu. Ces essais ont été réalisés à fréquence ultrasonores. Les données expérimentales réalisées indiquent que ces matériaux n'ont pas montré de limite de fatigue entre 10⁵ et 10⁹ cycles de charge.

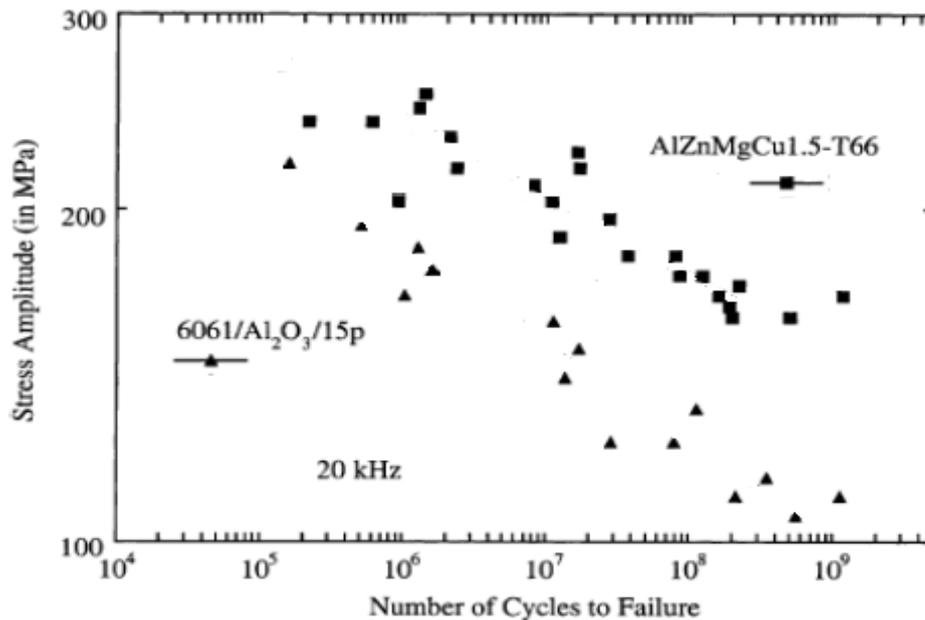
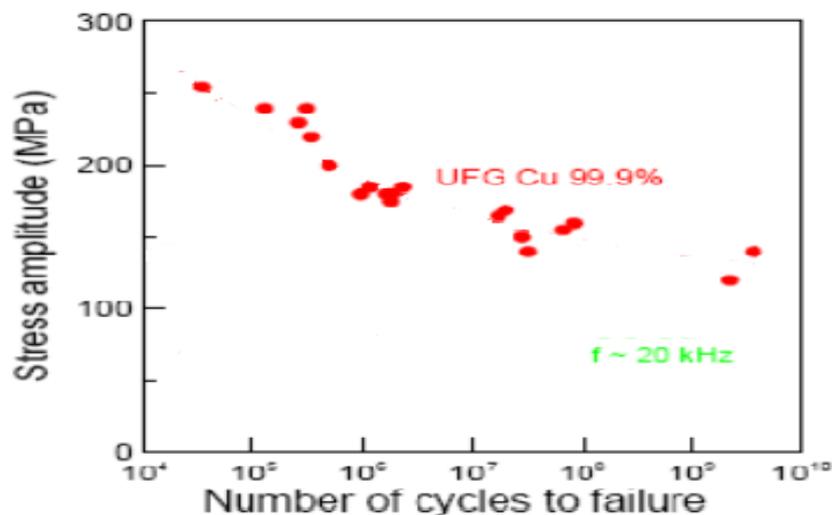


Figure II-5. Courbe en traction-compression Données de fatigue de l'alliage d'aluminium de nuances AlZnMgCu1.5-T66 (carrés) et AlMg1SiCu (triangles), déterminées à 20 kHz. [12]

II.4- Le cuivre

En tant que métal ductile monophasé, le cuivre est un représentant typique du matériau du type I. Le cuivre (Cu-99) pur ne présente pas de défauts communs, tels que des inclusions ou la porosité, pour l'initiation de la rupture par fatigue dans le domaine de fatigue à très grand nombre de cycles. En ce qui concerne la fatigue du cuivre, on pense qu'il existe une certaine amplitude de charge seuil en-dessus de laquelle se développent des bandes de glissement persistantes (PSB) qui conduisent alors à la fissuration des bandes de cisaillement, enfin, à la rupture. Lorsque le matériau est chargé à des niveaux inférieurs à ce seuil, les PSB ne seraient pas produits dans le domaine de fatigue à grand nombre de cycles, Figure II-6.



6. Courbe en traction-compression pour le cuivre UFG.[13]

Figure II-

II.5. Fatigue à très grand nombre de cycles des aciers

Nous relatons est un bref aperçu des résultats de fatigue à très grand nombre de cycles obtenus à partir des essais de différents aciers qui sont actuellement utilisés pour des applications à très longue durée de vie. Sauf indication contraire, les données de fatigue présentées ont été réalisées par des essais de fatigue en traction-compression à l'aide d'un équipement à ultrasons. Les essais ont été effectués à l'air en utilisant un refroidissement supplémentaire afin de maintenir une température ambiante des éprouvettes. A titre de comparaison, on introduit une valeur représentant la différence de résistance à la fatigue entre 10^6 et 10^9 cycles de charge.

II.5.1- Tôle d'acier à faible teneur en carbone

L'équipement de fatigue par ultrasons permet également de faire des essais sur des éprouvettes d'une épaisseur inférieure à 1 mm [14]. L'acier ferritique à faible teneur en carbone (C15D) a été testé avec une fréquence $f=20$ kHz et les résultats sont présentés sur la figure II-7. La diminution continue de la résistance à la fatigue avec un nombre croissant de cycles suggère qu'il n'y a pas de limite de fatigue pour ce matériau même si la différence de 25 MPa entre la résistance à la fatigue à 10^6 et 10^9 cycles de charge n'est pas significative.

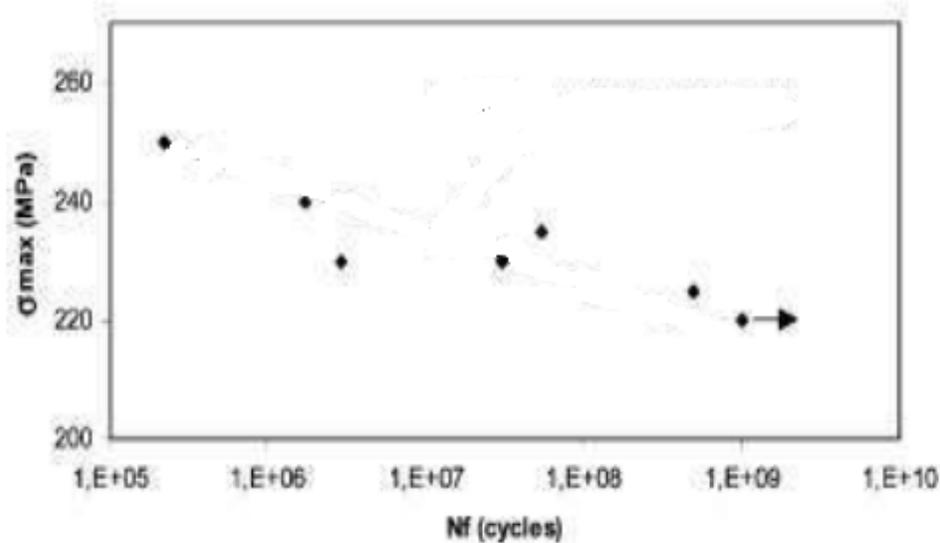


Figure II-7. Courbe en traction-compression pour les tôles d'acier à faible teneur en carbone (C15D) . $f=20$ kHz $\sigma_D = 25$ MPa.[14]

II.5.2 Aciers inoxydables

La diminution significative de 200 MPa de la résistance à la fatigue entre 10^6 et 10^9 cycles est observée pour l'acier inoxydable martensitique 17-4PH (X5CrNiCuNb17-04) figure II-8.[14]. Alors que l'acier inoxydable austénitique 304 (X2CrNi19-11) se comporte d'une manière complètement différente [15] montrant une évolution plutôt asymptotique de la résistance à la fatigue en régime de fatigue à grand nombre de cycles, figure II-9. Pour ce matériau, même si certaines défaillances se sont produites à environ 10^8 cycles de charge, toutes les fissures de fatigue sont de surface. Un autre exemple est un acier inoxydable

martensitique à 12% la figure II-10La différence de la limite de fatigue $\sigma_D = 40$ MPa est plutôt insignifiante et la localisation des initiations de fissures, similaire à l'acier 17-4PH, est en surface jusqu'à 10^7 cycles et en sous-couches à un plus grand nombre de cycles.

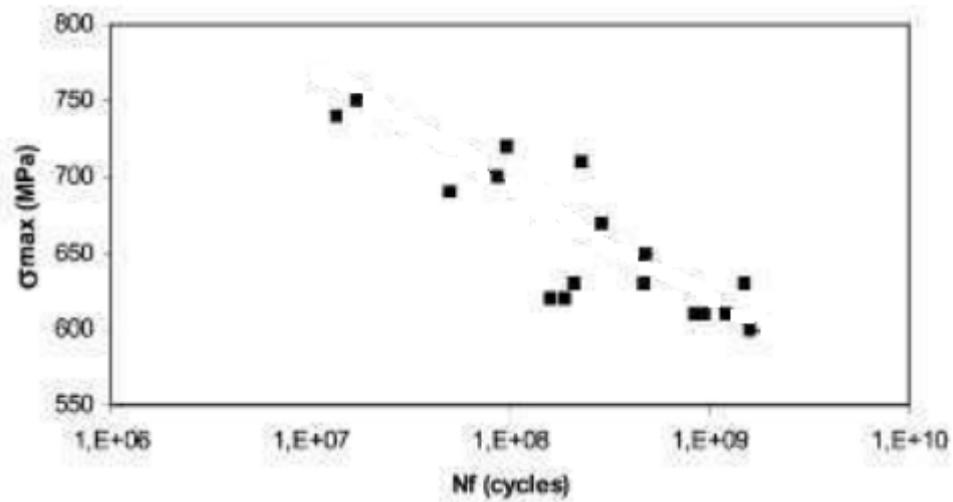


Figure II-8. Courbe en traction-compression pour l'acier inoxydable martensitique 17-4PH. (X5CrNiCuNb17-04) , $f=20$ kHz; $\sigma_D = 200$ MPa [14].

