

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

ETUDE ET MODELISATION DE LA FATIGUE OLYGOCYCLIQUE

Présentées par : Mimouni rabia

Soutenu le 13/07 / 2022 devant le jury composé de :

Président	Dr Bendoukha Mohamed	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr Benkabouche Salah-Eddine	Université de Mostaganem UMAB
Encadrant	Pr Guechichi Hocine	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022



Remerciements

Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute reconnaissance à mon encadrant **Pr GUECHICHI Hocine** que je remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé. Ses instructions se sont avérées pertinentes et sa supervision éclairée tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements au **Dr BENDOUKHA Mohamed** d'avoir accepté de présider le jury ainsi qu'au **Dr BENKABOUCHE Salah-Eddine** d'avoir examiné notre travail. Je remercie également tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leur paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de Mostaganem UMAB.

Je remercie mes très chers amis (es) pour leurs encouragements, je remercie mes amis (es) qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

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

DEDICACE

Je dédie ce travail

À ma mère, pour son amour, ses encouragements

Et ses sacrifices

À mon père, pour son soutien, son affection

Et la confiance qu'il m'accordé

À tous les membres de ma famille

« MAMOUNI »

À tous mes amis

Et Tous ceux qui m'aiment

Résumé

Les essais de fatigue consistent à étudier le comportement sous sollicitations cycliques des matériaux et à en déterminer leur résistance. La fatigue oligocyclique est consacrée à un domaine à très courte durée de vie. Pour ce domaine les contraintes appliquées sont généralement supérieures à la limite d'élasticité. Les courbes de Wöhler ne sont pas adaptées à ce domaine de fatigue. En revanche, il est plus cohérent et opportun d'utiliser les courbes de Manson-Coffin-Basquin.

L'objectif primordial de ce mémoire est d'étudier le comportement en fatigue oligocyclique d'un alliage de magnésium-lithium, lequel a été soumis à deux types de chargements : traction-compression, en torsion alternée. Nous avons utilisé des résultats expérimentaux issus de la littérature pour déterminer les coefficients de la loi de Manson-Coffin-Basquin.

Mots clés : écrouissage, fatigue oligocyclique, essai, durée de vie, déformation élastique et plastique.

Abstract

Fatigue tests consist of studying the behavior of materials under cyclic stresses and determining their resistance. Low cycle fatigue is devoted to a field with a very short lifespan. For this domain, the stresses applied are generally greater than the elastic limit. The curves of Wöhler are not adapted to this field of tiredness. On the other hand, it is more coherent and convenient to use the curves of Manson-Coffin-Basquin.

The primary objective of this thesis is to study the behavior in low fatigue of a magnesium-lithium alloy, which has been subjected to two types of loading: tension-compression, alternating torsion. We used experimental results from the literature to determine the coefficients of the Manson-Coffin-Basquin law.

Keywords: work hardening, low cycle fatigue, test, service life, elastic and plastic deformation.

ملخص

تتكون اختبارات الإجهاد من دراسة سلوك المواد تحت الضغوط الدورية وتحديد مقاومتها. إن التعب الناتج عن الدورة المنخفضة مخصص لحقل بعمر قصير جداً. بالنسبة لهذا المجال، تكون الضغوط المطبقة بشكل عام أكبر من حد المرونة. مع هذا المجال من التعب. من ناحية أخرى، من الأكثر تماسكاً وملائمة استخدام Wöhler لم تتكيف منحنيات Manson-Coffin-Basquin منحنيات.

الهدف الأساسي من هذه الأطروحة هو دراسة السلوك في إجهاد قليل الحلقات لسبائك المغنيسيوم والليثيوم، والذي تعرض لنوعين من التحميل: ضغط التوتر، والتواء بالتناوب. لقد قمنا باستخدام النتائج التجريبية من الأدبيات لتحديد معاملات Manson-Coffin-Basquin قانون

الكلمات الرئيسية: تصلب العمل، إجهاد الدورة المنخفض، الاختبار، عمر الخدمة، التشوه المرن والبلاستيك.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Etude bibliographique	3
1 Introduction	3
2 Les domaines de fatigue.....	4
2.1 Domaine oligocyclique.....	4
2.2 Domaine à endurance limitée.....	4
2.3 Domaine à endurance illimitée	4
3 Définition de la fatigue oligocyclique	5
4 Plasticité cyclique	5
5 Ecrouissage cyclique.....	5
5.1 Définition d'écrouissage cyclique.....	5
5.2 Modélisation de l'écrouissage cyclique.....	7
6 Modèle de Chaboche	9
7 Modélisation des courbes de durée de vie en fatigue oligocyclique	9
7.1 Loi de Coffin-Manson	9
8 Effet de la contrainte moyenne.....	11
8.1 Correction de Morrow	11
8.2 Paramètre de Smith, Waston et Tropper.....	12
9 Facteurs influençant la durée de vie en fatigue d'un matériau	13
9.1 La vitesse de déformation.....	13
9.2 Taux d'oxygène dissous	13
9.3 La température	15
10 Critère de fatigue oligocyclique multiaxial.....	16
10.1 Les critères globaux	16
10.1.1 Critère de Tresca	16
10.1.2 Critère de Von Mises.....	16
10.2 Les critères locaux	16
10.2.1 Le critère de Brown et Miller.....	16
10.2.2 Critère de Kandil.....	16
10.2.3 Critère de Lhor et Ellison	17
10.2.4 Critère de Konter et al	17

Chapitre II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium. ...	18
1 Présentation du matériau	18
2 Géométrie de l'éprouvette	19
3 Conditions d'essai	19
4 Détermination du comportement en fatigue olygocyclique	20
4.1 Comportement en fatigue olygocyclique en traction-compression.....	20
4.1.1 Courbe d'écrouissage cyclique et monotone.....	21
4.1.2 Courbe de résistance à la fatigue oligocyclique.....	22
4.2 Comportement en fatigue oligocyclique en torsion alternée	27
4.2.1 Loi de comportement cyclique en torsion alternée	27
4.2.2 Courbe de résistance à la fatigue oligocyclique.....	29
5 Conclusion.....	31
Conclusion générale	33

Liste des figures

Figure I.1 Courbe de Wöhler théorique.

Figure I.2 Effet favorable de l'écrouissage et leur écrouissage cyclique.

Figure I.3 Mise en évidence de l'effet Bauschinger

Figure I.4 Boucle d'hystérésis stabilisée.

Figure I.5 Détermination de la courbe d'écrouissage cyclique ,méthode d'essai utilisant une éprouvette par niveau de déformation imposée.

Figure I.6 Contrainte par rapport à la déformation dans un test à déformation contrôlée : (a) éprouvette en adoucissement cyclique matériau et (b) éprouvette en matériau à durcissement cyclique.

Figure I.7 Estimation de la durée de vie en fatigue en fonction de l'amplitude de la déformation Impose.

Figure I.8 Courbe de durée de vie et les effets de contraintes moyennes.

Figure I.9 Influence de la vitesse de déformation sur la durée de vie en fatigue des aciers inox austénitiques en milieu eau LWR.

Figure I.10 Influence du taux d'oxygène dissous sur la durée de vie en fatigue des aciers inox austénitiques en milieu eau LWR.

Figure I.11 Influence de la température sur la durée de vie en fatigue des aciers inox austénitiques en milieu eau primaire REP.

Figure II.1 Géométrie de l'éprouvette utilisée.

Figure II.2 Représentation schématique dans le plan (ϵ , γ) des deux types de chargement considérés.

Figure II.3 Courbe de d'écrouissage cyclique et monotone.

Figure II.4 Courbe de variation de déformation plastique en fonction de nombre de cycles à la rupture.

Figure II.5 Courbe de variation de déformation élastique en fonction de nombre de cycles à la rupture.

Figure II.6 Courbe de la variation de déformation totale en fonction de nombre de cycles à la rupture.

Figure II.7 Courbe de résistance à la fatigue en traction compression.

Figure II.8 loi de comportement cyclique en torsion alternée.

Figure II.9 loi de comportement cyclique et monotone en torsion alternée.

Figure II.10 Courbe de variation de cisaillement élastique en fonction de nombre de cycles à la rupture.

Figure II.11 Courbe de variation de cisaillement plastique en fonction de nombre de cycles à la rupture.

Figure II .12 la courbe de résistance à la fatigue en torsion alternée.

Liste des tableaux

Tableau II.1 Composition Chimique de l'alliage de magnésium-lithium.

Tableau II.2 Propriétés physiques de l'alliage de magnésium-lithium.

Tableau II.3 Propriétés mécaniques à température ambiante de l'alliage de magnésium – lithium.

Tableau II.4 Résultats des essais de fatigue en traction-compression.

Tableau II.5 Coefficients des lois de comportement monotone et cyclique en traction-compression.

Tableau II.6 Le coefficient et l'exposant de déformation plastique de résistance en fatigue.

Tableau II.7 Le coefficient et l'exposant de déformation élastique de résistance en fatigue.

Tableau II.8 Résultats des essais de torsion alternée.

Tableau II.9 Coefficients de la loi de comportement monotone et cyclique en torsion alternée.

Tableau II.10 Coefficients et l'exposant de résistance en cisaillement.

Tableau II.11 Coefficients et l'exposant de ductilité en cisaillement.

Nomenclature

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
N_R	Nombre de cycles
b_γ	Exposant de résistance à la fatigue en cisaillement
b_ϵ	Exposant de résistance à la fatigue en traction
c_ϵ	Exposant de ductilité à la fatigue en traction
c_γ	Exposant de ductilité à la fatigue cisaillement
E	Module de Young en traction
G	Module de Young en cisaillement
K'	Coefficient de loi d'érouissage monotone en cisaillement
K	Coefficient de loi d'érouissage cyclique en cisaillement
k'_γ	Coefficient de loi d'érouissage cyclique en cisaillement
k_ϵ	Coefficient de loi d'érouissage monotone en traction
k'_ϵ	Coefficient de loi d'érouissage cyclique en traction
n'	Exposant de loi d'érouissage monotone en cisaillement
n'_γ	Exposant de loi d'érouissage cyclique en cisaillement
n_ϵ	Exposant de loi d'érouissage monotone en traction
n'_ϵ	Exposant de loi d'érouissage cyclique en traction
γ_a	Amplitude du cisaillement
$\Delta\epsilon_e$	Amplitude de déformation élastique
$\Delta\epsilon_p$	Amplitude de déformation plastique
$\Delta\epsilon_t$	Amplitude de déformation totale

Introduction générale

La fatigue est un processus qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. Cette même structure peut supporter sans risque un effort statique d'intensité supérieure.

La plupart des fissures de fatigue qui conduisent à la rupture des pièces mécaniques s'amorcent quand les contraintes imposées sont souvent élevées où des zones critiques se situent soit en surface, soit dans des zones de concentration de contraintes.

Dans ces régions, bien avant la rupture, la structure subit des dommages. C'est la phase d'amorçage qui correspond à la naissance et à la croissance stable de microfissures représentant la quasi-totalité de la durée de vie de la pièce.

La progression de ces microfissures conduit à des macrofissures. Il y a alors endommagement macroscopique. Le matériau ne peut être considéré comme un milieu continu. C'est la phase de propagation instable conduisant à la rupture du matériau.

Les recherches sur la rupture par fatigue oligocyclique c'est à dire celle provoquée par un faible nombre de cycles ont surtout pris de l'importance depuis 1960 grâce aux travaux de Coffin [1], Manson [2], Morrow [3] d'une part et à l'évolution importante des techniques expérimentales d'autre part. Coffin [1] définit le domaine de fatigue oligocyclique comme celui où la rupture se produit en moins de 50.000 cycles. Il est caractérisé par l'existence d'une hystérésis mécanique et se mesure par l'amplitude de la déformation plastique de l'éprouvette. Depuis quelques années, le champ d'étude de la fatigue oligocyclique s'est précisé. Il est considéré comme un moyen d'investigation particulier qui se réfère plutôt à l'amplitude de la déformation plastique et non à la contrainte ; de ce fait, le nombre de cycles à rupture peut être supérieur à 50.000 cycles.

Ce mémoire est composé de deux chapitres : dans le premier chapitre, nous exposerons une étude bibliographique sur la fatigue oligocyclique, l'écrouissage cyclique ainsi que les différents critères de fatigue oligocyclique existants dans la littérature. Dans ce premier chapitre, nous étudions aussi les facteurs influents sur la durée de vie en fatigue d'un matériau. Dans le second chapitre, nous nous intéressons au comportement d'un matériau en

fatigue olygocyclique. A cet effet, nous avons puisé de la littérature [20] des résultats effectués sur un alliage de magnésium-lithium, pour lequel nous avons pu identifier les coefficients de la loi d'érouissage cyclique ainsi que ceux de Manson-Coffin. Enfin, une conclusion générale fera le bilan de ce mémoire de fin d'études.

Chapitre I : Etude bibliographique

1 Introduction

Le terme « fatigue des matériaux » désigne l'ensemble des modifications des propriétés des matériaux dues à la répétition de cycles d'efforts. La répétition des sollicitations, mêmes inférieures à la limite d'élasticité du matériau, peut conduire à la rupture des pièces en service et être à l'origine d'accidents comme ceux survenus dans l'industrie ferroviaire ou aéronautique au cours des 150 dernières années [4].

Le caractère progressif de la détérioration du matériau qui conduit à une rupture brutale rend la prise en compte du phénomène de fatigue particulièrement importante dans l'estimation de la durabilité d'un composant.

La fatigue est le phénomène par lequel une structure rompt après avoir subi une succession de chargements qui se répètent dans le temps. Souvent, cette succession est périodique et se résume à une suite de cycles. Deux domaines peuvent être définis. On parle de fatigue à grand nombre de cycles (HCF : High Cycle Fatigue) pour des chargements qui aboutissent à des durées de vie au-delà de 10^5 cycles. Pour un plus faible nombre de cycles, on est en régime oligocyclique (LCF : Low Cycle Fatigue). La limite entre HCF et LCF correspond à la plastification macroscopique de la structure.