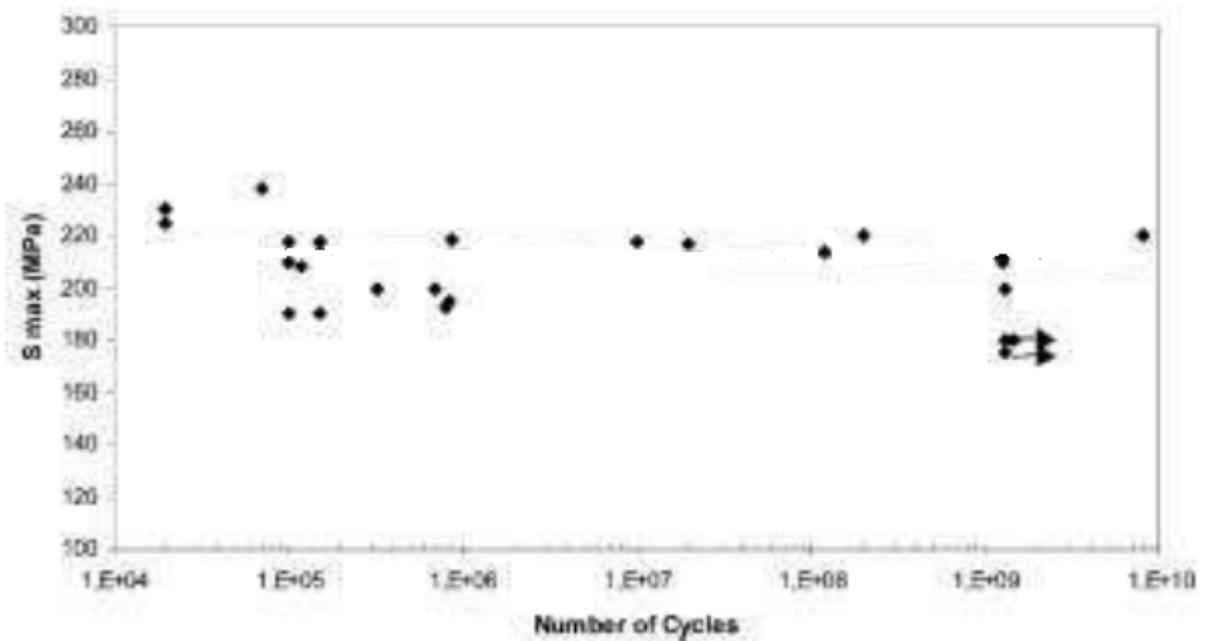


Figure II-9. Courbe en traction-N pour l'acier inoxydable 304(X2CrNi19-11), $f= 20$ kHz. [15]

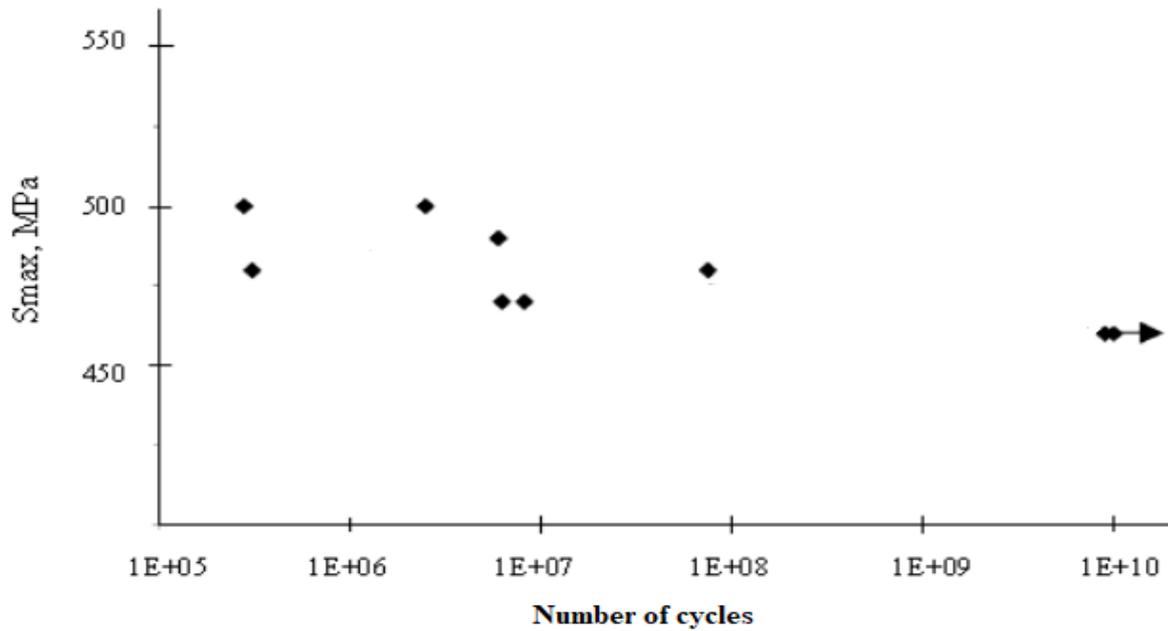


Figure II-10. Courbe en traction-compression pour de l'acier inoxydable à 12% Cr, $f=20$ kHz; $\sigma_D = 40$ MPa [15]

II.5.3 Aciers ressort

Q. Y. Wang et coll. ont étudié [16] deux types d'acier ressort à très haute résistance qui sont largement utilisés dans le secteur automobile : un acier Cr-V de qualité ressort de soupape VSQ et un acier (60Si-7Cr). Les résultats des essais de fatigue par ultrasons à 20 kHz sont présentés sur les figures II-11 et II-12. Il semble que l'acier Cr-V ne se détériore pas en termes de résistance à la fatigue lorsqu'il est soumis à des charges cycliques dans le domaine à très grands nombres de cycles. Alors que l'acier Cr-Si montre une diminution significative ($\sigma_D = 170$ MPa) de la résistance à la fatigue entre 10^6 et 10^9 cycles.

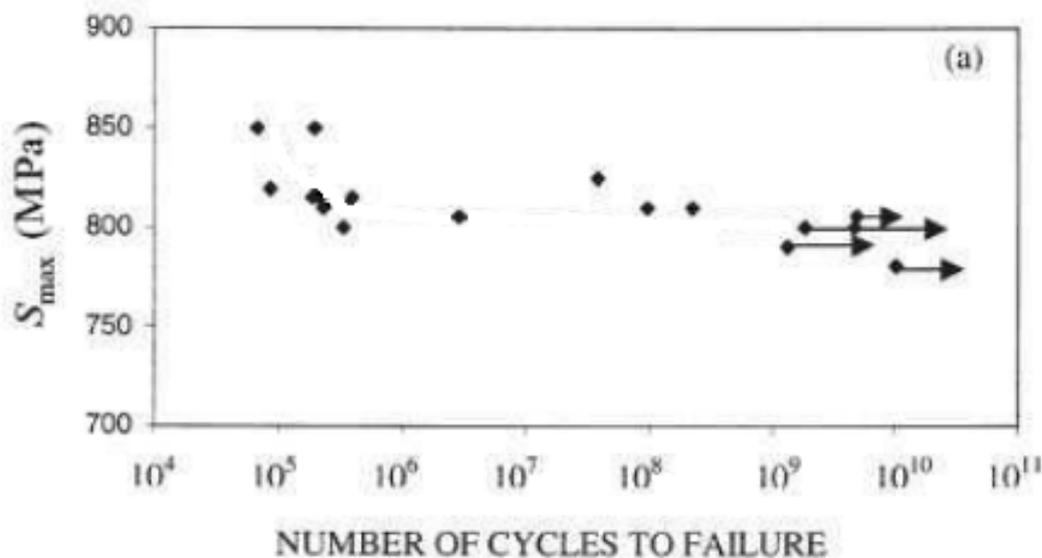


Figure II-11. Courbe en traction-compression (a) acier ressort Cr-V, $\sigma_D = 170$ MPa. [16]

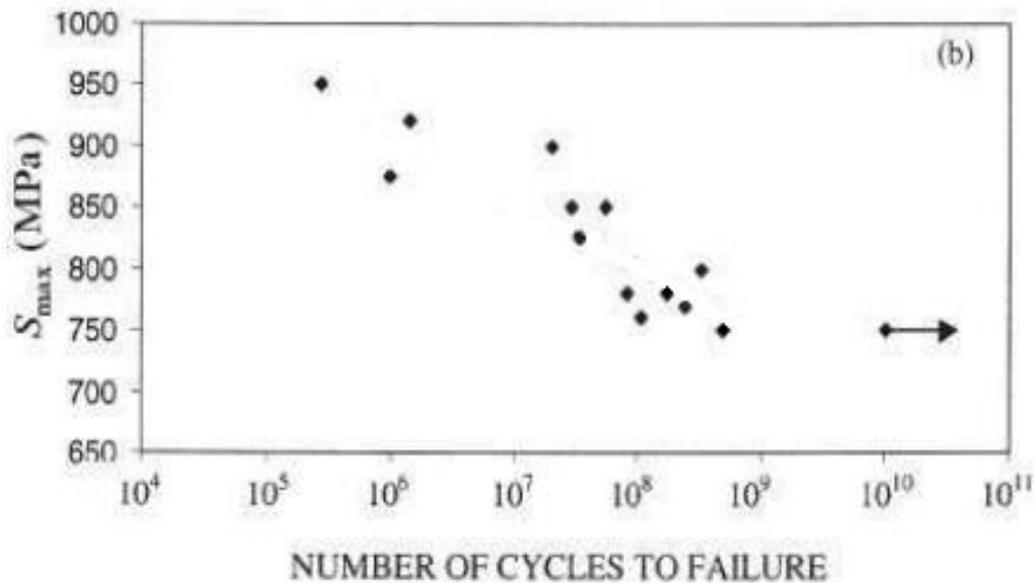


Figure II-12. Courbe en traction-compression, $f=20$ kHz: (b) Acier ressort Cr-Si, $\sigma_D = 170$ MPa [16]

II.5.4 Acier à outils

Les aciers à outils, aussi appelés aciers outil, sont des aciers utilisés pour la fabrication d'outils mécaniques tels que les mèches, dés de matricage, outils de coupe, cisailles, marteaux et burins. L'acier AISI D2 (X153CrMoV12) selon la désignation ISO est un acier à outils pour le travail à froid dans la norme AISI, qui se caractérise par une bonne résistance à la corrosion et une excellente résistance à l'usure de surface. C. Sohar et autres. [17] ont étudié le comportement de fatigue à très grands nombres de cycles de l'acier AISI D2, qui est un acier à outils à teneur moyenne en carbone et à haute teneur en chrome. Il contient de nombreux carbures primaires, nécessaires pour une résistance à l'abrasion et une dureté élevées. Cependant, en ce qui concerne la fatigue, la durée de vie d'un outil fabriqué à partir de ce matériau dépend à la fois de sa résistance à l'abrasion et de ses performances en fatigue. Pour cela, les auteurs ont testé deux séries d'échantillons de ce matériau (K110L-I et K110L-I) avec des contraintes résiduelles de surface élevées et faibles, respectivement. Les résultats des essais par ultrasons à 20 kHz sont présentés sur les figures II-13 et II-14. Nous remarquons, une diminution spectaculaire d'environ 300 MPa de la résistance à la fatigue entre 10^6 et 10^9 cycles.

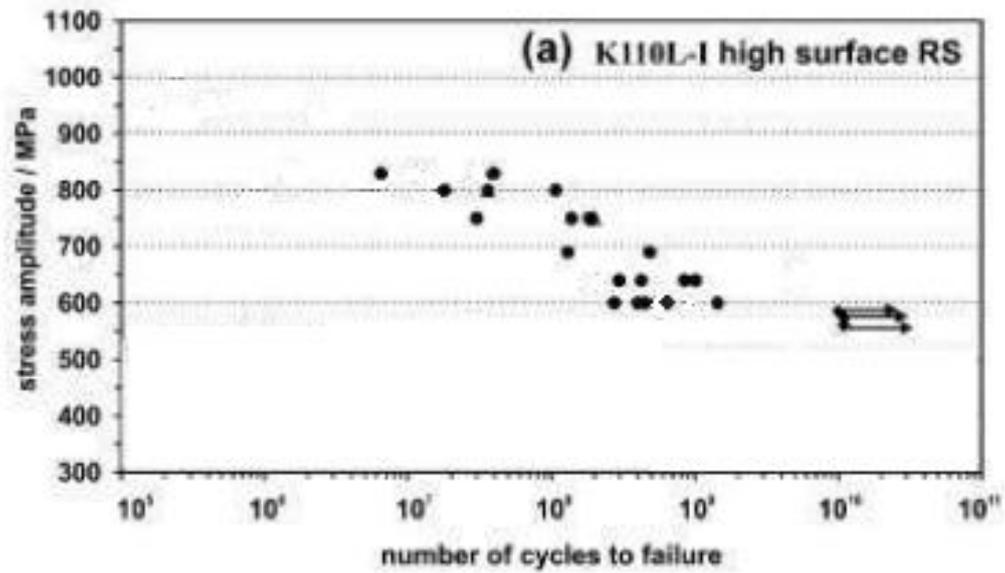


Figure II-13. Courbe en traction-compression pour l'acier (X153CrMoV12) (a) présence des contraintes résiduelles (RS) élevées en surface, $f=20$ kHz; $\sigma_D = 300$ MPa. [17]

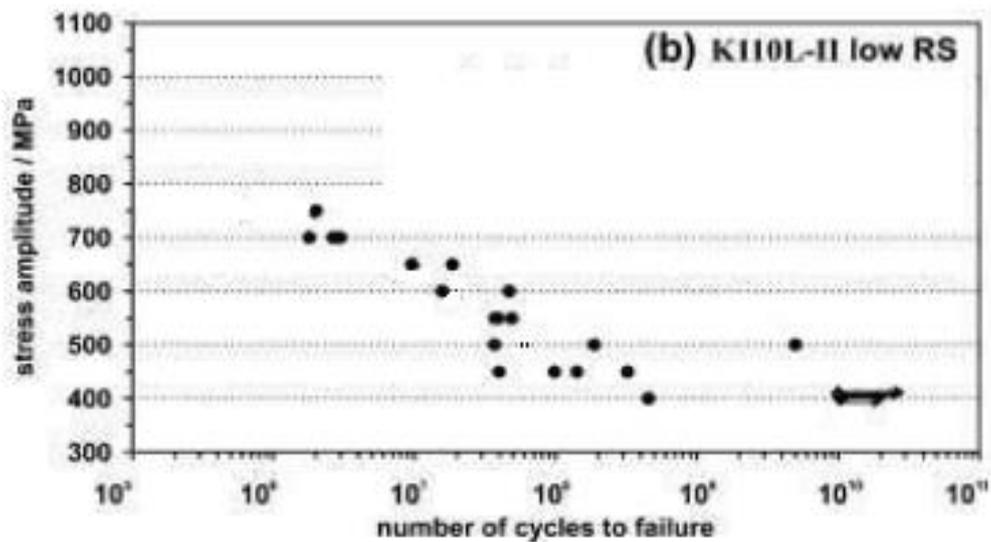


Figure II-14. Courbe en traction-compression pour l'acier (X153CrMoV12) (b) présence des contraintes résiduelles (RS) faibles en surface $f=20$ kHz ; $\sigma_D = 300$ MPa.[17]

II.5.5 Fatigue à très grand nombre de cycles des matériaux en bref :

En général, il est plutôt difficile de prédire le comportement en fatigue à très grand nombre de cycles d'un matériau sans faire des essais expérimentaux. Conformément à la variété croissante de matériaux utilisés dans diverses conditions (température, environnement, état de contrainte, etc.), l'intérêt pour une évaluation approfondie des propriétés du fatigue à très grand nombre de cycles est également en augmentation constante. Les essais de fatigue ultrasoniques sont jusqu'à présent le seul moyen pratique pour étudier le comportement à la fatigue dans le domaine des très longues durées de vie, ce qui implique un développement et une diversification supplémentaires de cette technique.[18]

II.6 Tableau de désignation des matériaux. [19]

matériaux	Désignation ISO
Alliage de titane	Ti 6Al-4V
Nickel de nuance Udimet 500	Ni - 11,5Cr - 15,6Co - 6,47Mo- 4,41Al - 4,37Ti
Alliage d'aluminium 2024-T351	AlCu4Mg1
Cuivre UFG	Cu-99
Acier inoxydable martensitique 17-4PH	X5CrNiCuNb17-04
Acier AISI D2	X153CrMoV12
Acier Cr-Si (ASTM A877)	60Si -7Cr

Chapitre 3 : Lissage des courbes

III- 1 Cadre et objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est de modéliser les courbes de Wöhler par un lissage en partant des données expérimentales données par la littérature. Pour ce faire, la procédure est constituée en trois étapes:

Première étape: en se basant sur les résultats expérimentaux, nous déterminons, via le logiciel 'GetData Graph Digitizer', les coordonnées de chaque point relatif à un résultat expérimental en l'occurrence (le nombre de cycles à la rupture, l'amplitude de contrainte appliquée).

Deuxième étape: collecter tous les points expérimentaux, pour un essai de fatigue donné, et proposer plusieurs expressions mathématiques relatant l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles à la rupture. Pour cela, nous exploitons le logiciel 'Curve expert pro 2.7' lequel fournit une multitude de fonctions mathématiques.

Troisième étape : l'exploitation de diverses fonctions mathématiques nous permet de choisir, parmi la variété de modèles proposés, celui qui donne meilleur ajustement des valeurs expérimentales. Il est clair que le choix s'opère en employant des critères de sélection définis par l'erreur standard et les coefficients de corrélation.

Les expressions mathématiques obtenues seront ultérieurement utilisées pour un calcul prévisionnel en durée de vie adapté à un chargement prédéfini.

III- 2 Présentation des logiciels utilisés

III- 2-1 GetData Graph Digitizer

C'est un programme pour numériser des graphiques et des tracés. Il est souvent nécessaire d'obtenir des données (x , y) originales à partir de graphiques, par ex. à partir des tracés scientifiques numérisés, lorsque les valeurs des données ne sont pas disponibles. GetData Graph Digitizer permet d'obtenir facilement les nombres dans de tels cas. [20]

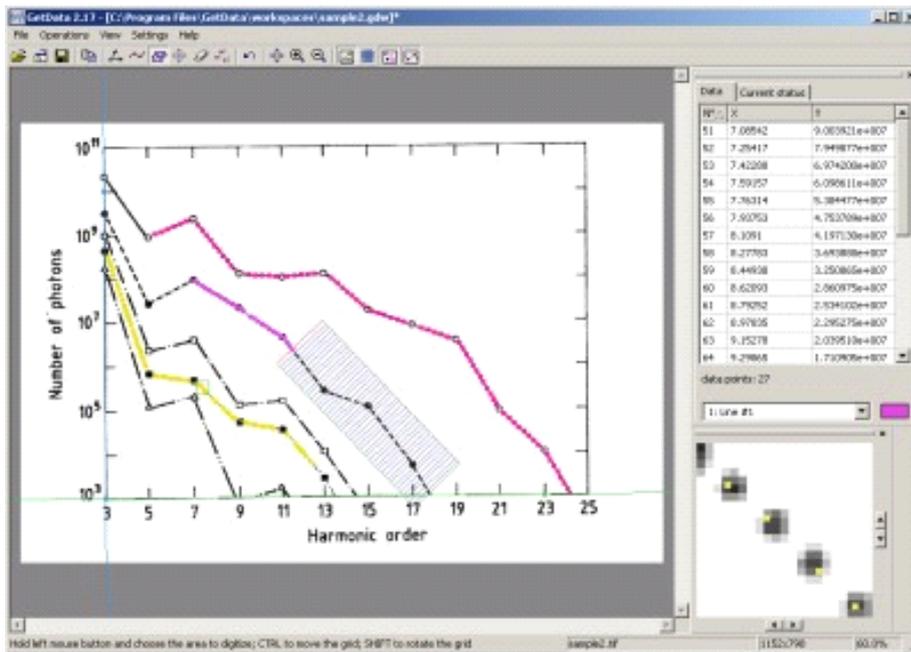


Figure III-1 . Get data Graph Digitizer [21]

III- 2-2Curvre expert pro 2.7.