La fatigue oligocyclique (LCF) est un domaine à très courte durée de vie. Pour ce domaine les contraintes appliquées sont généralement supérieures à la limite d'élasticité.

Les essais de fatigue oligocyclique à chargement imposée ont déterminé l'érouissage cyclique. L'érouissage se traduit généralement par un durcissement ou parfois un adoucissement cyclique dans un matériau.

2 Les domaines de fatigue

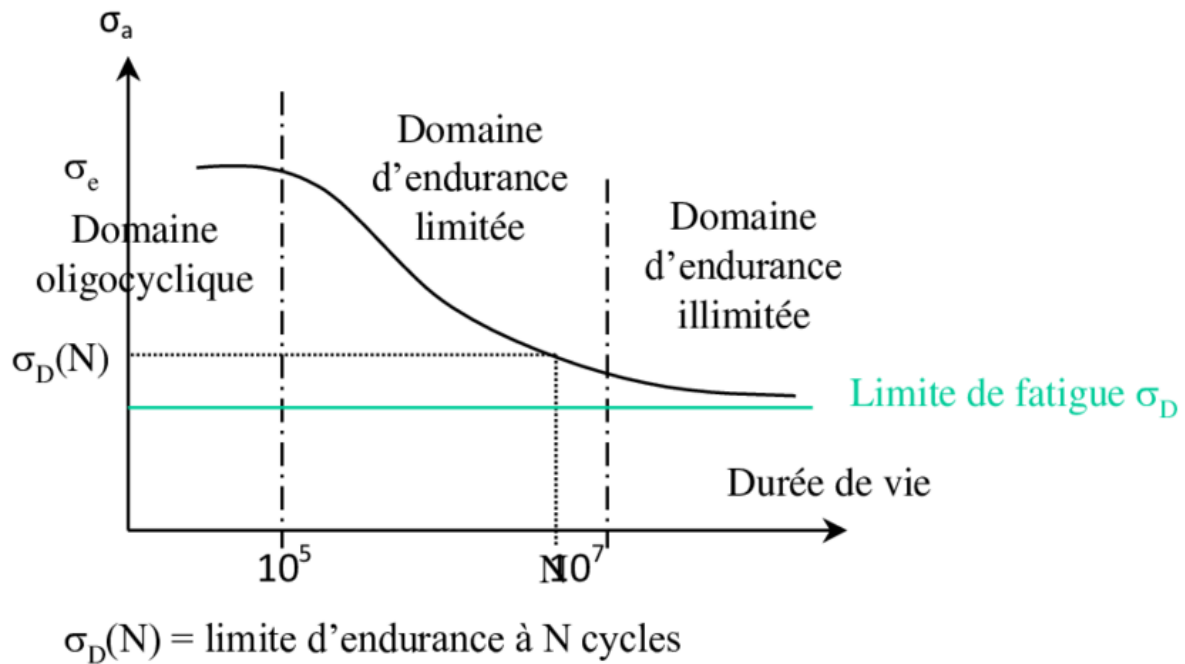


Figure I.1. Courbe de Wöhler théorique [5].

Cette courbe est caractéristique d'un matériau, et intervient comme telle dans les lois de calcul de durée de vie en fatigue. Pour un chargement uniaxial d'amplitude constante, elle porte l'amplitude de contrainte σ_a pour laquelle il y a une probabilité de rupture de 50 % en fonction du nombre de cycles la rupture N_R . Cette courbe est aussi appelée courbe de S-N ou courbe de résistance en fatigue.

Cette courbe présente, dans la plupart des cas, trois domaines distincts :

2.1 Domaine oligocyclique

Pour lequel les contraintes imposées sont élevées et le plus souvent accompagnées d'une déformation plastique à l'échelle macroscopique. Dans ce cas, la rupture survient après un faible nombre de cycles inférieur à 10^5 .

2.2 Domaine à endurance limitée

❖ pour lequel les niveaux de contraintes et de déformations sont plus faibles et dans lequel la rupture se produit entre 10^5 et 10^7 cycles.

2.3 Domaine à endurance illimitée

Observé sous de faibles niveaux de contraintes et pour lequel la rupture ne se produit pas avant environ 10^7 cycles. Pour un niveau de contrainte inférieur ou égal à σ_a , l'échantillon a peu de chance de se rompre même au-delà de 10^8 cycles. Cette contrainte σ_a est appelée « limite de fatigue », mais Bathias [6] précise qu'il n'existe pas réellement d'asymptote horizontale sur la courbe S - N et que la notion de « seuil de fatigue » serait préférable.

CHAPITRE I : Etude bibliographique

3 Définition de la fatigue oligocyclique

La fatigue oligocyclique correspond, par définition, au domaine à très courte durée de vie. Cette durée de vie est inférieure à 10^5 cycles. Elle englobe la « fatigue plastique ». Pour ce domaine les contraintes appliquées sont généralement supérieures à la limite d'élasticité. En fatigue oligocyclique, les courbes de Wöhler (en contraintes) ne sont pas utilisées. En effet, il est plus cohérent d'utiliser les courbes en déformation, que sont les courbes de (Manson-Coffin-Basquin 1954) données par la relation suivante :

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'}{E} (2N_R)^{b_c} + \varepsilon'_f (2N_R)^{c_c} \dots \dots \dots (I.1).$$

Où, σ'_f est le coefficient de résistance à la fatigue, N_R est la durée de vie, E le module de Young et b l'exposant de résistance de fatigue, ε'_f est le coefficient de ductilité cyclique et c l'exposant de ductilité.

4 Plasticité cyclique

La plasticité cyclique concerne une réponse contrainte-déformation élastoplastique des matériaux dans des chemins de chargement fermés et répétés [7]. L'effet Bauschinger, l'écrouissage cyclique, la relaxation et le cliquet sont des exemples de phénomènes liés à la plasticité cyclique [8]. Parmi les phénomènes de plasticité cyclique, le rochet peut se traduire par un endommagement supplémentaire des matériaux et le raccourcissement de leur durée de vie en fatigue. Le cliquet est défini comme une accumulation progressive de déformation dans un matériau sous le chargement cyclique contrôlé par la contrainte avec une contrainte moyenne non nulle [9]. Une prédiction correcte de l'encliquetage peut empêcher la défaillance catastrophique des structures. Le cliquet a été largement étudié dans les recherches expérimentales et numériques ces dernières années [9-10]. Les modèles constitutifs appropriés qui peuvent décrire avec précision le comportement du matériau sous chargement cyclique sont développés.

5 Ecrouissage cyclique

5.1 Définition d'écrouissage cyclique

L'écrouissage se traduit généralement par un durcissement ou parfois un adoucissement cyclique dans un matériau provenant de la déformation plastique due à une modification structurale. Cette opération en gendre une augmentation de la résistance (la dureté, la limite d'élasticité) et une diminution de la ductilité (l'allongement, striction) dans le cas des tôles, fils et pièces étirées. Les propriétés mécaniques de l'aluminium sont fonction de sa pureté et de son mode d'élaboration (corroyage, traitement de recuit final, etc.) sachant que tous les

CHAPITRE I : Etude bibliographique

alliages étant pré-écrouis. Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude du comportement des métaux soumis à des déformations importantes sujettes à un écrouissage, Andrew Thomas et al [11].

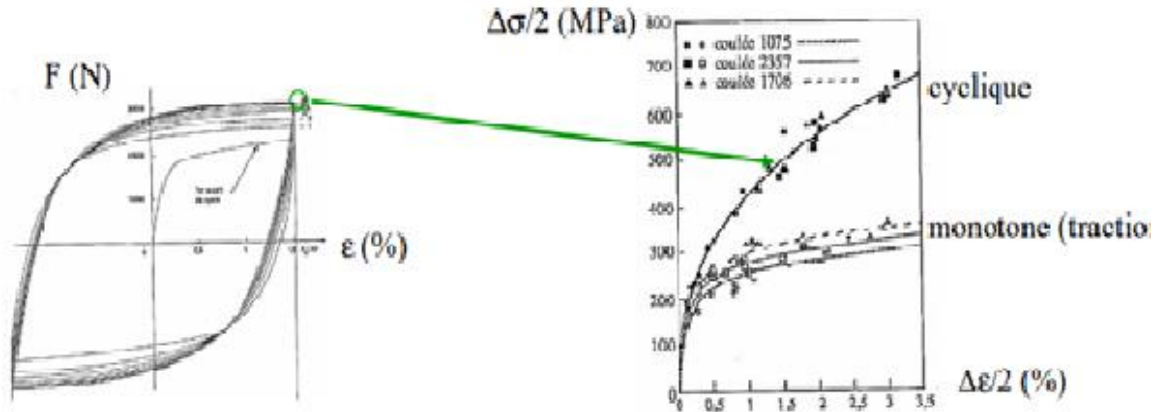


Figure I.2 Effet favorable de l'écrouissage et leurs écrouissages cycliques.

Historiquement, la première manifestation des aspects cycliques est l'effet (Bauschinger 1881) qui a observé une augmentation de la valeur absolue de la limite d'élasticité en compression après un chargement en traction, le matériau se plastifie sous une contrainte plus faible lorsque le sens de la sollicitation est inversé suite à une pré-déformation plastique en traction ou en compression (Figure I.3). L'effet Bauschinger induit un déplacement du centre du domaine élastique appelé écrouissage ou consolidation. Lorsqu'il y a écrouissage, il faut se donner un modèle pour représenter l'évolution du domaine d'élasticité. Les deux modèles les plus simples sont l'écrouissage isotrope et l'écrouissage cinématique. Ils sont basés sur l'utilisation de la courbe d'écrouissage du chargement cyclique. Les essais de fatigue oligocyclique à chargement imposé cyclique avec rapport de charge [12].

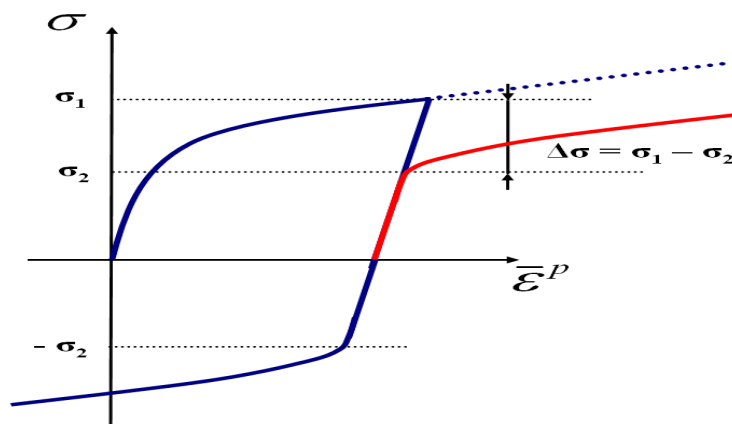


Figure I.3 Mise en évidence de l'effet Bauschinger

CHAPITRE I : Etude bibliographique

5.2 Modélisation de l'érouissage cyclique

La modélisation de la courbe d'érouissage cyclique d'un matériau a été faite pour la première fois par (Ramberg-Osgood 1943):

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2k'}\right)^{1/n'} \dots \dots \dots (I.2).$$

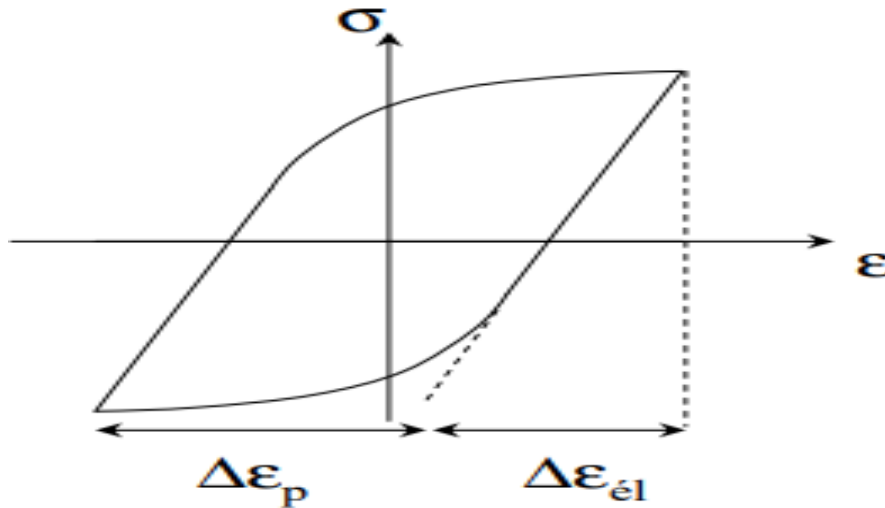


Figure I.4 Boucle d'hystérésis stabilisée.

Où, E est le module de Young, k' et n' sont respectivement le coefficient et l'exposant de l'érouissage cyclique.

Ainsi, on établit les relations entre les coefficients de l'équation (2) et les paramètres de fatigue oligocyclique donnés (1) ; ceci est relaté par ce qui suit :

$$n' = \frac{b}{c} \quad \text{et} \quad k' = \frac{\sigma'}{(\varepsilon'_f)^{n'}}$$

On effectue des essais cycliques sur *n* éprouvettes. Pour chaque éprouvette, on impose une déformation donnée et on mesure la contrainte ; une fois la boucle hystérésis stabilisée, la courbe d'érouissage cyclique (figure I.5) est obtenue en joignant les sommets de chaque boucle.