Curve Expert est une application Windows qui permet à l'utilisateur de déterminer le meilleur ajustement (Lissage) pour les points de données XY en utilisant une variété de modèles d'ajustement de courbe (plus de 30) y compris linéaire, quadratique, puissance, exponentiel... etc.

L'utilisateur peut spécifier le modèle à générer, ou demander au programme de sélectionner un modèle le mieux adapté ; le meilleur ajustement est déterminé par l'erreur standard et les coefficients de corrélation. Les modèles de régression personnalisés peuvent être définis par l'utilisateur.

Les données, ainsi que les courbes tracées, sont présentées graphiquement pour montrer quel modèle convient le mieux. L'erreur standard et le coefficient de corrélation sont indiqués [22].

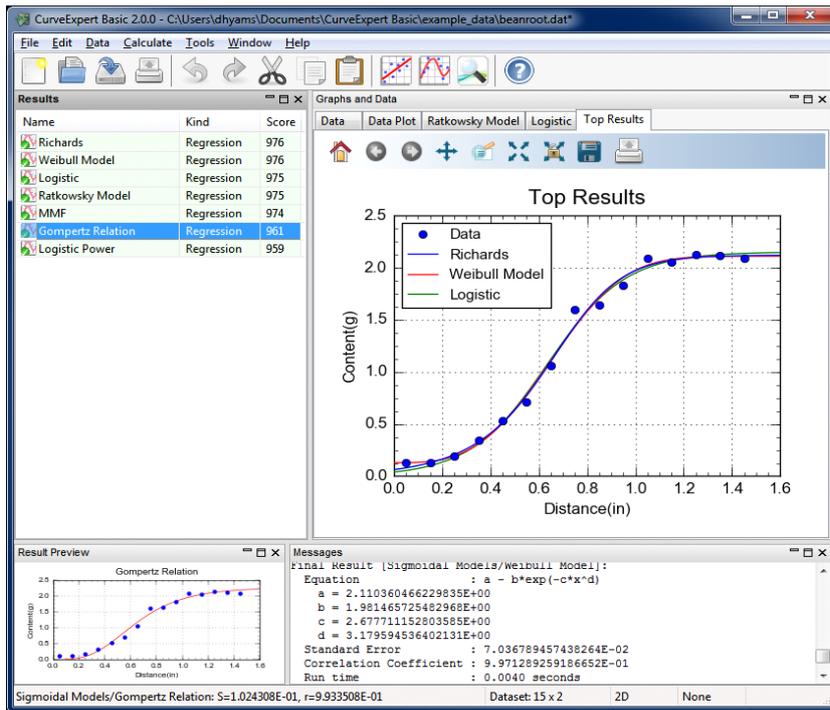


Figure III-2. Curve expert pro2.7[23]

III.3 Le lissage.

L'observation d'un phénomène physique se traduit généralement par des points d'un graphique représentant chacun un état du phénomène. Ces points se présentent soit isolés, soit groupés en un tracé continu, tel le tracé donné par un appareil de mesure enregistreur. Le lissage de ces points est l'opération par laquelle on leur substitue une courbe continue sauf peut être en un petit nombre de points, appelée courbe de lissage. Il est tacitement convenu que la courbe de lissage ainsi tracée constitue la représentation la moins inexacte possible du phénomène (nous dirons, comme d'usage, la représentation la meilleure). [24]

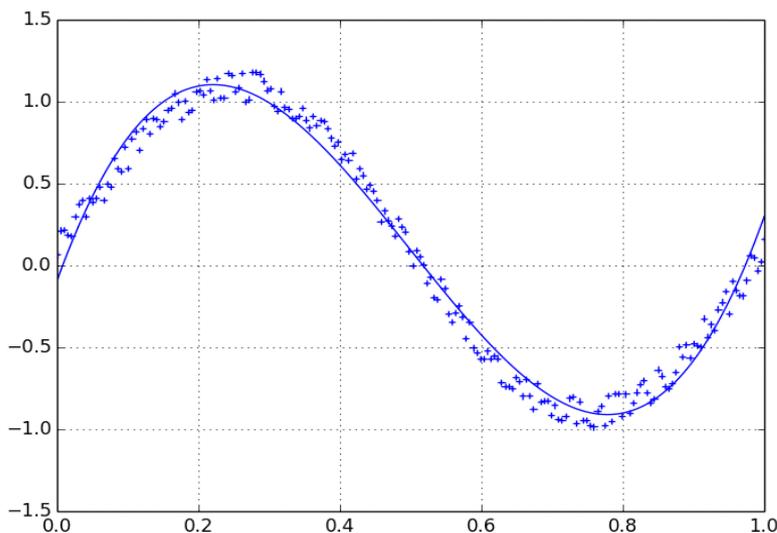


Figure III-3. Lissage d'une courbe a partir des points de données [25].

III.4 Coefficient de corrélation.

$$r = \frac{\sum[(xi-x)(yi-y)]}{\sqrt{\sum(xi-x)^2 * \sum(yi-y)^2}} \dots\dots\dots(III.1)$$

Le coefficient de corrélation est la mesure spécifique qui quantifie la force de la relation linéaire entre deux variables d'une analyse de corrélation. Le coefficient est noté r dans un rapport de corrélation [26]

Pour deux variables, la formule compare la distance de chaque point de données depuis la moyenne de la variable et l'utilise pour indiquer dans quelle mesure la relation entre les variables suit une ligne imaginaire tracée dans les données

Le coefficient de corrélation (r) est une valeur sans unité comprise entre -1 et 1.

- Plus r est proche de zéro, plus la relation linéaire est faible.
- Les valeurs 1 et -1 représentent chacune les corrélations « parfaites », positive et négative respectivement. Deux variables présentant une corrélation parfaite évoluent ensemble à une vitesse fixe. On dit que la relation est linéaire, reportés dans un nuage de points, tous les points des données peuvent être reliés par une ligne droite.

III.5 Coefficient de détermination.

Le coefficient de détermination (R^2 , soit le carré du coefficient de corrélation linéaire r) est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire simple. Il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées ou encore à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points. Ce coefficient varie entre 0 et 1, soit entre un pouvoir de prédiction faible et un pouvoir de prédiction fort.

Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0 % de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des points.

Si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100 % de la distribution des points. Cela signifie alors que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres a et b calculés sont ceux qui déterminent la distribution des points. En bref, plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points se disperse autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se resserre autour de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, alors $R^2 = 1$.

A noter :

- Une méthode de lissage d'une suite de points expérimentaux qui prend ces points pour seules données est de nature subjective, et ne peut être considérée comme scientifique
- La considération de l'erreur de chaque mesure, c'est-à-dire de l'erreur de position de chaque point, joue vraisemblablement un rôle prépondérant dans la détermination d'une bonne courbe de lissage.
- Le coefficient de corrélation est la mesure spécifique qui quantifie la force de la relation linéaire entre deux variables d'une analyse de corrélation. Le coefficient est noté (r) dans un rapport de corrélation.

-Le lissage doit être fait par une personne ayant une connaissance détaillée du phénomène représenté par la suite de points.

III.6 L'erreur standard de la moyenne.

L'erreur standard indique les fluctuations des mesures dans un échantillon de données. C'est l'écart-type divisé par la racine carrée de la taille de l'échantillon de données. L'écart-type indique la dispersion des données de l'échantillon à partir de la moyenne de l'échantillon. L'erreur standard est inversement proportionnelle à la taille de l'échantillon : plus grand est l'échantillon, moindre sera l'erreur standard. [27]

Equation de l'erreur.[28]

$$e = s/\sqrt{n} \dots \dots \dots (III.2)$$

Où:

e = erreur type de la moyenne

s = écart type d'échantillon (voir la formule ci-dessous)

n = taille de l'échantillon

l'équation de l'écart-type de l'échantillon (s).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \dots \dots \dots (III.3)$$

Où:

s = écart type de l'échantillon

x_i, \dots, x_n = l'ensemble de données de l'échantillon

\bar{x} = valeur moyenne de l'échantillon de données

n = taille de l'échantillon de données

III-7 Application de la procédure proposée à des alliages

Nous avons appliqué la procédure proposée à plusieurs alliages. Nous présentons les résultats obtenus pour chacun des alliages. Pour chaque matériau, nous faisons entrer les valeurs expérimentales et nous choisissons préalablement plusieurs modèles mathématiques les mieux adaptés aux données. Le logiciel « Curvre expert pro 2.7 » identifie, pour chacun des modèles, les coefficients et calcule les coefficients de corrélation. Par la suite, nous choisissons le modèle le mieux ajusté.

• **Alliage de titane de nuance Ti 6Al-4V**

Pour cet alliage, nous avons retenus deux lois en l'occurrence: puissance et logarithme naturel. Pour chacun des modèles, les coefficients des fonctions, les coefficients de corrélation et l'erreur sont présentés sur le tableau III.1.

Tableau III.1 :Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'alliage de titane Ti 6Al-4V

Equation de la loi	Les coefficients des équations	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de Détermination(r^2)	Erreur
(Puissance) $Y_1 = ax^b$	$a=7,293.10^2$ $b=-1,449.10^{-2}$	0,901	0,813	$1,177.10^{+1}$
(Logarithme naturel) $Y_2=a + b\ln(x)$	$a=7,104.10^2$ $b = -8,230$	0,904	0,818	$1,161.10^{+1}$

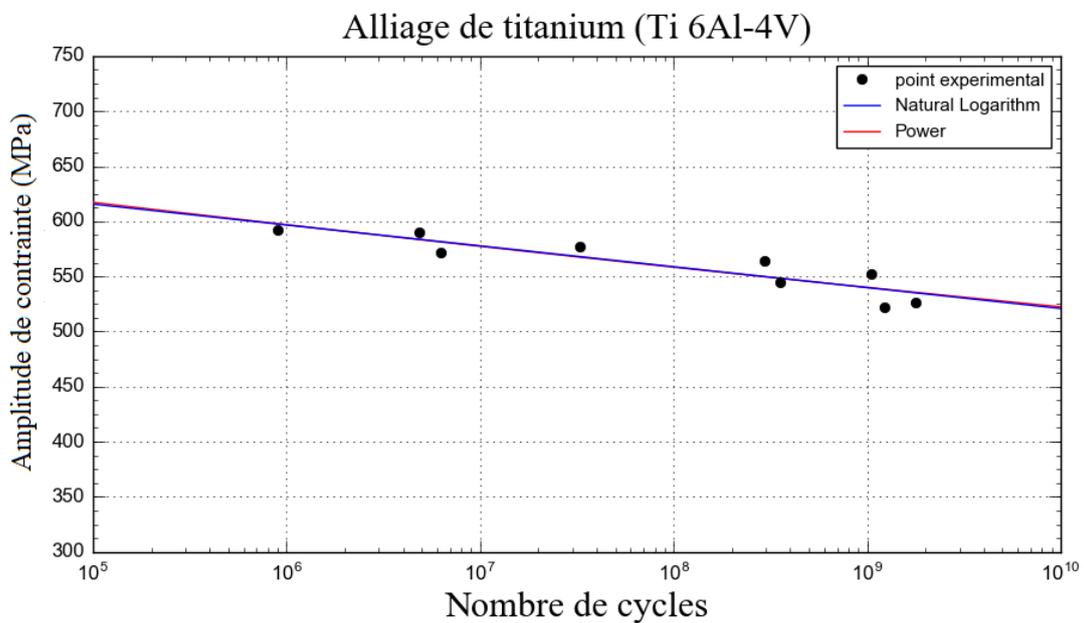


Figure III-4. Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'alliage de titane de nuance Ti 6Al-4V

La figure III-4 illustre la courbe de Wöhler pour l'alliage de titane Ti 6Al-4V montrant les données expérimentales et le lissage obtenu pour chacun des modèles. Il ressort que de cette le lissage de ce nuage de points indique que les 2 meilleures fonctions sont celles de puissance et logarithme naturel. Les deux courbes sont presque confondues mais les coefficients de corrélation et de détermination l'erreur montrent que la fonction logarithme naturel est le meilleur choix avec $r=0.9$, $r^2=0.82$ et $e=11.6$.

On peut déduire que pour ce matériau, la courbe de Wöhler, pour un nombre de cycles compris entre 10^5 et 10^{10} , peut être décrite par l'équation suivante :

$$\sigma_a = -8,23 \ln(N) + 7,104.10^2 \dots\dots\dots(III.4)$$

• **Alliage de nickel nuance Ni Cr19-Co18-Mo4-Ti3-Al3 (Udimet 500)**

Pour cet alliage, nous avons retenus trois lois en l'occurrence : puissance, logarithme inverse et puissance déplacée. Pour chacun des modèles, les coefficients des fonctions, les coefficients de corrélation et l'erreur sont présentés sur le tableau **III.2**.

Tableau III.2 :Lois de lissage de courbe d'endurance pour l'alliage de nickel (Udimet 500)

Equation de la loi	Les coefficients des équations	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de Détermination (r ²)	Erreur
(puissance) $Y_1=ax^b$	a=1,198.10 ³ b=-7,670.10 ⁻⁰²	0,959	0,920	2,668.10 ⁺¹
(logarithme inverse) $Y_3=1/[(a + b)ln(X)]$	a= -7,660.10 ⁴ b =2,318.10 ⁻⁴	0,965	0,932	2,464.10 ¹
(puissance déplacée) $Y_4=a(x - b)^c$	a=1,015.10 ³ b=1,268.10 ⁵ c=-6,785.10 ⁻²	0,969	0,939	2,422.10 ¹

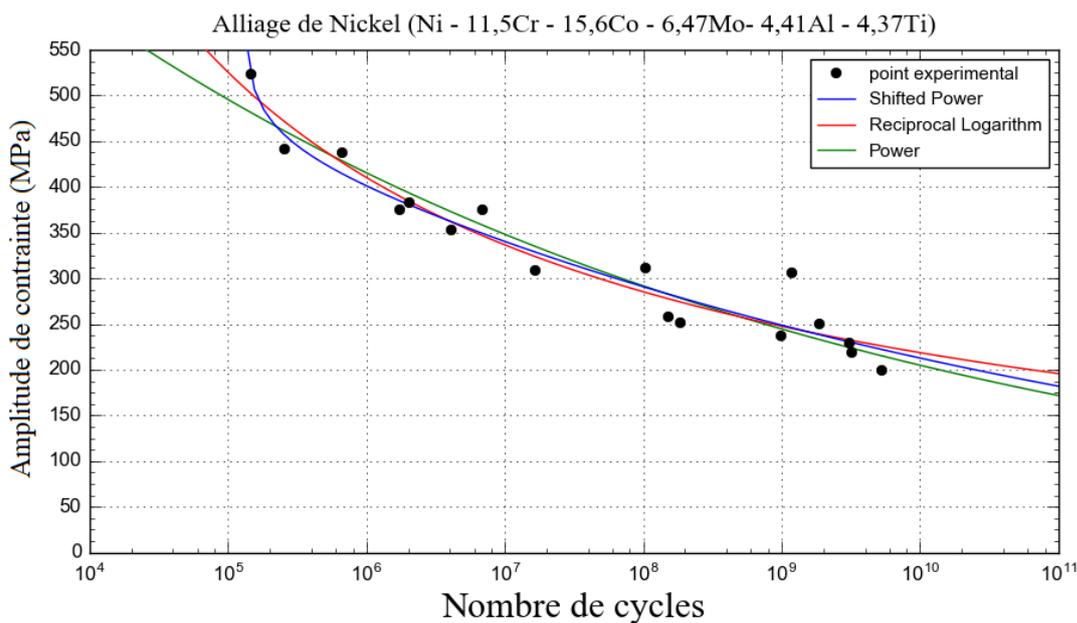


Figure III-5.Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'alliage de nickel de nuance Ni Cr19-Co18-Mo4-Ti3-Al3 (Udimet 500)

La figure III-5 montre la courbe de Wöhler pour l'alliage de nickel nuance Ni Cr19-Co18-Mo4-Ti3-Al3 (Udimet 500) présentant les données expérimentales et le lissage obtenu pour chacun des modèles. Il apparaît de visuellement que le lissage de ce nuage de points indique que les courbes obtenues pour les trois lois sont distinctes. Néanmoins, les coefficients de corrélation (r=0,97) et de détermination (r²=0,93) et d'erreur (e=24,2) obtenus par la fonction de puissance déplacée sont meilleurs par rapport à ceux présentés par les deux autres lois. On peut conclure que pour ce matériau, la courbe de Wöhler, pour un nombre de cycles compris

entre 10^5 et 10^{10} , peut être décrite par l'équation suivante :
 $\sigma_a = 1,015 \cdot 10^3 (N - 1,268 \cdot 10^5)^{6,785 \cdot 10^{-2}}$ (III.5)

• **Alliage d'aluminium 2024-T351 (AlCu4Mg1)**

Concernant cet alliage, nous avons considérés trois lois en l'occurrence: puissance déplacée, logarithme naturel et l'équation de Bleasdale-YD. Pour chacun des modèles, les coefficients des fonctions, les coefficients de corrélation et l'erreur sont présentés sur le tableau **III.3**.

Tableau III.3:Lois de lissage de courbed'endurance pour l'alliage d'aluminium(AlCu4Mg1)

Equation de la loi	Les coefficients des équations	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de Détermination (r ²)	Erreur
(puissance déplacée) $Y_4 = a(x - b)^c$	a=2,451.10 ³ b=-5,205.10 ³ c=-1,803.10 ⁻¹	0,978	0,956	1,514 .10 ¹
(Logarithme Naturel) $Y_2 = a + b/\ln(X)$	a=5,387.10 ² b= -2,420.10 ¹¹	0,982	0,964	1,348.10 ¹
(Bleasdale-YD) $Y_5 = x(a + b \cdot x^\theta)^{-1/\theta}$	a =-6,639.10 ⁻² b=1,848 $\theta = -9,033 \cdot 10^{-2}$	0,983	0,967	1,312.10 ¹

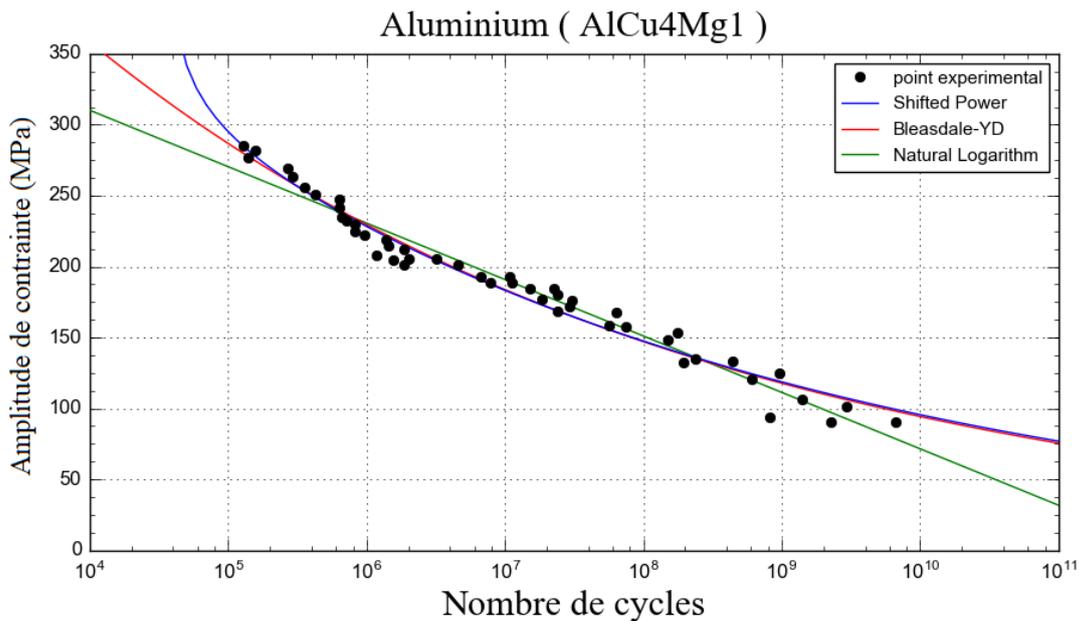


Figure III-6. Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'alliage d'aluminium 2024-T351 (AlCu4Mg1).