CHAPITRE I : Etude bibliographique

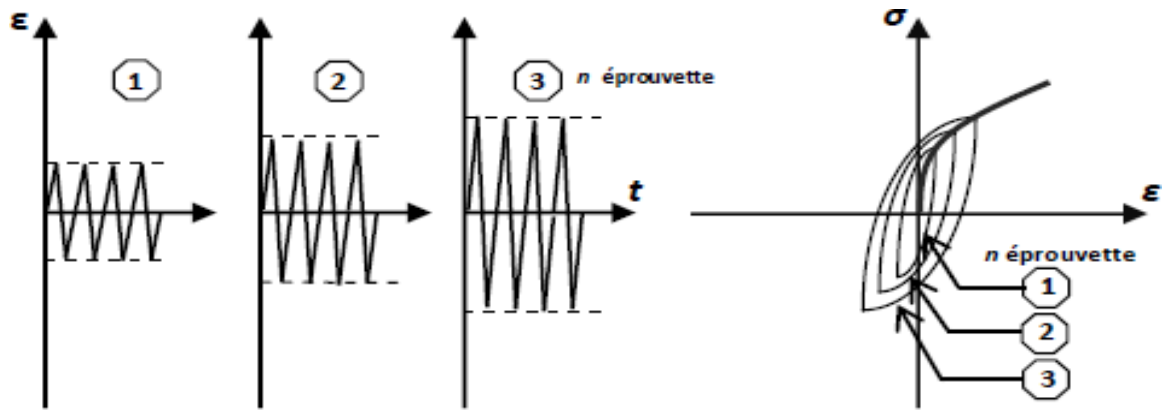


Figure I.5 Détermination de la courbe d'écrouissage cyclique, méthode d'essai utilisant une éprouvette par niveau de déformation imposée.

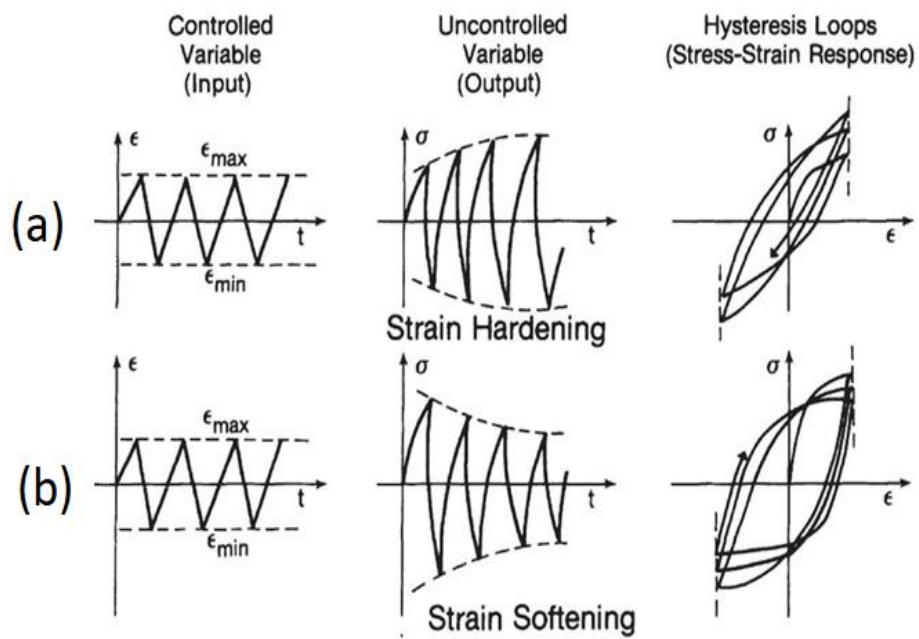


Figure I.6 Contrainte par rapport à la déformation dans un essai à déformation contrôlée : (a) éprouvette en adoucissement cyclique matériau et (b) éprouvette en matériau à durcissement cyclique.

CHAPITRE I : Etude bibliographique

6 Modèle de Chaboche

Le modèle d'écrouissage cinématique proposé par Chaboche [13] est une superposition de trois modèles d'écrouissage d'Armstrong et de Frederick.

$$d\bar{\alpha} = \sum_{j=1}^3 d\alpha_j \dots\dots\dots(I.3).$$

$$d\bar{\alpha}_j = \frac{2}{3} c_j d\varepsilon^p - D_j \bar{\alpha}_j d\varepsilon_{eq}^p \dots\dots\dots(I.4).$$

α : Constantes dépendants du matériau

$d\varepsilon_p$: Incrément de déformation plastique

$d\varepsilon_{eq}^p$: Incrément de déformation plastique équivalente.

C_i : coefficient d'écrouissage cinématique en tout point.

D_i : exposant d'écrouissage cinématique en tout point.

Chaboche a déterminé les paramètres de la boucle d'hystérésis stable d'un matériau à partir de la courbe contrainte-déformation monotone. Tous les paramètres matériels sont déterminés à partir d'une boucle d'hystérésis.

7 Modélisation des courbes de durée de vie en fatigue oligocyclique

7.1 Loi de Coffin-Manson

Lorsque la contrainte cyclique dépasse la limite élastique, chaque cycle génère une petite déformation permanente $\Delta\varepsilon_p$. Les deux lois données ci-dessous sont mathématiquement très simples et sont bien suivies expérimentalement [14]. Elles ont été publiées après le début des années 1950, au cours desquelles des accidents aériens liés à la rupture par fatigue ont eu lieu faute d'un dimensionnement approprié et des précautions adéquates.

La loi empirique généralement retenue pour les faibles niveaux de contraintes est la suivante :

$$\sigma_{\alpha} = E \frac{\Delta\varepsilon_{el}}{2} = \sigma'_f (N_R)^b \text{ (Loi de Basquin)} \dots\dots\dots(I.5).$$

CHAPITRE I : Etude bibliographique

- N est le nombre de cycles à la rupture,
- ε_{el} est la déformation élastique,
- σ'_f est une « ductilité en fatigue »
- b est un coefficient propre au matériau, qui vaut généralement entre -0,05 et -0,12. On prend souvent pour σ'_f la résistance à la traction.

La loi empirique généralement retenue pour les forts niveaux de contraintes est la suivante :

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (N_R)^c \text{ (loi de Manson-Coffin) (I.6).}$$

- N_R : nombre de cycles à la rupture,
- ε_p : déformation plastique,
- ε'_f : ductilité en fatigue,
- C : Coefficient propre au matériau,

La loi complète s'écrit en rappelant que la déformation totale est la somme de la déformation élastique et de la déformation plastique:

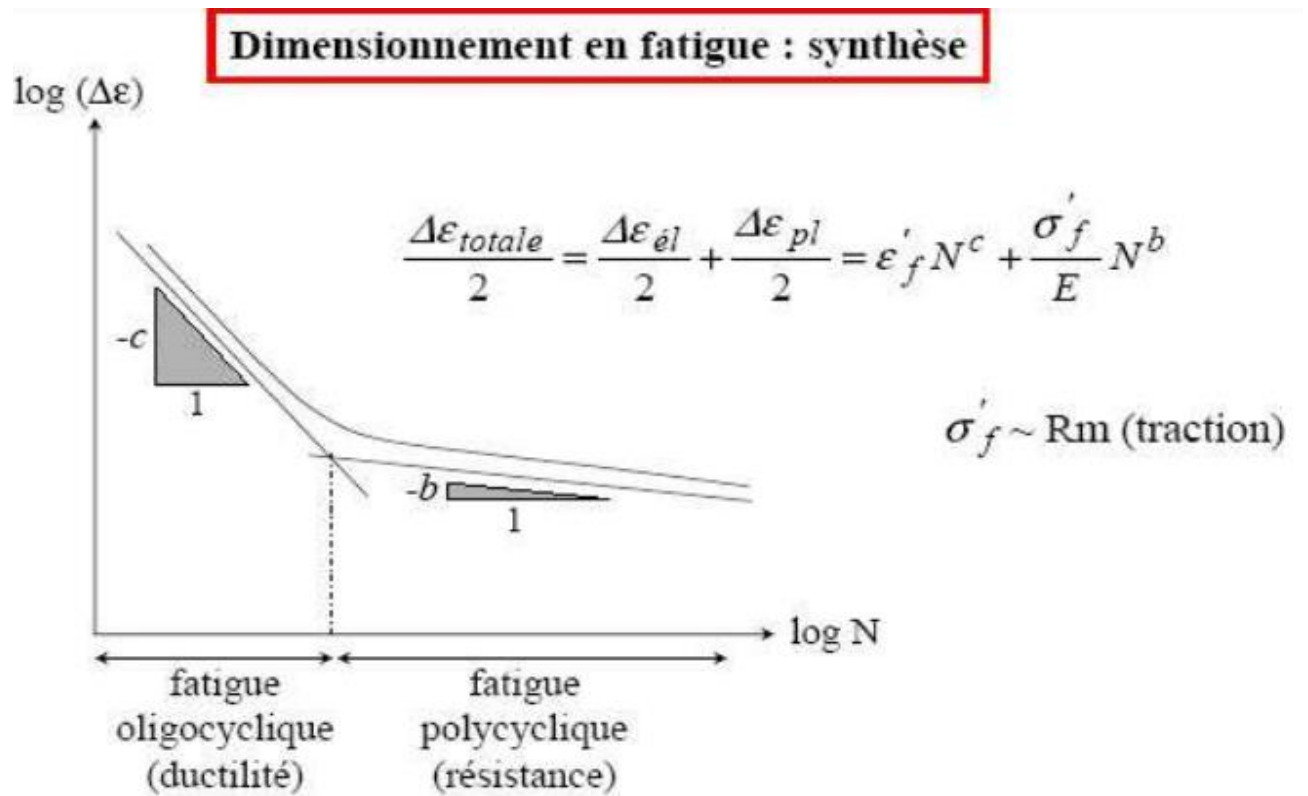


Figure I.7 Estimation de la durée de vie en fatigue en fonction de l'amplitude de la déformation imposée.

8 Effet de la contrainte moyenne

8.1 Correction de MORROW

La contrainte moyenne n'a que peu d'effet sur la composante « plastique » de la courbe de durée de vie ; les effets de plasticité vont logiquement surpasser les effets de contraintes moyennes. Par conséquent seule la composante plastique est modifiée, on remplace alors le facteur de résistance σ'_f par $(\sigma'_f - \sigma_m)$. La loi de Basquin devient alors :

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{2} (2N_R)^b + \varepsilon'_f (N_R)^c \dots\dots\dots(I.7).$$

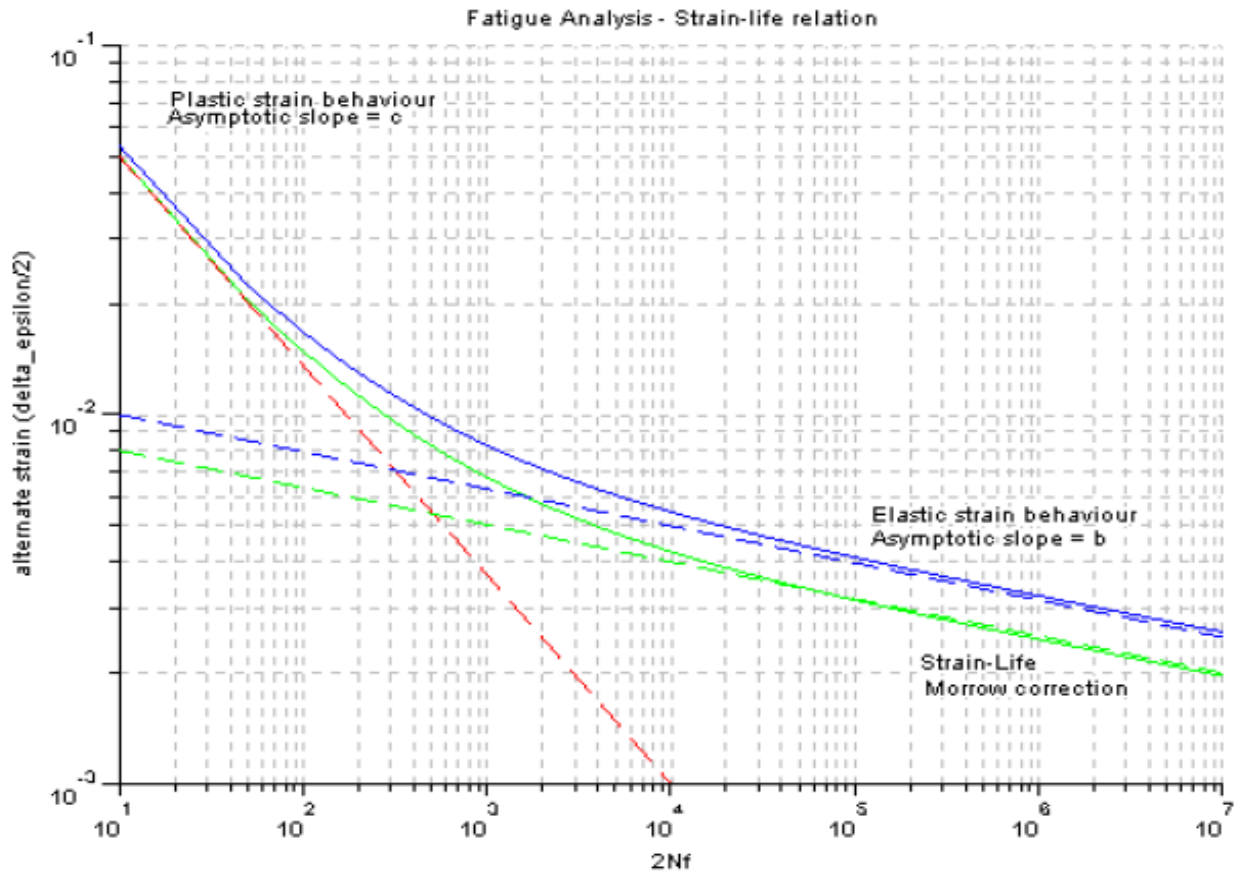


Figure I.8. Courbe de durée de vie et les effets de contraintes moyennes (correction de Morrow).