La figure III-6 décrit les courbes de Wöhler obtenues pour l'alliage d'aluminium 2024-T351 (AlCu4Mg1) montrant les données expérimentales et le lissage obtenu pour chacune des lois. Les courbes obtenues sont déduites du nuage de points expérimentaux. Les deux courbes correspondantes aux fonctions de puissance déplacée et de Bleasdale-YD sont confondues alors que celle de la loi du logarithme naturel les croise en deux points distincts. Les

coefficients de corrélation et de détermination et l'erreur montrent que la fonction Bleasdale-YD donne le meilleur résultat avec $r=0.98$, $r^2=0.96$ et $e=13,12$.

Alors, nous retenons que pour ce matériau, la courbe de Wöhler, pour un nombre de cycles compris entre 10^5 et 10^{10} , peut être décrite par l'équation suivante : $\sigma_a =$

$$N(-6,639.10^{-2} + 1,848. N^{-9,033.10^{-2}})^{-1/-9,033.10^{-2}} \dots\dots\dots(III.6)$$

• **Cuivre pur UFG**

Un autre exemple, relate le comportement du cuivre pur, pour lequel nous avons retenus trois lois en l'occurrence: puissance déplacée, équation de Steinhart-Hart et logarithme inverse. Pour chacun des modèles, les coefficients des fonctions, les coefficients de corrélation et de détermination ainsi que d'erreur sont présentés sur le tableau III.4.

Tableau III.4 : Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'allié du cuivre UFG

Equation de la loi	Les coefficients des équations	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de détermination (r^2)	Erreur
(puissance déplacée) $Y_4 = a(x - b)^c$	$a = 4,902.10^2$ $b = 1,919.10^4$ $c = -6,581.10^{-2}$	0,938	0,880	$1,382.10^1$
(Steinhart-Hart) $Y_6 = 1/(a + b. \ln(x) + c. \ln(x))^3$	$a = -1,407.10^{-3}$ $b = 5,095.10^{-4}$ $c = -1,854.10^{-7}$	0,953	0,909	$1,203.10^1$
(logarithme inverse) $Y_3 = 1/(a + b \ln(x))$	$a = -2,771.10^{-4}$ $b = 3,887.10^{-4}$	0,950	0,903	$1,202.10^1$

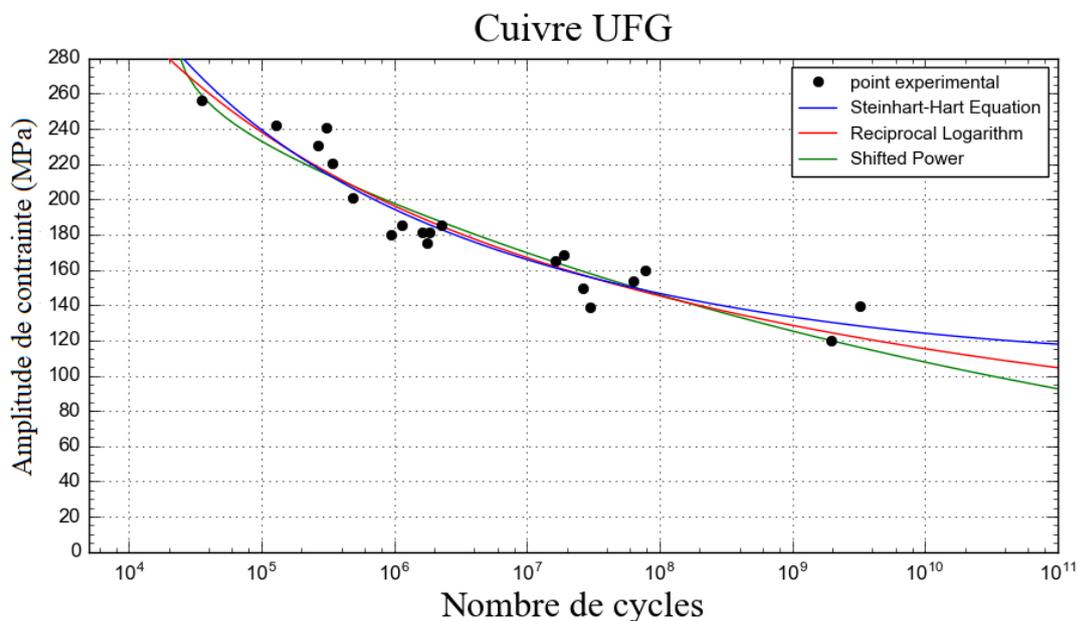


Figure III-7. Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour le cuivre UFG.

La figure III-7 illustre les courbes de Wöhler pour le cuivre pur UFG montrant les données expérimentales et le lissage obtenu pour chacun des modèles. Nous remarquons que les trois

courbes sont très proches les unes par rapport aux autres; et qu'elles se croisent en deux points distincts. Les coefficients de corrélation et de détermination et l'erreur montrent que la fonction de Steinhart-Hart exhibe la meilleure approche, avec $r=0,95$, $r^2=0,9$ et $e=12,03$.

On peut considérer que pour ce matériau, la courbe de Wöhler, pour un nombre de cycles compris entre 10^4 et 10^{10} , peut être décrite par l'équation suivante :

$$\sigma_a = 1 / (-2,771 \cdot 10^{-4} + 3,887 \cdot 10^{-4} \ln(N)) \dots \dots \dots (III.7)$$

III.8 Les aciers

- **Acier ressort Cr-Si**

Pour ce matériau, nous avons retenus trois lois en l'occurrence: puissance, logarithme naturel et puissance déplacé. Pour chacun des modèles, les coefficients des fonctions, les coefficients de corrélation et l'erreur sont présentés sur le tableau suivant **III.5**.

Tableau III.5: Lois de lissage de courbe d'endurance pour l'acier ressort Cr-Si

Equation de la loi	Les coefficients de équations	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de Détermination (r^2)	Erreur
(Puissance) $Y_1 = ax^b$	$a=8,606 \cdot 10^2$ $b=-3,682 \cdot 10^{-3}$	0,690	0,477	$1,425 \cdot 10^{+1}$
(Natural Logarithme) $Y_2 = a + b \ln(x)$	$a=8,591 \cdot 10^2$ $b=-2,981$	0,690	0,477	$1,161 \cdot 10^{+1}$
(puissance déplacé) $Y_4 = a(x - b)^c$	$a=8,467 \cdot 10^2$ $b=6,465 \cdot 10^4$ $c=-2,857 \cdot 10^{-3}$	0,775	0,600	$1,296 \cdot 10^1$

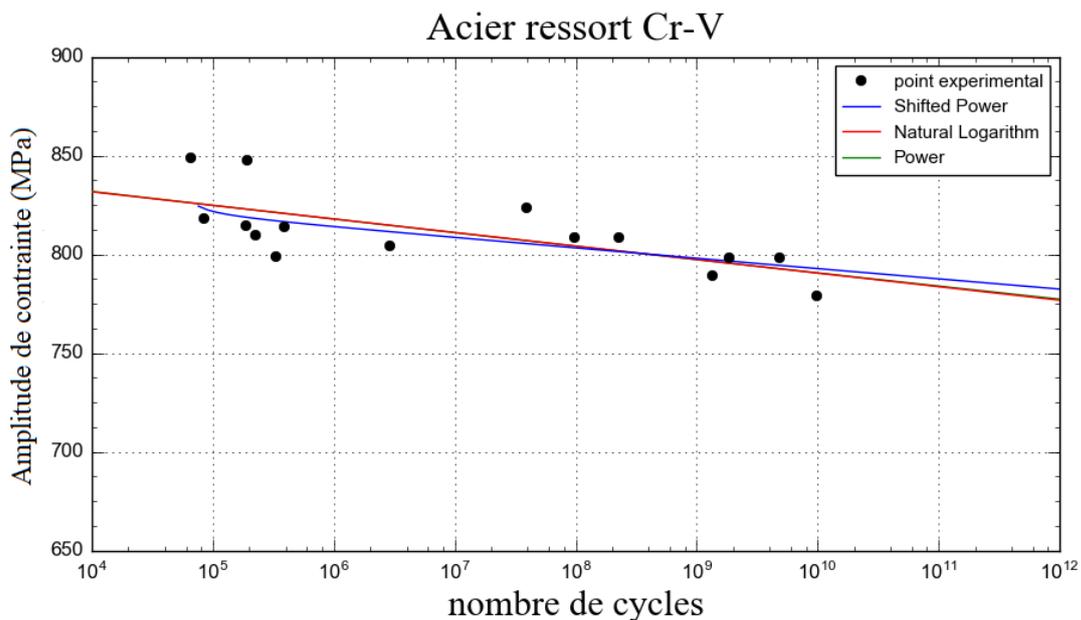


Figure III-8. Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour l'acier ressort Cr-Si.

La figure III-8 illustre les courbes de Wöhler obtenues pour l'acier ressort Cr-Si montrant les points expérimentaux et leur lissage obtenu pour chacun des modèles. La deux courbes relatives aux deux lois de logarithme naturel et de puissance sont confondues alors que la courbe de puissance déplacé les intersecte. les coefficients de corrélation et de détermination et l'erreur montrent que la fonction de puissance déplacée donne le meilleur choix possible, avec $r=0,77$, $r^2=0,60$, et $e=12,09$. On peut déduire que pour ce matériau, la courbe de Wöhler, pour un nombre de cycles compris entre 10^4 et 10^{10} , peut être relatée par l'équation suivante: $\sigma_a = 8,467.10^2(N - 6,465.10^4)^{-2,857.10^{-3}}$ (III.8)

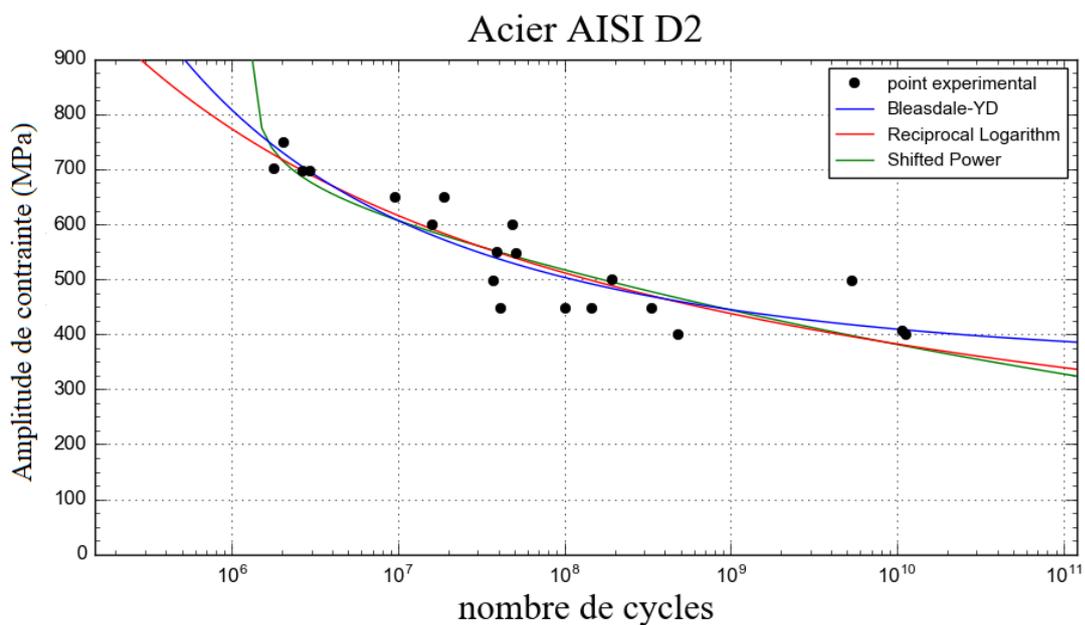
• **Acier AISI D2**

Pour cet acier, nous avons retenus trois lois en l'occurrence: équation de Bleasdale-YD, logarithme inverse et puissance déplacée. Pour chacun des modèles, les coefficients des fonctions, les coefficients de corrélation et l'erreur sont présentés sur le tableau III.6.

Tableau III.6 :Lois de lissage de la courbe d'endurance pour l'acier AISI D2

Equation de la loi	Les coefficients des équations	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de détermination (r ²)	Erreur
(Bleasdale-YD) $Y_5=x(a + b \cdot x^\theta)^{-1/\theta}$	a = -5,043.10 ⁻¹ b = 3,764.10 ⁻¹ $\theta=1,672.10^{-1}$	0,913	0,833	4,900.10 ¹
(logarithme inverse) $Y_3=1/(a + b \ln(x))$	a = -6,907.10 ⁻⁴ b = 1,436.10 ⁻⁴	0,902	0,815	5,021.10 ¹
(puissance déplacée) $Y_4=a(x - b)^c$	a = 1,738.10 ³ b = 1,299.10 ⁶ c = -6,587.10 ⁻²	0,891	0,795	5,434.10 ¹

Figure III-9. Lissage de la courbe d'endurance avec les points expérimentaux pour l'acier AISI D2.



La figure III-9 illustre les courbes de Wöhler obtenues l'acier AISI D2 montrant les points expérimentaux et le lissage obtenu pour chacun des modèles. Nous notons que les trois

courbes sont proches les unes par rapport aux autres. Les valeurs des coefficients de corrélation et de détermination et l'erreur montrent que la fonction de Bleasdale-YD présente la meilleure approche possible, avec $r=0,91$, $r^2=0,83$, et $e=49,03$. On peut conclure que pour ce matériau, la courbe de Wöhler, pour un nombre de cycles compris entre 10^6 et 10^{10} , peut être décrite par l'équation suivante :

$$\sigma_e = N \left(-5,043 \cdot 10^{-1} + 3,764 \cdot 10^{-1} \cdot N^{1,672 \cdot 10^{-1}} \right)^{-1/1,672 \cdot 10^{-1}} \dots\dots\dots(III.9)$$

• **Acier inoxydable à 12% Cr**

Concernant cet acier, nous avons retenus deux lois en l'occurrence: puissance et logarithme naturel. Pour chacun des modèles, les coefficients des fonctions, les coefficients de corrélation et l'erreur sont présentés sur la tableau III.7.

Tableau III.7 :Lois de lissage de courbe d'endurance pour l'acier inoxydable à 12% Cr

Equation de la loi	Les coefficients des équations	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de Détermination (r ²)	Erreur
(Puissance) $Y_1 = ax^b$	a=5,323.10 ² b=-6,368.10 ⁻³	0,760	0,578	1,072.10 ⁺¹
(Logarithme Naturel) $Y_2 = a + b \ln(x)$	a=5,323.10 ² b=-3,023	0,760	0,578	1,072.10 ⁺¹

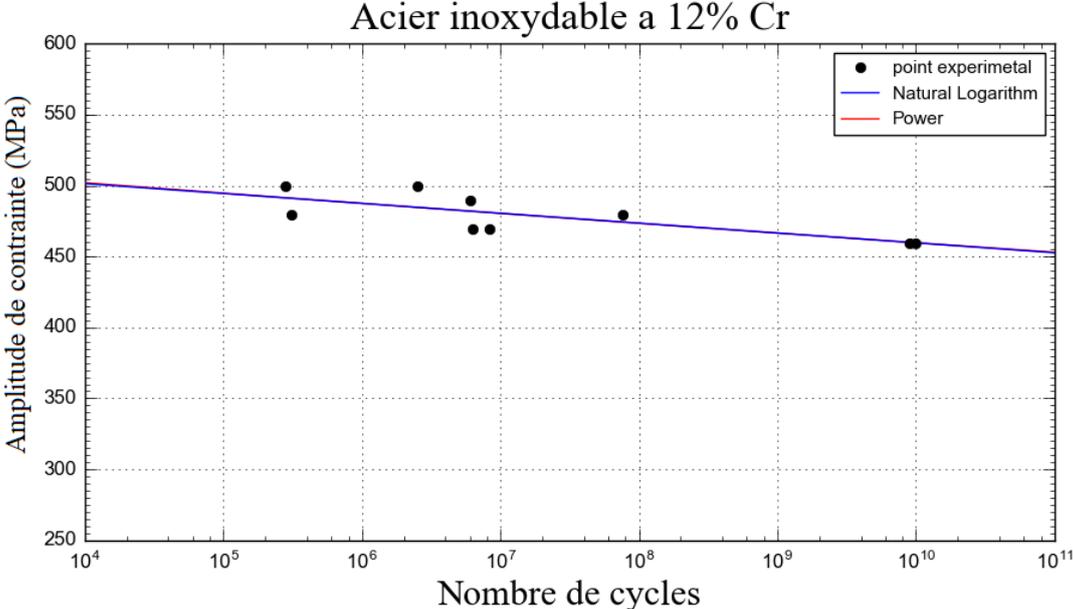


Figure III-10. Lissage de la courbe d'endurance avec les points expérimentaux pour l'acier inoxydable à 12% Cr.

La figure III-10 illustre la courbe de Wöhler obtenue pour l'acier inoxydable à 12% de chrome montrant les points expérimentaux et le lissage obtenu pour chacun des deux modèles adoptés. Il ressort de ce lissage que les deux courbes sont presque confondues et ayant les mêmes coefficients de corrélation et de détermination et la même erreur, ce qui présage que les deux fonctions donne le même résultat, avec $r=0.76$, $r^2=0.57$, et $e=10.07$. On peut déduire

que pour ce matériau, la courbe de Wöhler, pour un nombre de cycles compris entre 10^5 et 10^{10} , peut être décrite par l'une des deux lois, telle celle du logarithme naturel donné par que l'expression suivante : $\sigma_2 = 5,323.10^2 - 3,023 \ln(N)$(III.10)

• **Tôle d'acier à faible teneur en carbone**

Pour cet acier, nous avons retenus trois lois en l'occurrence: puissance, logarithme naturel et puissance déplacée. Pour chacun des modèles, les coefficients des fonctions, les coefficients de corrélation et l'erreur sont présentés sur le tableau **III.8**.