8.2 Paramètre de SMITH, WASTON ET TROPPER

Smith, Watson et Tropper ont introduit un paramètre P_{SWT} , une valeur donnée de ce paramètre représente une durée de vie identique.

$$P_{swt} = \sqrt{\sigma_{\max} \frac{\Delta\epsilon}{2} E} = \sqrt{\frac{\Delta\epsilon}{2} E(\sigma_a + \sigma_m)} \dots\dots\dots(I.8).$$

Ainsi, on déterminant la durée de vie avec une contrainte moyenne nulle on peut déduire les durées de vie avec différentes contraintes moyennes.

La méthode de correction de SWT n'est pas définie pour des σ_{\max} nuls ou négatifs (compression). L'interprétation physique qui en résulte prévoit des dommages dus à une contrainte moyenne seulement s'il existe au moins un point sous tension pendant la sollicitation.

CHAPITRE I : Etude bibliographique

9 Facteurs influençant la durée de vie en fatigue d'un matériau

Un matériau peut se comporter d'une façon inattendue, à cause plusieurs facteurs, donc il faut identifier la cause de ce comportement pour lequel les recherches ont abouti aux observations suivantes :

9.1 La vitesse de déformation

La littérature considère que la vitesse de déformation s'opère que dans la partie du cycle en traction. De nombreux essais ont été effectués avec un signal en dent de scie où seule la partie en traction est à vitesse lente. Les effets de la vitesse de déformation sur la durée de vie en fatigue des aciers inox austénitiques sont explicitement introduits dans le calcul du facteur F_{en} en milieu eau primaire REP, proposé par ANL. La Figure I. 9 illustre cette observation.

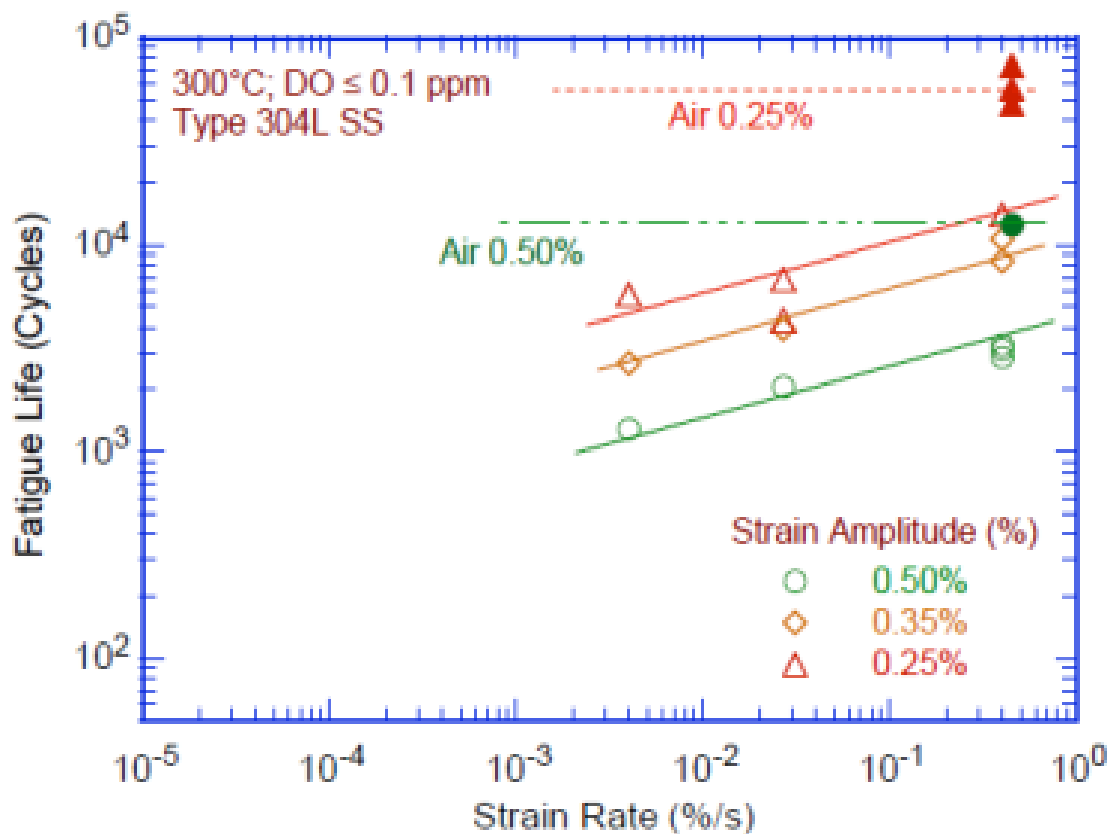


Figure I.9 Influence de la vitesse de déformation sur la durée de vie en fatigue des aciers inox austénitiques en milieu eau LWR [15].

9.2 Taux d'oxygène dissous

La durée de vie en fatigue des aciers inox austénitiques en milieu eau PWR (Low DO water) est proche et dans certains cas plus faibles qu'en milieu eau BWR (High DO water). On

CHAPITRE I : Etude bibliographique

observe sur la Figure I-8, pour l'acier 316NG, une légère influence de la vitesse en milieu eau BWR, somme toute inférieure à celle observée en milieu eau PWR. Donc, dans milieu eau PWR, la durée de vie n'est pas affectée par la composition ou le traitement thermique de l'acier, au contraire du milieu eau BWR.

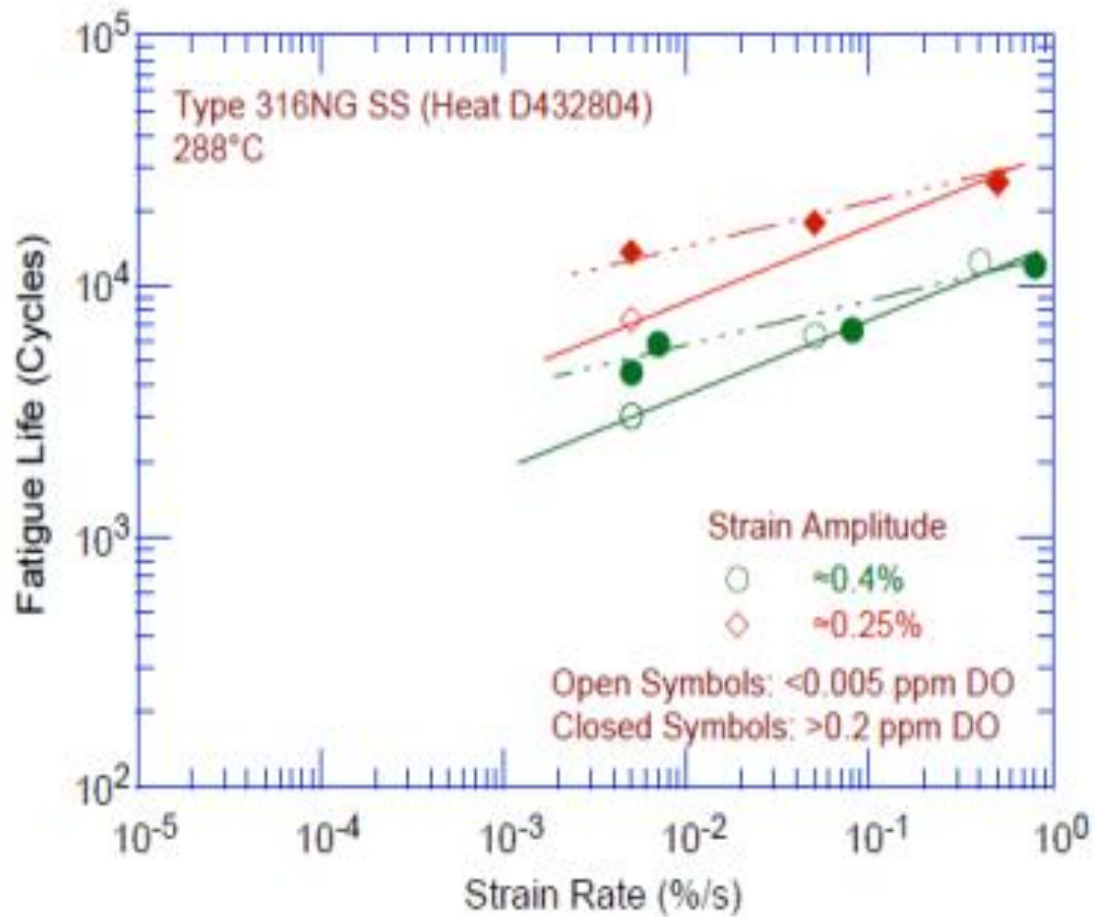


Figure I.10 Influence du taux d'oxygène dissous sur la durée de vie en fatigue des aciers inoxtausténitiques en milieu eau LWR [15].

CHAPITRE I : Etude bibliographique

9.3 La température

La température constitue un facteur qui joue un rôle très important sur le comportement en fatigue d'un matériau. Les essais de fatigue montrent que l'augmentation de la température diminue la durée de vie.

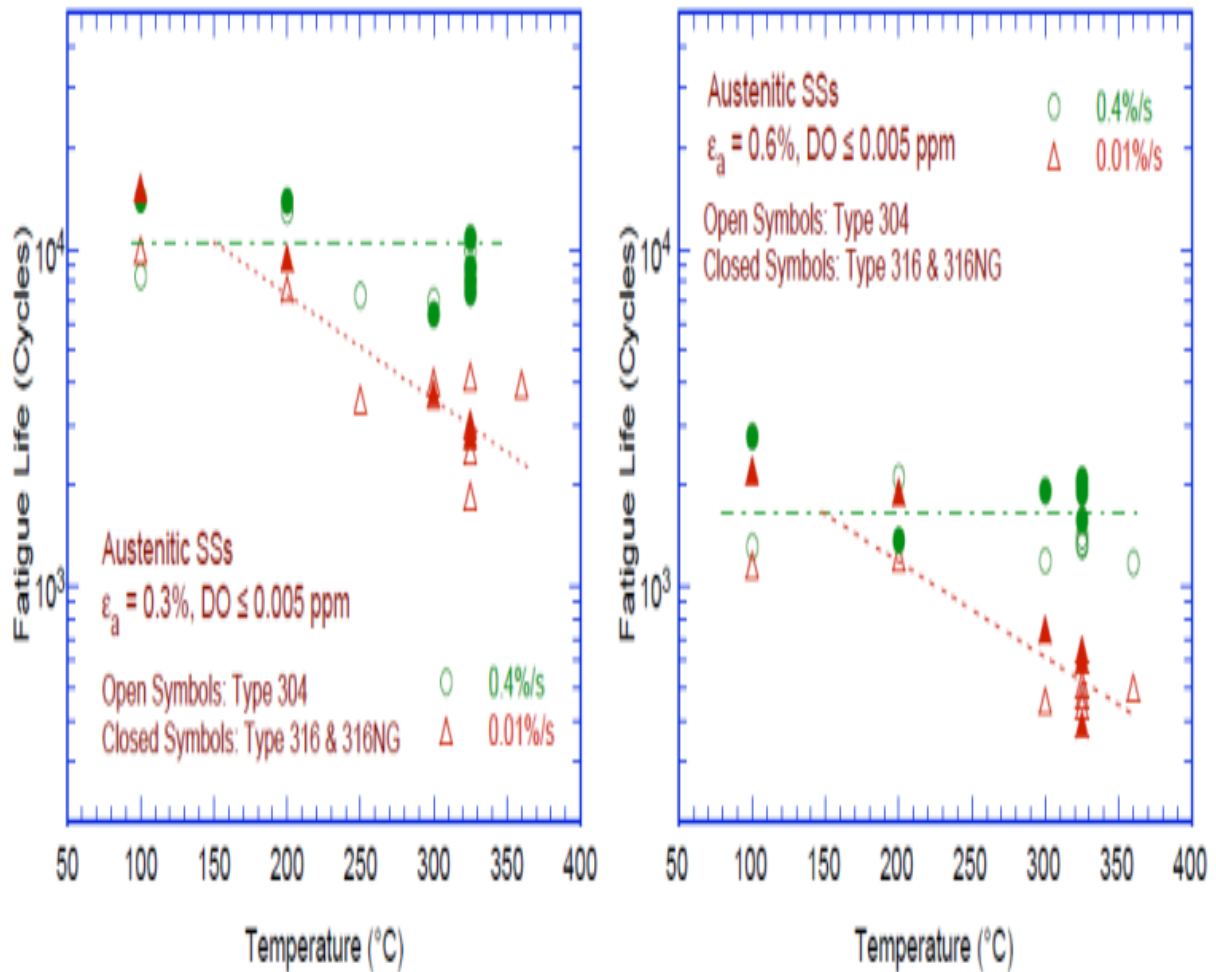


Figure I.11 Influence de la température sur la durée de vie en fatigue des aciers inox austénitiques en milieu eau primaire REP [15].

CHAPITRE I : Etude bibliographique

10 Critère de fatigue oligocyclique multiaxial

Les critères de fatigue oligocyclique multiaxiale s'inspirent du critère de résistance lesquels se regroupe en deux catégories :

10.1 Les critères globaux

10.1.1 Critère de Tresca

Ce critère fait appel à la théorie de la contrainte tangentielle maximale τ_{max} . Si les contraintes principales sont notées $\sigma_1 ; \sigma_2 ; \sigma_3$ et R_e la limite d'élasticité en traction ; la relation du critère est donnée par la relation suivante :

$$\tau_{max} \geq R_e \dots\dots\dots (I.9)$$

Avec

$$\tau_{max} = \sup_{i \neq j} (|\sigma_i - \sigma_j|) \dots\dots\dots (I.10).$$

10.1.2 Critère de Von Mises

Ce critère est basé sur une théorie laquelle considère que la contrainte tangentielle octaédrale maximale τ_{oct} gouverne le phénomène de rupture. Ce critère s'exprime ainsi :

$$\tau_{oct} \geq \sqrt{2} R_e \dots\dots\dots (I.11)$$

10.2 Les critères locaux

La formulation de ces critères est qualifiée de locale car ils sont développés à partir d'observation des mécanismes physiques conduisant à la rupture. On à :

10.2.1 Le critère de Brown et Miller [16]

Ce critère découle de considérations empiriques et s'exprime en déformation. Les paramètres qui influent sur la rupture sont :

- le cisaillement maximum τ_{max} .
- la déformation normale au plan de cisaillement maximum ε_n .