Tableau III.8 :Lois de lissage de la courbe d'endurance de tôle d'acier à faible teneur en carbone

Equation de la loi	Les coefficients des équations	Coefficient de corrélation (r)	Coefficient de détermination (r ²)	Erreur
(puissance) $Y_1 = ax^b$	a=2,869.10 ² b=-1,245.10 ⁻³	0,888	0,789	5,022
(logarithme naturel) $Y_2 = a + b \ln(x)$	a=2,815.10 ² b=-2,893	0,886	0,786	5,063
(puissance déplacée) $Y_4 = a(x - b)^c$	a=2,709.10 ² b=2,216.10 ⁵ c=-9,345.10 ⁻³	0,922	0,850	4,743

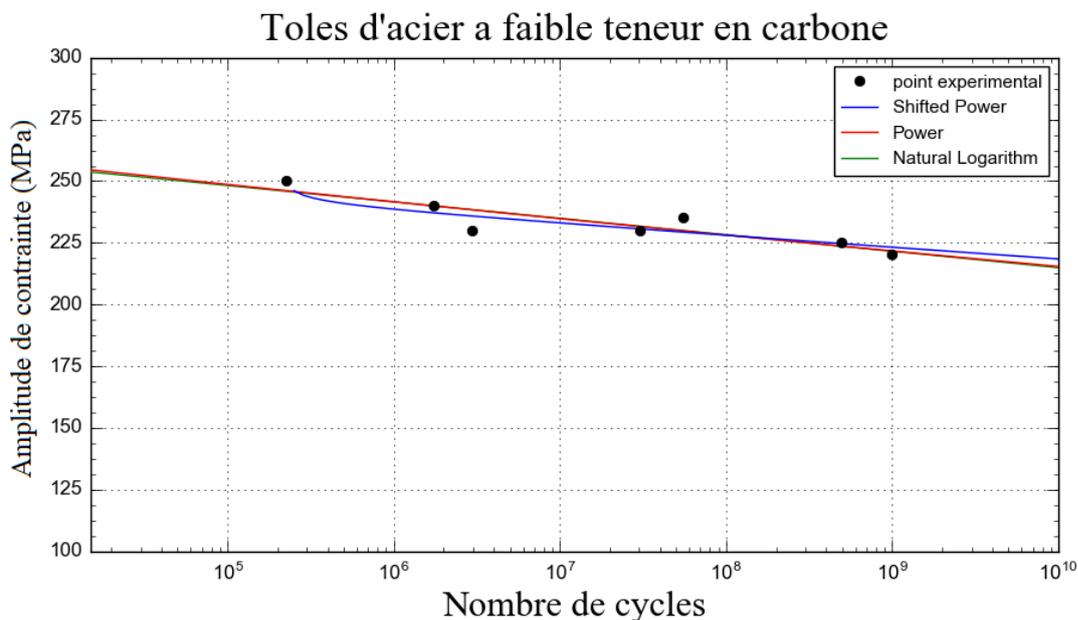


Figure III-11. Lissage de la courbe d'endurance et points expérimentaux pour la tôle en acier à faible teneur en carbone.

La figure III-11 illustre la courbe de Wöhler pour tôle d'acier à faible teneur en carbone montrant les données expérimentales et le lissage obtenu pour chacun des modèles. Il ressort de visu que le lissage de ce nuage de points peut être décrit par la présélection des fonctions citées. La courbe de la fonction logarithme naturel et la courbe de puissance sont confondues alors que la courbe de puissance déplacée les intersecte. Les coefficients de

corrélation et de détermination et l'erreur montrent que la fonction de puissance déplacée est le choix le plus convenable, avec $r=0,92$, $r^2=0,85$ et $e=47,4$. On peut déduire que pour cet acier, la courbe de Wöhler, pour un nombre de cycles compris entre 10^5 et 10^{10} , peut être décrite par l'équation suivante : $\sigma_a = 2.709.10^2(N - 2,216.10^5)^{-9,345.10^{-3}}$ (III.11)

Conclusion et perspectives

La conception des structures est basée sur la vérification de la résistance des matériaux soumis aux chargements cycliques pour lesquels la courbe d'endurance constitue le moyen le plus courant d'analyse et de prédiction en termes de la durée de vie.

Les méthodes de calcul de durée de vie dépendent de la nature du domaine d'endurance considéré. Notre étude s'intéresse aux domaines à grand et très grand nombre de cycles concernés par des durées de vie qui peuvent atteindre l'ordre du giga cycle. Nous avons modélisé la courbe d'endurance en fatigue (entre 10^5 et 10^{10} cycles) en prenant en compte huit matériaux dont quatre en acier et quatre en divers alliages. Le choix de chaque modèle dépend des valeurs du coefficient de corrélation, du coefficient de détermination et de l'erreur standard de la moyenne. A cet effet, nous avons utilisé le logiciel dénommé Curve expert lequel calcule ces coefficients pour plus de 30 fonctions mathématiques pour chacun des matériaux. Le choix préalable des modèles mathématiques de fait selon les données expérimentales disponibles. Plus la valeur des coefficients est élevée, plus le modèle est fiable. Parmi les 30 modèles existants, nous avons comparé, pour chaque matériau, les deux ou trois meilleurs qui assurent le bon lissage.

Les valeurs, données par la simulation, des coefficients de corrélation et de détermination ainsi que l'erreur standard de la moyenne sont à la base du choix le plus adéquat de la fonction qui décrit le mieux la courbe d'endurance. Par voie de conséquence, notre étude nous a conduit aux observations et remarques suivantes :

- le modèle de l'équation de puissance déplacée décrit le mieux la courbe de Wöhler pour trois matériaux en l'occurrence : l'alliage de nickel de nuance Ni Cr19-Co18-Mo4-Ti3-Al3 (Udimet 500), l'acier ressort Cr-Si et l'acier à faible teneur en carbone.
- le modèle de l'équation de Bleasdale-YD est la meilleure adaptée pour l'alliage d'aluminium 2024-T351 (AlCu4Mg1) et l'acier AISI D2.
- le modèle de l'équation de Steinhart-Hart constitue le meilleur choix pour le cuivre UFG.
- pour l'acier inoxydable à 12% de chrome, nous avons déterminé les deux meilleures fonctions, lesquelles sont l'équation de puissance et l'équation de logarithme naturel. En effet, cette remarque est motivée par le fait que les deux équations aboutissent à des résultats identiques.

Afin de poursuivre ce travail, les perspectives visant à améliorer les modèles sont nombreuses. Ceci repose fondamentalement sur l'augmentation d'information disponible en matières de données expérimentales. Par conséquent, nous suggérons ce qui suit:

- augmentation du nombre de points expérimentaux relatifs à la base de données, et ceci dans le but, notamment, d'améliorer la précision du calcul prévisionnel, que ce soit en mode amorçage de fissure, ou en mode propagation menant à la rupture.
- augmentation du nombre de variables à étudier, il serait intéressant d'améliorer la précision des machines d'essais de fatigue. Il convient, donc, de veiller à équilibrer la base de données couvrant tous les domaines de la courbe d'endurance.

Références

[1] Bardia ESMAEILLOU (2011), Approche cinétique du comportement en fatigue du Polyamide 66 renforcé par 30% de fibres de verre, Thèse de Doctorat, ENSAM SMI de Paris. École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur. Doctorat Paris Tech.]

[2] BOIVIN Y., Approche moderne de conception et d'analyse de durabilité d'un châssis de motoneige, Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences appliquées, Département de Génie mécanique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 1999, p. 105]

[3] Vitaliy Kazymyrovych, Very high cycle fatigue of engineering materials (A literature review), Faculty of Technology and Science, Materials Engineering, Karlstad University Studies ;2009:22

[4] L. Magnier-monin, Tenue en service d'assemblage soudés en acier 304l influence des contraintes résiduelle et du parachèvement mécanique, Thèse doctorat soutenue le 11/12/2007 (page 29-page 30).

[5] G.Henaff, Fatigue des structures - endurance, critères de dimensionnement, propagation des fissures, rupture. Édition 2005.

[6] H.Karaoui, Nouveaux outils pour la conception fiable des structures, Thèse doctorat soutenue le 7/12/2001 (page 18-page 19).

[7] D.Durat, Fatigue et mécanique de la rupture des pièces en alliage léger, Technique de l'ingénieur BM 5052, Date de publication : 10 juillet 1997 (page 6).

- [8] Site internet (<https://psec.uchicago.edu>-Phase equilibria of Sn-In based micro-soldering alloys)
- [9] Site internet (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01468535>)
- [10] Bathias C, Paris PC, Giga cycle fatigue in mechanical practice, NY 10016, USA: Marcel Dekker; 2005.
- [11] Bathias C, There is no infinite fatigue life in metallic materials, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 1999 07;22(7):559-65.
- [12] Stanzl-Tschegg SE, Mayer H. Fatigue and fatigue crack growth of aluminum alloys at very high numbers of cycles. *Int.J.Fatigue* 2001;23:231-237.
- [13] Kunz L, Lukas P, Svoboda M., Fatigue strength, micro structural stability and strain localization in ultrafine-grained copper. *Materials Science & Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)* 2006 05/25;424(1):97-104.
- [14] Marines I, Bin X, Bathias C. An understanding of very high cycle fatigue of metals. *Int.J.Fatigue* 2003 22-27 Sept. 2002;25(9):1101-7.
- [15] Bathias C, Drouillac L, Le Francois P., How and why the fatigue S-N curve does not approach a horizontal asymptote, *Int.J.Fatigue* 2001 17-22 Sept. 2000;23:143-51.
- [16] Wang QY, Berard JY, Rathery S, Bathias C., High-cycle fatigue crack initiation and propagation behaviour of high-strength spring steel wires, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 1999;22(8):673-677.
- [17] Sohar, C. et al. Gig cycle fatigue behaviour of a high chromium alloyed cold work tool steel. *International Journal of Fatigue* 2007.
- [18] Site internet (https://fr.wikibooks.org/wiki/Technologie/Mat%C3%A9riaux/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s/D%C3%A9signation_normalis%C3%A9e_des_aciers)
- [19] Faculty of Technology and Science Materials Engineering. Vitaliy Kazymyrovych. Very high cycle fatigue of engineering materials (A literature review). *Karlstad University Studies* :2009:22]
- [20] site internet (<http://getdata-graph-digitizer.com>.)
- [21] Site internet (<http://getdata-graph-digitizer.com/screenshots.php>)
- [22] Site internet (<https://www.merlot.org/merlot/viewCompositeReview.htm?id=146238>)
- [23] Site internet(<https://www.curveexpert.net/products/curveexpert-basic/>)
- [24] Site internet(http://www.numdam.org/article/RSA_1955__3_1_91_0.pdf)
- [25] Site internet(<https://qastack.fr/programming/20618804/how-to-smooth-a-curve-in-the-right-way>)

[26] Site internet (https://www.jmp.com/fr_fr/statistics-knowledge-portal/what-is-corr%C3%A9lation/correlation-coefficient.html)

[27] Site internet (<https://education.toutcomment.com/article/comment-calculer-les-erreurs-standard-simples-3777.html>)

[28] Site internet (<https://miniwebtool.com/fr/standard-error-calculator/>)