Ce critère s'écrit sous sa forme générale :

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} = f\left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}\right) \dots\dots\dots (I.12).$$

10.2.2 Critère de Kandil

A partir d'une extension de la théorie de BROWN et MILLER, l'auteur a proposé pour la déformation plastique équivalente, la définition suivante :

CHAPITRE I : Etude bibliographique

$$\varepsilon_{eq} = \gamma_{\max} + a_4 \cdot \varepsilon_n \dots \dots \dots (I.13).$$

Où a_4 est une constante du matériau qui est égale à l'unité pour les essais de traction-torsion en phase.

10.2.3 Critère de Lhor et Ellison [17-18]

Lhor et Ellison ont développé un dispositif d'essai permettant d'obtenir des cycles de fatigue alternée pour tout rapport de contraintes ou de déformations biaxiales.

A partir d'expériences sur un acier à 1% Cr. Mo, ils ont conclu au plus grand danger du cisaillement rentrant de type B, quel que soit la configuration du chargement. Les auteurs ont proposé alors de modifier le paramètre choisi par BROWN et MILLER, en remplaçant γ_{\max} par γ^* qui est le cisaillement rentrant dans le matériau (fissuration de type B) et en par la déformation normale ε^* au plan de cisaillement où opère γ^* . Le critère proposé est une loi du type :

$$\gamma^* + a_5 \cdot \varepsilon^* = f(N_R) \dots \dots \dots (I.15).$$

$$\text{Avec } \gamma^* = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \quad \text{et} \quad \varepsilon^* = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$$

Où a_5 est une constante empirique.

10.2.4 Critère de Konter et al [19]

Ces auteurs ont mené des essais sur deux types d'acier, le premier est un acier austénitique 18Cr-11Ni testé à 20°C et 550°C, l'autre est un acier ferritique Cr-Mo testé à 550°C. Ces essais ont été effectués en fatigue oligocyclique pour plusieurs rapports de déformation. A partir des données obtenues, ils ont proposé une expression quadratique pour le cisaillement du type A.

$$\Delta \varepsilon_{eq}^2 = (16 - 9a_6) \Delta \varepsilon_n^2 + a_6 \cdot \Delta_{\max}^2 \dots \dots \dots (I.16)$$

Où a_6 est une constante du matériau.

Cette relation est élargie au type B, en remplaçant la constante a_6 par la constante a_7 :

$$a_7 = \frac{8}{3} - a_6 \dots \dots \dots (I.17)$$

Chapitre II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium- lithium.

Afin de déterminer le comportement d'un matériau en fatigue olygocyclique, nous avons puisé de la littérature [20] les essais de fatigue olygocyclique sur un alliage de magnésium-lithium.

1 Présentation du matériau [20]

Le matériau considéré est un alliage de magnésium-lithium dont la structure est hexagonale compacte. Il se présente sous forme de barres extrudées de 35 mm de diamètre. Il s'agit d'un alliage pour tôles, d'une légèreté remarquable (densité égale à $1,74 \text{ g/cm}^3$) ; les compositions chimiques et les propriétés physiques et mécaniques sont présentées respectivement dans les tableaux (1, 2 et 3).

Tableau II.1 Composition Chimique de l'alliage de magnésium-lithium [20].

Li (%)	Al (%)	Fe (%)	Mg (%)
4.1	1.2	0.0016	reste

Tableau II.2 Propriétés physiques de l'alliage de magnésium-lithium [20].

Densité à 20°C	Point de fusion	Point d'ébullition	Chaleur latente De fusion	Chaleur latente De vaporisation
1.74 g/cm^3	649°C	1090°C	8.71 KJ/mol	134 KJ/mol

Tableau II. 3 Propriétés mécaniques à température ambiante de l'alliage de magnésium – lithium [20].

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

	Limite d'élasticité Re 0.2% (Mpa)	Résistance Ultime Rm (Mpa)	Allongement A(%)
Traction	150	260	10
Compression	120	/	/
Cisaillement	90	125	/

2 Géométrie de l'éprouvette

Pour étudier le comportement et l'endommagement des matériaux, il faut définir l'éprouvette de façon à éviter les possibilités de flambage susceptibles de fausser les mesures et les problèmes de concentration de contraintes influençant la rupture. Le flambage peut être évité en réduisant la longueur utile de l'éprouvette et en minimisant les concentrations de contraintes par la réalisation d'éprouvettes sans variation brutale de section.

Par ailleurs, l'épaisseur de l'éprouvette doit être aussi faible que possible pour rester dans un domaine de déformation en torsion assez homogène dans toute la section. Compte tenu de ces impératifs, l'éprouvette choisie est de forme tubulaire, dont les diamètres intérieur et extérieur ont respectivement 15mm et 18 mm avec une partie de longueur utile 25 mm et un rayon de raccordement de 23 mm (figure II.1) [20].

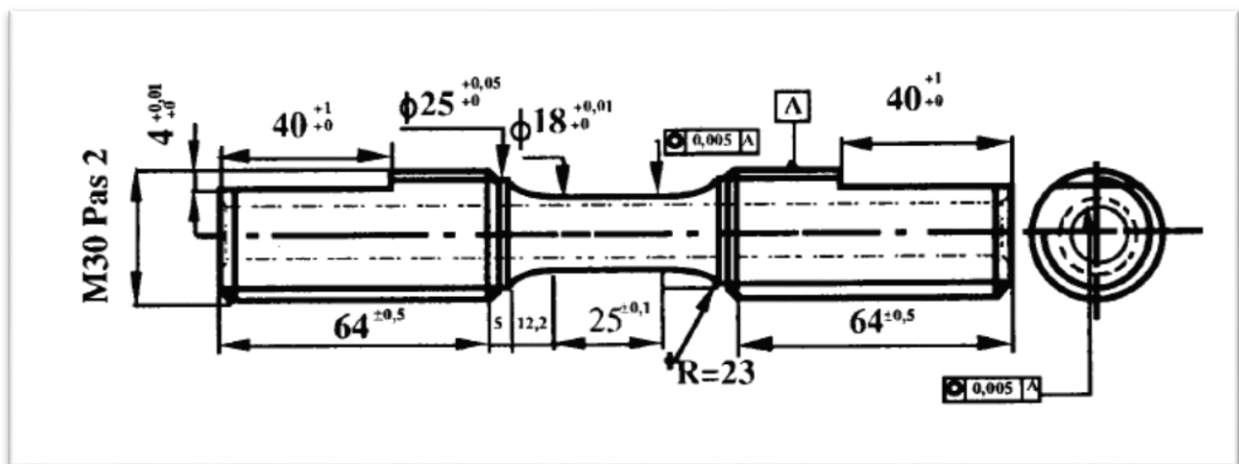


Figure II.1 Géométrie de l'éprouvette utilisée [20].

3 Conditions d'essai [20]

Les essais ont été effectués jusqu'à rupture à amplitude de déformations totales imposées et à vitesse de déformations de $3 \cdot 10^{-2} s^{-1}$. Deux types d'essais ont été considérés :

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

- Essai de traction-compression en contrôle de déformation axiale totale.
- Essai de torsion alternée en contrôle de déformation angulaire totale.

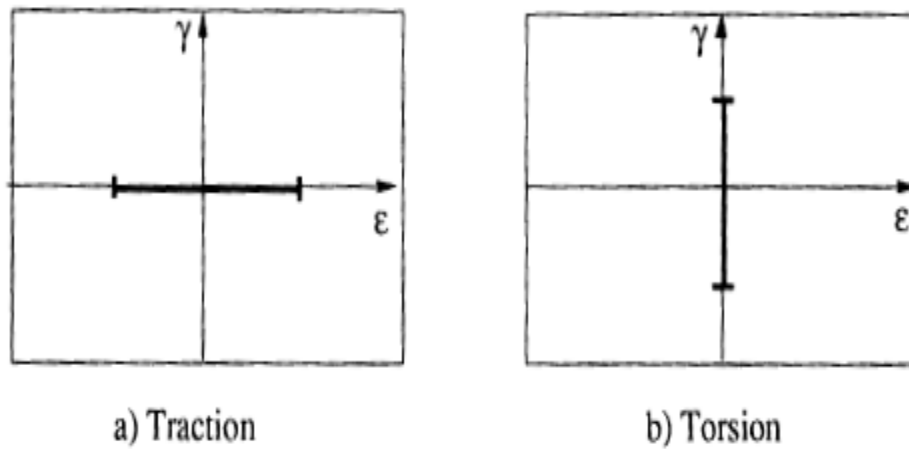


Figure II.2 Représentation schématique dans le plan (ϵ , γ) des deux types de d'essais considérés

4 Détermination du comportement en fatigue olygocyclique

4.1 Comportement en fatigue olygocyclique en traction-compression

Ces essais ont été réalisés en contrôle de la déformation axiale en vue de définir l'évolution de la contrainte et de la déformation durant le cyclage, la courbe de résistance à la fatigue et la loi d'écrouissage cyclique et monotone.

On utilise la convention de 50% de chute de charge par rapport au niveau du premier cycle pour déterminer la durée de vie du matériau.

Les résultats obtenus au cycle stabilisé sont donnés par le tableau II.4.

Tableau II.4. Résultats des essais de fatigue en traction-compression [20].

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

N°	$\Delta\varepsilon_t/2$ (%)	$\Delta\varepsilon_p/2$ (%)	$\Delta\varepsilon_e/2$ (%)	$\Delta\sigma/2$	Nr
TC5	0.51	0.13	0.38	154	870
TC6	0.62	0.21	0.41	158	622
TC1	0.83	0.385	0.445	162	369
TC3	1.255	0.765	0.490	172	127
TC4	1.655	1.110	0.545	181	60
TC8	1.865	1.215	0.650	187	40

4.1.1 Courbe d'écroissage cyclique et monotone

Lors d'un essai de fatigue oligocyclique, on observe une évolution de la contrainte maximale enregistrée à chaque cycle, qui est fonction de l'état initial du matériau. Ainsi pour chaque amplitude de déformation totale cyclique imposée, on peut déterminer le comportement stabilisé qui occupe la plus grande partie de la durée de vie de l'éprouvette et tracer la courbe contrainte-déformation.

Comme la courbe de traction-monotone, la courbe d'écroissage est approximée par la relation (II.1).

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = k'_\varepsilon \left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \right)^{n'_\varepsilon} \dots\dots\dots (II .1)$$

Avec :

$\Delta\sigma$: Amplitude de contrainte au cycle stabilisé.

$\Delta\varepsilon_p$: Amplitude de déformation plastique stabilisée.

k'_ε : Coefficient de résistance à la déformation cyclique.

n'_ε : Coefficient d'écroissage cyclique.

Les coefficients de la loi d'écroissage cyclique et monotone ont été calculées par la méthode des moindres carrées sont données par le tableau II .5.

Tableau II.5. Coefficients des lois de comportement monotone et cyclique en traction-compression.

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

Monotone			Cyclique		
N	K(Mpa)	E(Mpa)	n'_ϵ	k'_ϵ (Mpa)	E(Mpa)
0.1150	280	31939	0.1000	283	32512

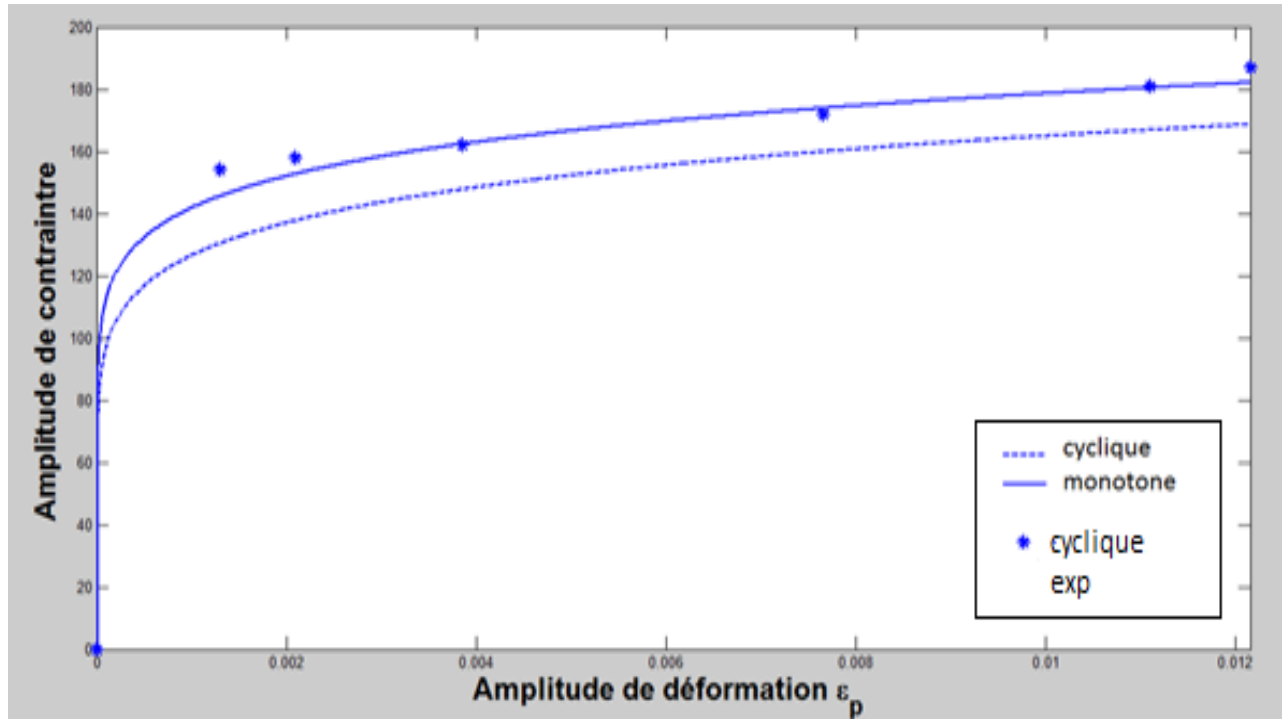


Figure II.3. Courbe de décroissance cyclique et monotone.

4.1.2 Courbe de résistance à la fatigue oligocyclique

Ces courbes tracées à partir d'essais de fatigue oligocyclique permettent de déterminer les relations qui relient respectivement les déformations élastique et plastique à la durée de vie. On a choisi la boucle d'hystérésis stabilisée correspondante à la moitié du nombre de cycles à la rupture.

Les propriétés qui se rapportent aux déformations plastique et élastique sont respectivement appelées propriétés ductilité en fatigue et propriétés de résistance à la fatigue.

L'expression de la déformation plastique en fonction du nombre de cycles à rupture s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (N_R)^c \dots \dots \dots (II .2).$$

Où :

ϵ'_f : Coefficient de ductilité en fatigue

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

C : exposant de ductilité en fatigue.

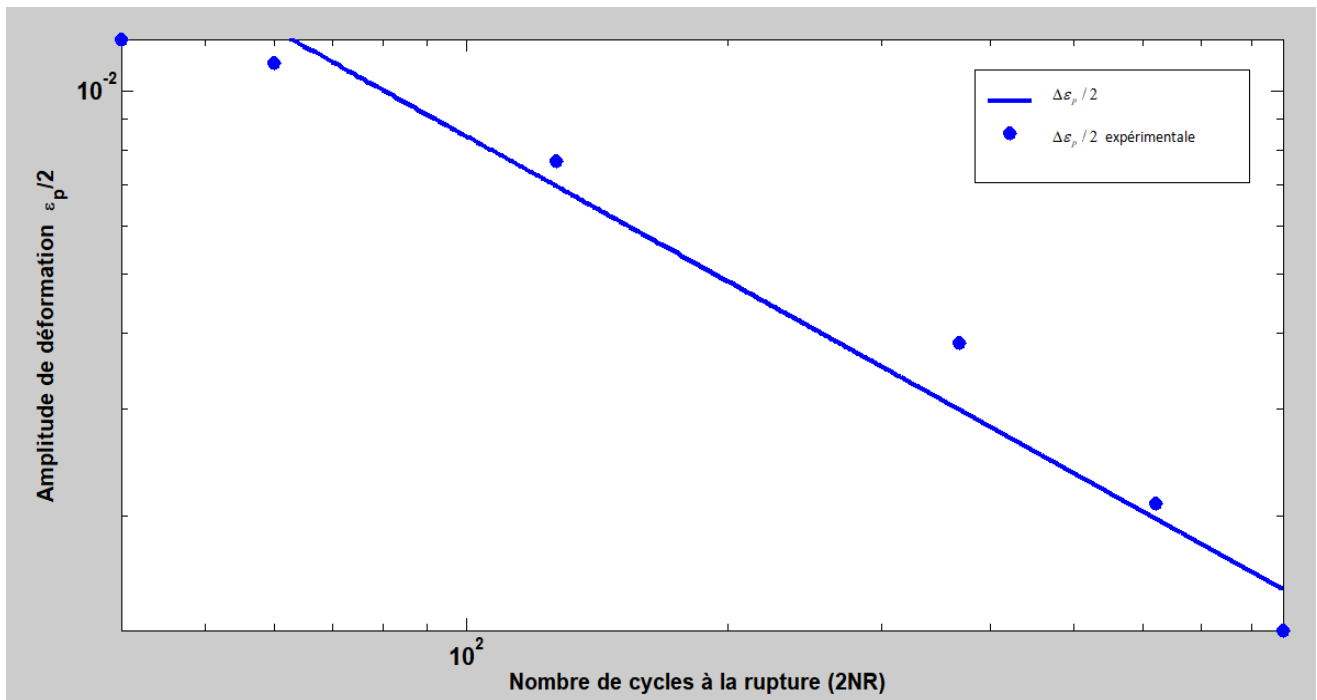


Figure II.4. Courbe de variation de la déformation plastique en fonction de nombre de cycles à la rupture.

Le coefficient et l'exposant de déformation plastique obtenus expérimentalement sont donnés au tableau II.6.

Tableau II.6. Coefficient et l'exposant de déformation élastique de résistance en fatigue.

Coefficient et l'exposant de ductilité en fatigue	
c_ϵ	ϵ'_f
-0.7906	0.555

L'expression de déformation élastique en fonction de nombre de cycles à la rupture s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta\epsilon_{el}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (N_R)^b \dots\dots\dots(II.3).$$

$\frac{\sigma'_f}{E}$: coefficient de résistance en fatigue.

b : exposant de résistance en fatigue.

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

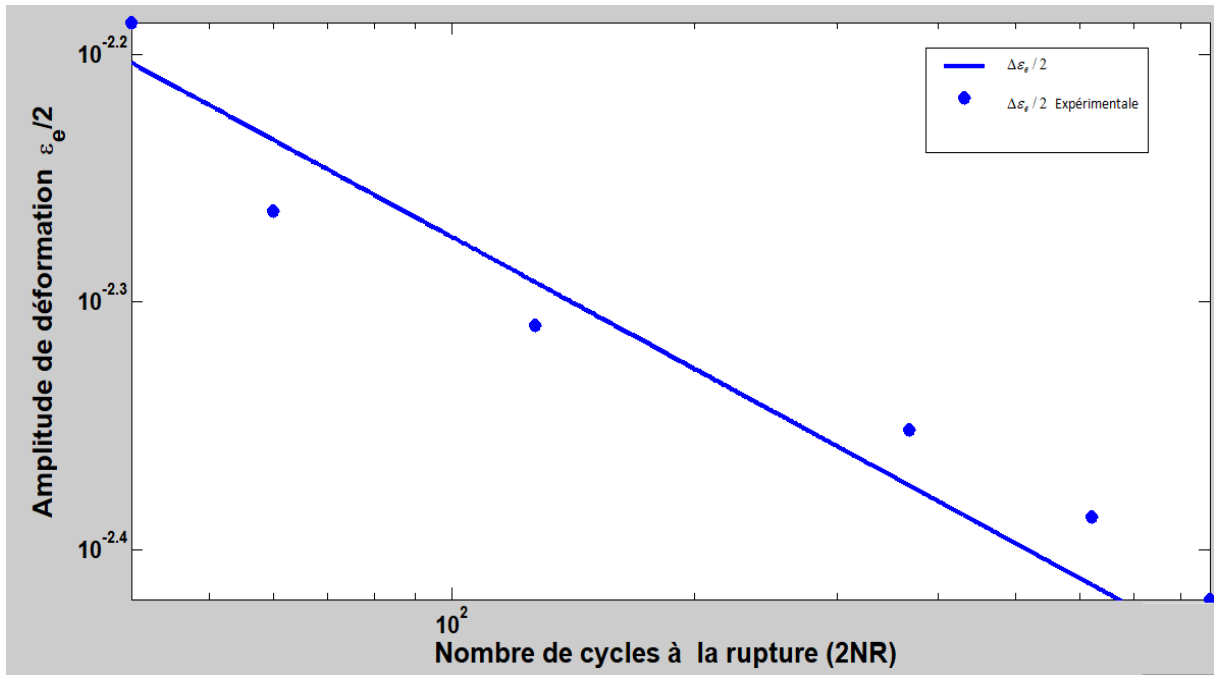


Figure II.5. Courbe de variation de déformation élastique en fonction de nombre de cycles à la rupture.

Le Coefficient et l'exposant de déformation élastique obtenus expérimentalement sont donné sau tableau II.7.

Tableau II.7. Coefficient et l'exposant de déformation élastique de résistance en fatigue.

Coefficient et exposant de résistance en fatigue	
b_ε	$\frac{\sigma'_f}{E}$
-0.174	0.0138

A partir des expressions (II.2 et II.3), on peut déduire l'expression de la déformation totale en fonction du nombre de cycles à la rupture :

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'}{E} (2N_R)^{b_\varepsilon} + \varepsilon'_f (2N_R)^{c_\varepsilon} \dots\dots\dots (II.4).$$

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

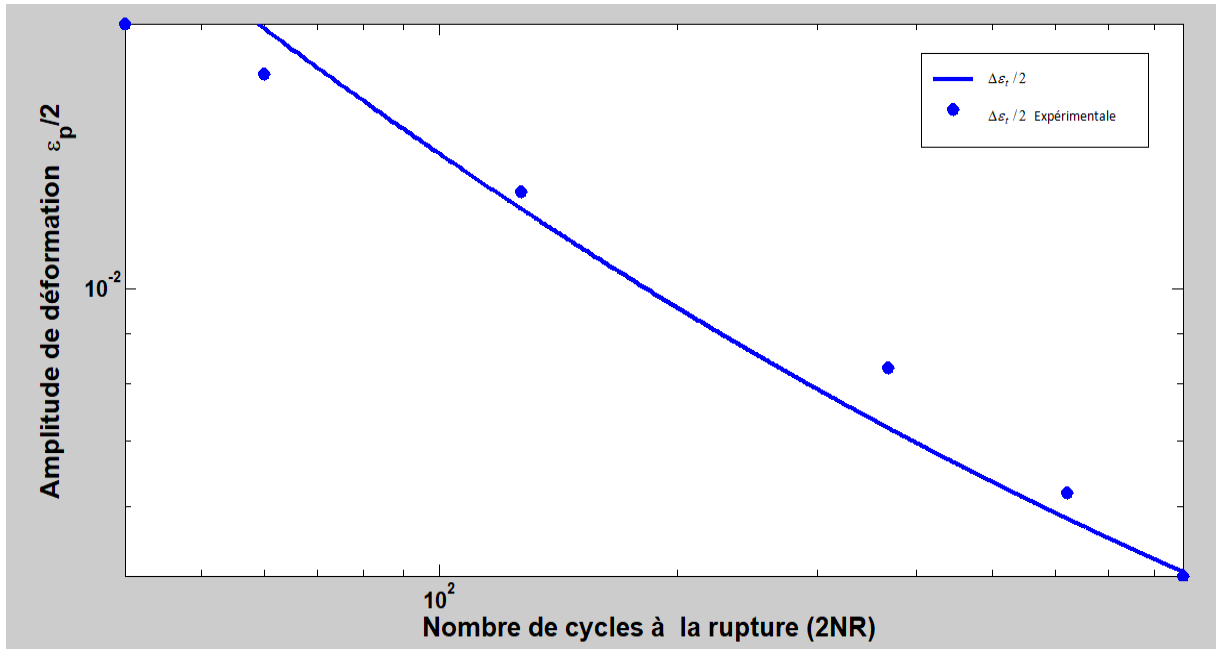


Figure II.6. Courbe de variation de déformation totale en fonction du nombre de cycles à la rupture.

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

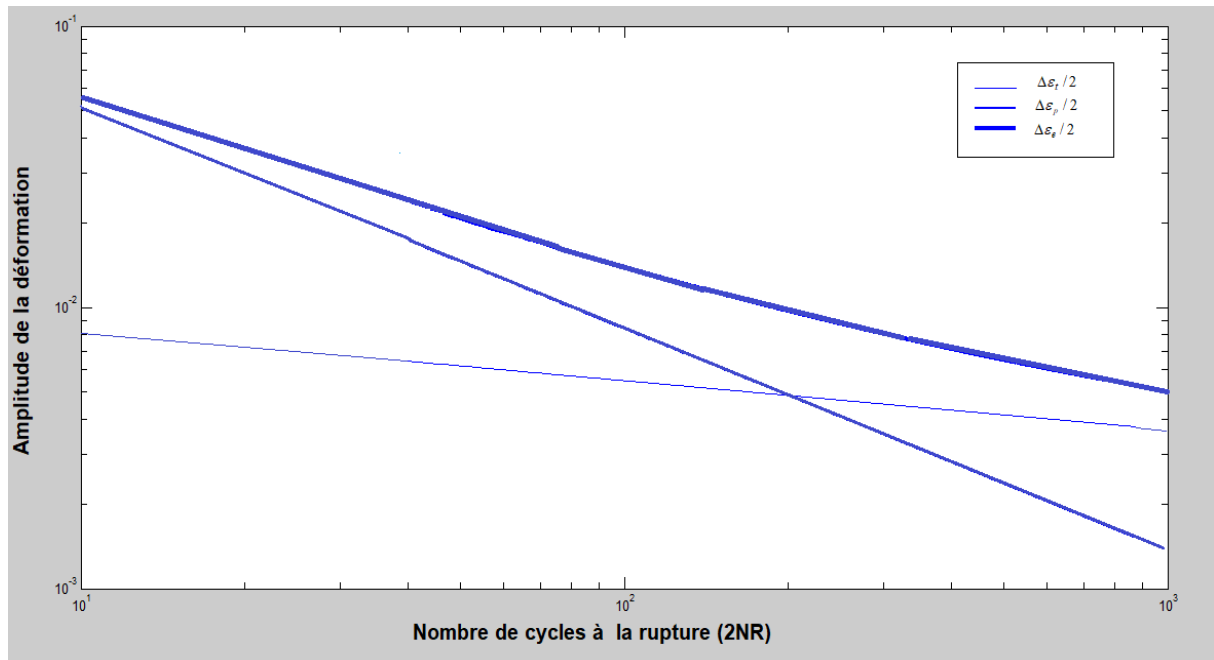


Figure II.7. Courbe de résistance à la fatigue en traction compression.

Conclusion

D'après les résultats obtenus pour l'essai de traction compression nous avons remarqué ce qui suit :

- Le matériau est caractérisé par un durcissement cyclique
- L'évolution de l'amplitude de la contrainte et de la déformation plastique durant l'essai, s'opèrent comme suit :
 - ✓ Croissance de la contrainte et la diminution de la déformation plastique qui traduisent la phase d'écrouissage du matériau,
 - ✓ Stabilisation de la contrainte et de la déformation plastique pendant un grand nombre de cycles.

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

4.2 Comportement en fatigue oligocyclique en torsion alternée

Les essais de torsion alternée ont été menés en contrôle de déformation totale angulaire.

La durée de vie a été déterminée pour une chute de couple de torsion de 50 % par rapport au niveau du premier cycle. Les résultats obtenus au cycle stabilisé sont donnés par le tableau II.8.

Tableau II.8. Résultats des essais de torsion alternée [20].

N°	$\Delta\gamma_t/2(\%)$	$\Delta\gamma_p/2(\%)$	$\Delta\gamma_e/2(\%)$	$\Delta\tau/2(\text{Mpa})$	N_R
T 1	0,300	0,230	0,070	66	2160
T 3	0,850	0,650	0,200	81	483
T 4	1,000	0,650	0,350	84	287
T 5	1,610	1,390	0,220	90	207
T 6	2,000	1,725	0,275	96	105
T 9	3,000	2,655	0,345	106	27

4.2.1 Loi de comportement cyclique en torsion alternée

Comme la courbe de torsion monotone, la courbe d'écrouissage est approximée par la relation:

$$\frac{\Delta\tau}{2} = k'_\gamma \left(\frac{\Delta\gamma_p}{2} \right)^{n'_\gamma} \dots\dots\dots (II .5)$$

Avec

$\Delta\gamma_p$: Amplitude de contrainte de cisaillement.

$\Delta\tau$: Amplitude de cisaillement plastique.

k'_γ : Coefficient de résistance à la déformation cyclique.

n'_γ : Coefficient d'écrouissage cyclique.

A partir de la courbe couple de torsion-déformation, nous avons déterminé la contrainte de cisaillement s'appliquant à la surface de l'éprouvette tubulaire par un calcul prenant en compte le gradient des déformations selon la relation de **Brown [21]**. La figure II.8 montre le comportement monotone et cyclique du matériau en cisaillement.

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

Nous avons noté là aussi que le matériau durcit cycliquement. Les lois de comportement ont été calculés par la méthode des moindres carrés et sont données par le tableau II.9.

Tableau II.9. Coefficients de la loi de comportement monotone et cyclique en torsion alternée.

Monotone			Cyclique		
n_γ	$K_\gamma (MPa)$	G(MPa)	n'_γ	$K'_\gamma (MPa)$	$G' (MPa)$
0,1178	145	29189	0,1875	206	29775

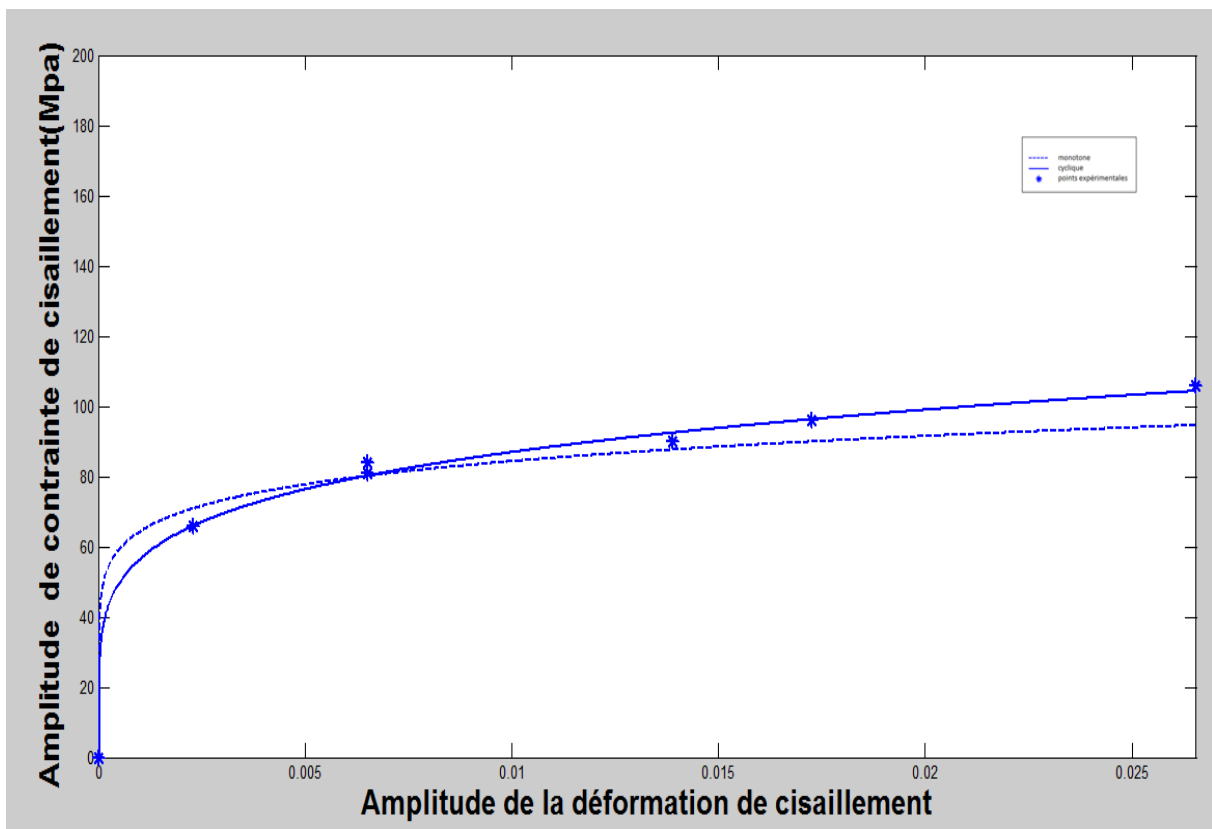


Figure II.8. Loi de comportement cyclique et monotone en torsion alternée.

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

4.2.2 Courbe de résistance à la fatigue olygocyclique

Nous avons déterminé les courbes d'endurance en torsionalternée, selon les relations de Watson et Wetzel [22 ,23] :

$$\frac{\Delta\gamma_e}{2} = \frac{\tau_f'}{G} (2N_R)^{b_\gamma} \dots\dots\dots [II.6].$$

Où :

$\frac{\tau_f'}{G}$: Coefficient de résistance en cisaillement.

b_γ : Exposant de résistance en cisaillement.

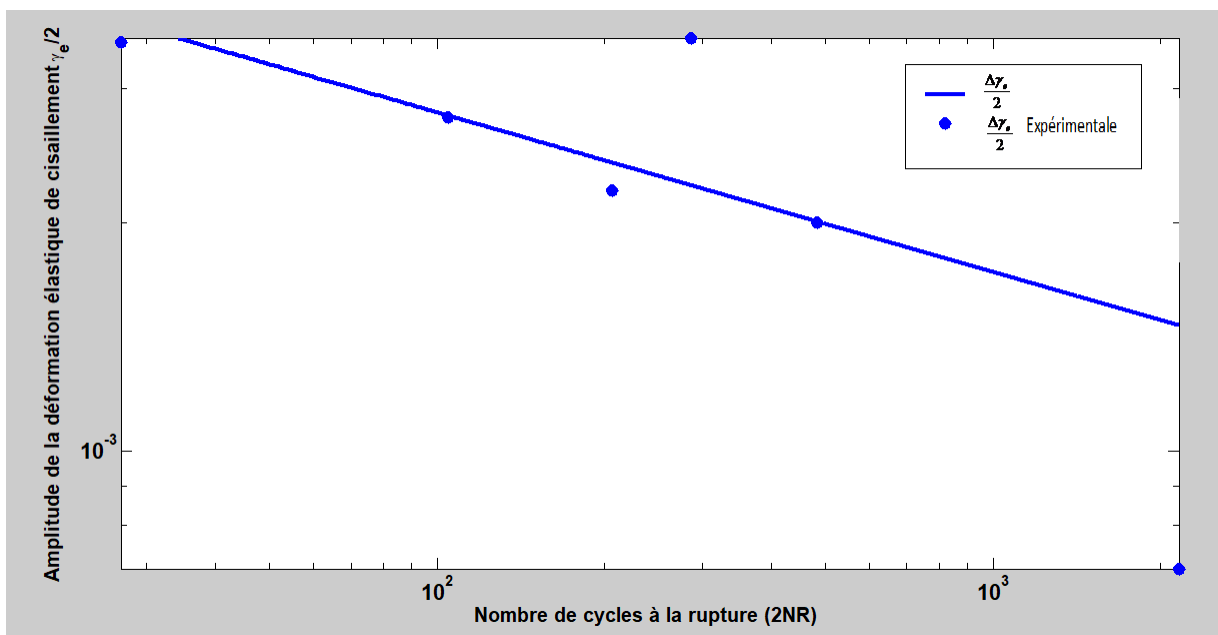


Figure II.9. Courbe de variation de la déformation de cisaillement élastique en fonction de nombre de cycles à la rupture.

Le coefficient et l'exposant de résistance en cisaillement sont reportés dans le tableau II.10.

Tableau II.10. Coefficient et l'exposant de résistance en cisaillement.

Coefficient et l'exposant de résistance au cisaillement	
b_γ	τ_f'/G
-0.210	0.0085

De même :

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

$$\frac{\Delta\gamma_p}{2} = \gamma'_f (2N_R)^{c_\gamma} \dots\dots\dots [\text{II}.7].$$

Où

c_γ : Exposant de ductilité en cisaillement.

γ'_f : Coefficient de ductilité en cisaillement.

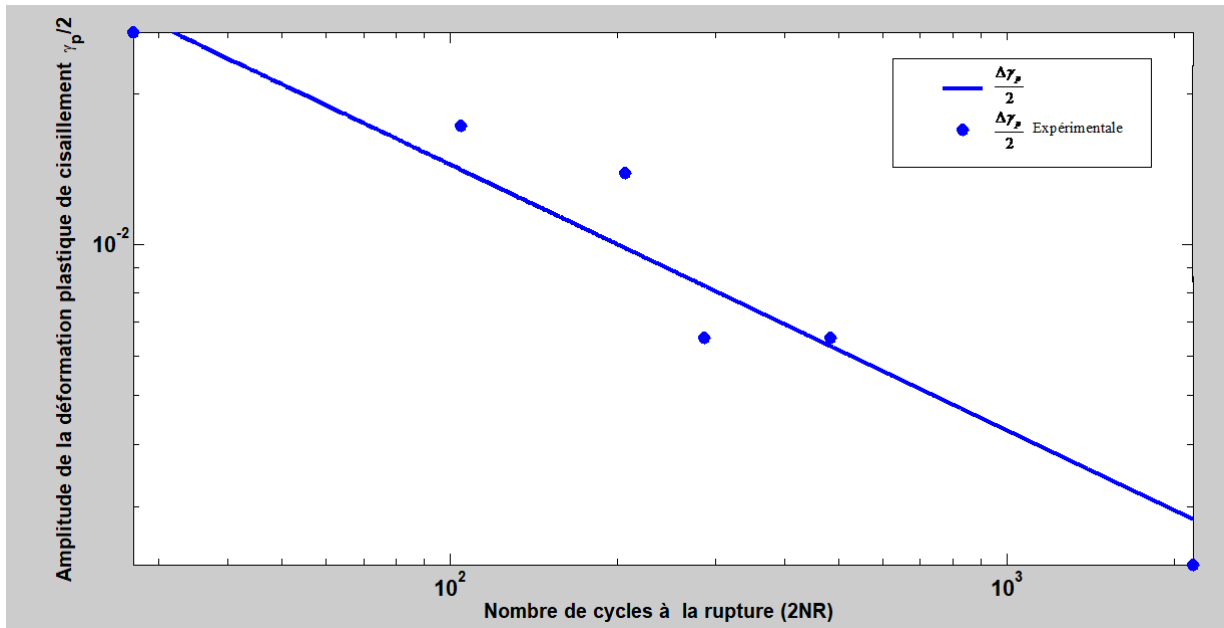


Figure II.10. Courbe de variation du cisaillement plastique en fonction du nombre de cycles à la rupture.

Le coefficient et l'exposant de ductilité en cisaillement sont reportés dans le tableau II.11.

Tableau II.11. Coefficients et l'exposant de ductilité en cisaillement.

Coefficient et l'exposant de ductilité en cisaillement	
C_γ	γ'_f
-0,530	0,240

A partir des expressions (II.4) et (II.5), on peut déduire la loi de résistance à la déformation de cisaillement totale:

$$\frac{\Delta\gamma_t}{2} = \frac{\Delta\gamma_p}{2} + \frac{\Delta\gamma_e}{2} = \frac{\tau'_f}{G} (2N_R)^{b_\gamma} + \gamma'_f (2N_R)^{c_\gamma} \dots\dots\dots [\text{II}.8]$$

CHAPITRE II : Comportement en fatigue olygocyclique d'un alliage de magnésium-lithium.

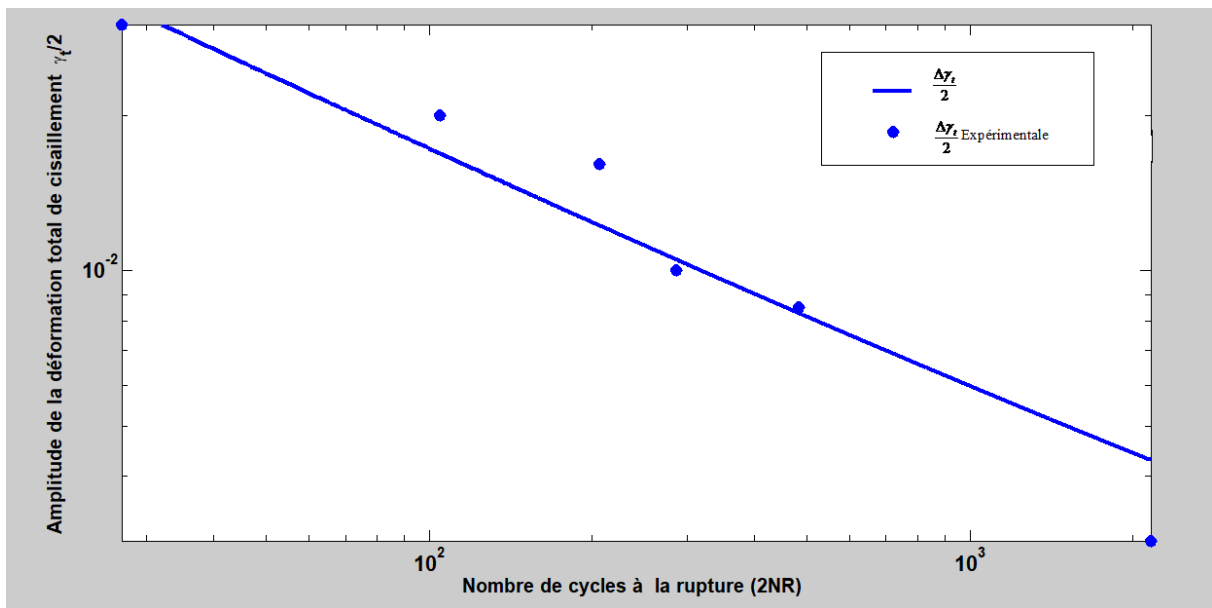


Figure II.11. Courbe de variation de cisaillement totale en fonction de nombre de cycles à la rupture.

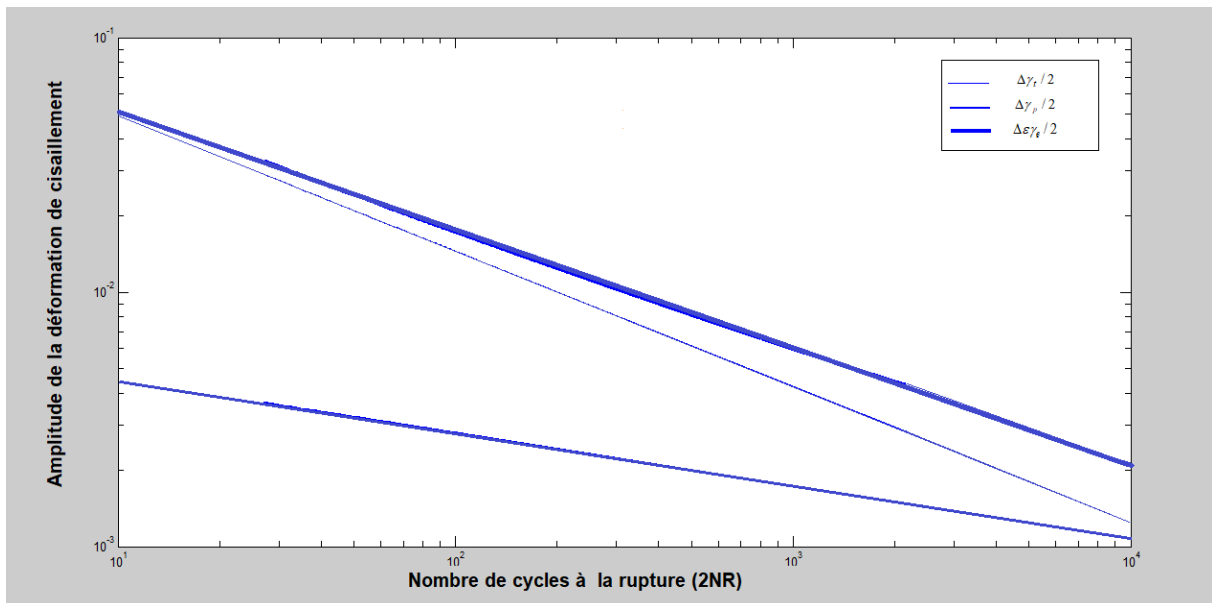


Figure II.12. Courbe de résistance à la fatigue en torsion alternée.

5 Conclusion

Pour les essais de fatigue en torsion alternée, nous constatons les mêmes remarques que celles citées pour les essais de traction-compression.

Conclusion générale

La fatigue est un phénomène mécanique dû à l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps. La fatigue engendre la modification des propriétés mécaniques qui peuvent mener à la formation de fissures et éventuellement à la rupture des structures. Nous nous intéressons à la fatigue oligocyclique laquelle correspond aux domaines à très courte durée de vie. Pour ce domaine les contraintes appliquées sont généralement supérieures à la limite d'élasticité. Les courbes de Wöhler ne sont pas suffisantes pour décrire le comportement dans ce domaine. En effet, il est plus judicieux et cohérent d'utiliser les courbes en déformation telles que celles de Manson-Coffin-Basquin.

L'objectif de cette étude est de déterminer le comportement en fatigue oligocyclique d'un alliage de magnésium-lithium à partir des résultats expérimentaux issus de la littérature. Ce matériau a été soumis à deux types de chargements cycliques : traction-compression et torsion alternée. Nous avons identifié les coefficients de la loi de Manson-Coffin ainsi que la courbe d'écrouissage cyclique. Concernant le comportement de ce matériau, nous avons remarqué ce qui suit :

- ✓ En traction-compression :
 - Le matériau est caractérisé par un durcissement cyclique
 - La présence d'une contrainte moyenne.
 - Stabilisation de la contrainte et de la déformation plastique pendant un grand nombre de cycles.
- ✓ En torsion alternée :
 - Nous avons noté la aussi les mêmes remarques que celles citées pour les essais de traction-compression.

Pour les perspectives de cette étude, nous pouvons compléter ce travail par :

- Etudier le comportement d'autres matériaux.
- Appliquer d'autres critères de fatigue oligocyclique.
- Etudier le comportement sous des sollicitations cyclique composées.

Annexe

Annexe 1

```
clc;clear;close all;
def_plast=[0.13;0.21;0.385;0.765;1.11;1.215];
def_plast=def_plast/100;
def_elast=[0.38;0.41;0.445;0.49;0.545;0.65];
def_elast=def_elast/100;
delta_sigma=[154;158;162;172;181;187];
NR=[870;622;369;127;60;40];
NRmin=min(NR);
NRmax=max(NR);
%=====
NR2=[NRmin:1:NRmax];
%=====
def_plast_min=min(def_plast);
def_plast_max=max(def_plast);
%=====
beta=-0.7906;
alpha=0.555;
%=====
def_plast2=alpha*power(2*NR2,beta);
%=====
figure(1)
loglog(NR2,def_plast2,'LineWidth',3,'MarkerSize',10);
hold on
loglog(NR,def_plast,'*', 'LineWidth',3,'MarkerSize',10);
%=====
hold off
xlabel('Nombre de cycles à la rupture (2NR) ','FontSize',20,'FontWeight','bold')
ylabel('Amplitude de déformation \epsilon_p','FontSize',20,'FontWeight','bold')
axis([NRmin NRmax def_plast_min def_plast_max ])
set(gca,'fontsize',16,'FontWeight','bold')
```

Annexe 2

```
clc;clear;close all;
def_plast=[0;0.13;0.21;0.385;0.765;1.11;1.215];
def_plast=def_plast/100;
delta_sigma=[0;154;158;162;172;181;187];
def_plast_min=min(def_plast);
def_plast_max=max(def_plast);
%=====
def_plast2=[def_plast_min:(def_plast_max-def_plast_min)/1000:def_plast_max];
%=====
beta1=0.1150;
alpha1=280;
beta2=0.1000;
alpha2=283;
%=====
sig_mono=alpha1*power(def_plast2,beta1);
sig_cyc=alpha2*power(def_plast2,beta2);
%=====
sig_min=min(sig_cyc);
sig_max=max(sig_mono);
%=====
figure(1)
plot(def_plast2,sig_mono,'--','LineWidth',2,'MarkerSize',10);
hold on
plot(def_plast2,sig_cyc,'LineWidth',2,'MarkerSize',10);
plot(def_plast,delta_sigma,'*', 'LineWidth',2,'MarkerSize',10);
%=====
hold off
xlabel('Amplitude de déformation \epsilon_p ','FontSize',20,'FontWeight','bold')
ylabel('Amplitude de contrainte','FontSize',20,'FontWeight','bold')
axis([def_plast_min def_plast_max sig_min 200])
%axis([val1 val2 val3 val4])
```

Annexe 3

```
clc;clear;close all;
def_plast=[0.23;0.65;0.65;1.39;1.725;2.655];
def_plast=def_plast/100;
def_elast=[0.07;0.2;0.35;0.22;0.275;0.345];
def_elast=def_elast/100;
def_total=def_plast+def_elast;
delta_sigma=[66;81;84;90;96;106];
NR=[2160;483;287;207;105;27];
NRmin=min(NR);
NRmax=max(NR);
%=====
NR2=[NRmin:1:NRmax];
%=====
def_elast_min=min(def_elast);
def_elast_max=max(def_elast);
def_plast_min=min(def_plast);
def_plast_max=max(def_plast);
def_min=min(def_elast_min,def_plast_min);
def_max=max(def_elast_max,def_plast_max);
%=====
beta1=-0.530;
alpha1=0.240;
beta2=-0.210;
alpha2=0.0085;
%=====
def_elast2=alpha1*power(2*NR2,beta1);
def_plast2=alpha2*power(2*NR2,beta2);
def_total2=def_elast2+def_plast2;
%=====
```

Références bibliographiques

- [1] L. F COFFIN Manual on low fatigue testing, ASTM STP 465, Introduction' (1969)
- [2] S. S MANSON "Fatigue : a complexe subject. Some simple approximation" Experimental Mechanics, (1965).
- [3] J. D MORROW "Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals" ASTM STP 378, 47 - 87.
- [4] G. Henaff, F. Morel, "Fatigue des structures : endurance, criteres de dimensionnement, propagation des fissures, rupture", Ellipses, 2005.
- [5] Tayeb KEBIR. « Nocivité des défauts sur la durée de vie en fatigue des pipelines. Thèse doctorat soutenue le 19 juin 2011, 21.
- [6] S. LI: Investigation of elastoplastic ratchetting behavior of Stain-less Steel 316 under cyclic uniaxial asymmetric loading at room temperature. Lehigh University – Lehigh Preserve, Bethlehem (2018).
- [7] S. LI: Investigation of elastoplastic ratchetting behavior of Stain-less Steel 316 under cyclic uniaxial asymmetric loading at room temperature. Lehigh University – Lehigh Preserve, Bethlehem (2018).
- [8] S.K. PAUL: A critical review of experimental aspects in ratcheting fatigue: microstructure to specimen to component. J. Mater. Res. Technol., (2019).
- [9] S. GOYAL, et al.: Low cycle fatigue and cyclic plasticity behavior of Indian PHWR/AHWR primary piping material. Procedia Eng., 55(2013), 136-143.
- [10] K. DUTTA, K.K. RAY: Ratcheting phenomenon and post-ratcheting tensile behaviour of an aluminum alloy. Mater. Sci. Eng. A-Struct., 540 (2012), 30-37.
- [11] Andrew Thomas brammer, experiments and modeling of the effects of heat exposure on fatigue of 6061 and 7075 aluminum alloys, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Sciences the Department of Mechanical Engineering in the Graduate School of The University of TUSCALOOSA, ALABAMA 2013.
- [12] Tayeb KEBIR, "Influence de l'écrouissage des matériaux sur la propagation de fissure de fatigue" 2018.
- [13] J.L. Chaboche, International Journal of Plasticity 7 (1991), 661–678
- [14] <https://www.simulationmatériaux.com>
- [15] O.K. Chopra, W.J. Shack, Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials, in: NUREG/CR-6909, ANL-06/08, U.S. NRC; Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC 20555-0001, 2007, pages 53-55.
- [16] K. J MTLER Journal of Fatigue of Engineering Materials and Structures, vol.1, N° 2, (1979).
- [17] R. D LOHR and E.G ELLISON "A simple theory low cycle multiaxial fatigue" Fatigue of Engineering Materials and Structures, vol.3, pp 1-7, (1980).
- [18] R. D LOHR and E. G ELLISON "Biaxial high strain Testing of 1 Vo Cr.Mo.V steel" Fatigue of Engineering Materials and Structures , vol.3 , pp 19-37 , (1980).
- [19] A. KONTER, G.T. H JANSSEN, W. HUSSLAG "Effet of biaxial loading and geometry on prediction on low cycle fatigue life" BERLIN, Division L, (1979).

- [20] Saadia bentachfine, « Etude en fatigue oligocyclique multiaxaile en phase et hors phase d'un alliage de MAGNISIUM -LITHIUM » university 1993.
- [21] RAO.K. BHANU SAN KARA, M. VALSAN, R. SANDHYA, S.K RAY, S. L MANNAN, P. RODRIGUEZ "On the failure condition in strain controlled low cycle fatigue" International Journal fatigue, pp 141-1 47, (1985).
- [22] P. WATSON and S. J HILL "In design of fatigue and fracture resistant structures" ASTM STP761, pp 5-27, (1982).
- [23] R. M WETZEL "Analysis and Experiments" Society of Automotive Engineers Warrendale Pa advances in Engineering, vol.6,(1971).